

Un cas que l'on pourrait assimiler à celui de la propagation dans un tube, mais que nous rattachons à celui des enceintes avec orifices se présente quand un mélange gazeux déflagre dans une galerie fermée en son fond et débouchant à l'air libre ; une explosion, amorcée au fond, produit dans le gaz non brûlé un ébranlement se propageant vers l'ouverture et qui est constamment renforcé par la dilatation des gaz brûlés au passage de la flamme ; c'est le phénomène qui a été appelé "la chasse préalable" et qui a pour conséquence que le front de déflagration rencontre au cours de sa propagation un milieu de plus en plus perturbé : la flamme prend une forme très irrégulière, ce qui augmente sa surface et conduit à une augmentation de la vitesse spatiale. On peut ainsi avoir des déflagrations qui cheminent dans une galerie avec une vitesse énorme, pouvant approcher de 1000 m/s ; elles ont été étudiées, à la suite de TAFFANEL,

Dans le cas des mélanges de méthane et d'air par PAYMAN qui leur a donné le nom de quasi-détonations, car ces phénomènes se propageant à une vitesse très élevée ont des effets destructeurs comparables à ceux des détonations.

3.2. Pressions produites par les déflagrations en vase clos.

3.2.1. Pertes d'énergie au cours des déflagrations et expériences.

Dans une enceinte ou dans un appareil qui peut éventuellement être le siège de la déflagration d'un mélange gazeux, il importe de connaître la pression que celle-ci produit, afin, soit de construire des appareils pouvant supporter cette pression, soit de les doter de dispositifs permettant de réduire la pression maximale.

Les pressions produites, quand un mélange déflagre en vase clos sont toujours moindres que les valeurs théoriques calculées. Ce sont des maximum qui ne peuvent être dépassés, du moins tant qu'il ne se produit pas de détonation.

En effet le calcul (vu plus haut) qui suppose un processus rigoureusement adiabatique est un cas idéal servant à définir la température théorique d'explosion à volume constant et la pression théorique d'explosion qui a été désignée par p_2 .

Quand une explosion se produit dans une enceinte, il y a toujours pertes d'énergie dont un des effets est de diminuer la pression engendrée.

Ces pertes d'énergie sont de deux sortes :

- a) le rayonnement des gaz chauds de l'explosion envoie vers la paroi une partie de l'énergie que la réaction chimique a libérée ; l'énergie ainsi perdue par le gaz est d'autant plus grande que le pouvoir absorbant de la paroi est plus grand et que le rayonnement est plus intense.
- b) la conductibilité thermique du matériaux de la paroi entraîne une perte de chaleur d'une part entre les gaz brûlés chauds et la surface de la paroi qui est en contact avec ces gaz. d'autre part entre la paroi et les gaz non encore brûlés puisque ceux-ci lors d'une déflagration en vase clos, subissent avant d'entrer en réaction, une élévation de température à cause de la compression à laquelle ils sont soumis par les gaz brûlés.

L'étude expérimentale des explosions de gaz est faite dans des appareils de laboratoires classiquement appelés bombes parce qu'ils sont à paroi épaisse pouvant résister à des pressions élevées ; on s'est efforcé, sans toujours y parvenir, de réduire le plus possible les pertes d'énergie afin que les pressions que l'on mesure soient voisines des pressions théoriques.

Des appareils permettant de mesurer ces pressions avec précision, et mieux encore d'enregistrer au cours de la déflagration, la variation de pression en fonction du temps, ont été mis au point.

Retenons que le facteur d'élévation de la pression est de l'ordre de 15 pour des mélanges équilibrés d'hydrocarbures avec l'oxygène de 7 à 10 dans le cas des mélanges équilibrés de gaz combustibles avec l'air.

3.2.2. Valeurs des pressions de déflagration en récipients sphériques.

Un groupe d'expériences spécialement intéressantes, parce qu'elles ont été faites dans une bombe sphérique normalisée internationalement, sont celles qui ont été publiées par la Commission électrotechnique internationale en 1957 en vue de la construction d'enveloppes anti-déflagrantes.

3.2.3. Considérations théoriques sur les pressions des déflagrations sphériques.

On appelle "déflagration sphérique", la déflagration d'un gaz dans un récipient sphérique l'inflammation ayant lieu au centre.

Un tel cas est peu fréquent dans les appareils industriels mais il a été étudié au laboratoire, et les résultats qui s'y rapportent aideront à comprendre l'évolution des explosions dans les récipients non sphériques.

Hypothèse : la perte d'énergie par rayonnement des gaz au cours de l'explosion est négligeable.

L'expérience montre que la pression atteint son maximum au moment où la flamme arrive à la paroi ; mais le déroulement du phénomène a pour effet qu'à ce moment du maximum de pression, la température n'est pas uniforme dans la sphère : elle est plus élevée dans les régions centrales qu'à la périphérie et ceci a pour conséquence que la pression maximale est légèrement inférieure à la pression adiabatique théorique qui, elle, suppose le gaz à une température uniforme.

La loi précise de la variation de la pression p en fonction du temps t à partir de l'amorçage ($t = 0$) dans une déflagration sphérique est trop compliquée pour qu'on puisse en donner une expression rigoureuse ; mais on peut traiter le problème d'une façon approximative si on admet qu'au cours de l'explosion la vitesse radiale de flamme ne s'écarte que modérément de la vitesse moyenne v_m (l'expérience montre que l'erreur n'atteint pas 30%).

Dans ces conditions, on peut montrer que pendant les 9 premiers dixièmes de sa durée totale T la montée en pression c'est-à-dire la différence ($p - p_1$), en désignant par p_1 la pression initiale suit la loi

$$(p - p_1) = at^{\frac{3}{n}}$$

a étant une constante, dépendant de la nature du gaz explosif.

La courbe (p, t) expérimentale montre bien une variation selon t^n mais ne permet guère de fixer avec précision la valeur de n .

LAVRE avait conclu de ses expériences que n peut prendre diverses valeurs situées entre 2 et 4.

HARRIS avec des mélanges de penta ne et d'air a trouvé $n = 3$ pour la portion de courbe de la montée en pression entre $\frac{1}{3} T$ et $\frac{2}{3} T$.

La figure 5 montre une courbe de ce type et on peut relever :

- la pression maximale atteinte $p_2 = p_1 + M_m$.
- la durée de l'explosion $T = 0_m$.

- la vitesse moyenne de montée en pression $\left(\frac{dp}{dt}\right)_{\text{moy.}} = \frac{p_2 - p_1}{T} = \frac{M_m}{O_m} \quad (1)$

- la vitesse maximale de montée en pression $\left(\frac{dp}{dt}\right)_{\text{max.}} = \frac{M_m}{t_m}$.

égale à la pente de la tangente au point M.

Si la courbe obéit bien à l'équation $p - p_1 = at^3$ on doit avoir la relation

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{\text{max.}} = 3 \left(\frac{dp}{dt}\right)_{\text{moy.}} \quad (1')$$

autrement dit $t_m = \frac{1}{3} O_m$

Si maintenant nous admettons, comme le suggère l'expérience que pour un mélange gazeux donné v_m est indépendant du volume V de la sphère, autrement dit que c'est une grandeur caractéristique de la déflagration sphérique en général du gaz considéré la durée T de la montée en pression doit être égale à

$$T = \frac{R}{v_m} = \frac{3 \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi} V}}{v_m} \quad (2)$$

et on peut donner au coefficient a une forme plus explicite puisque

$$p - p_1 = at^3 \quad \text{et} \quad p_2 - p_1 = a \frac{3 \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi} V}}{v_m^3}$$

$$\text{on a} \quad p - p_1 = \frac{4\pi}{3} \frac{p_2 - p_1}{V} v_m^3 t^3$$

Pour un mélange explosif donné la durée T de l'explosion est d'après (2) proportionnelle à la racine cubique du volume de la sphère ; la vitesse moyenne ainsi que la vitesse maximale de montée en pression sont inversement proportionnelles à cette même racine (1).

Remarquons que ces lois de la racine cubique ne sont pas liées à la loi en t^3 .

Quant on compare les courbes obtenues dans une sphère donnée, par deux mélanges différents, donnant la même pression finale p_2 comme c'est à peu près le cas pour la mélange de 35,2% de CO - air et celui de 32,3% d' H_2 - air, le rapport des durées, égal dans cet exemple à 7,5 est inversement proportionnel à celui des vitesses de flamme.

Sur la fig. 5 la courbe 2 est relative à un mélange dont la vitesse de flamme égale 0,4 fois celle du mélange de la courbe 1.

Les courbes obtenues expérimentalement ont une forme (fig.6) qui diffère légèrement de celle de la fig. 5 : d'une part la montée en pression présente une longue inflexion puis atteint un maximum de p'_2 évidemment $< p_2$ avant de présenter la branche descendante de refroidissement, d'autre part, la courbe n'a plus de point anguleux.

On peut encore définir une vitesse moyenne et une vitesse maximale de montée en pression cette vitesse max étant égale au coefficient angulaire de la tangente d'inflexion.

La relation (1') n'est plus satisfaite, mais l'expérience montre que pratiquement on ne commet qu'une faible erreur en admettant que la vitesse maximale de la montée en pression est comprise entre 3 et 5 fois la vitesse moyenne de montée en pression.

La vitesse moyenne de montée en pression est en effet plus faible à déterminer expérimentalement.

Les lois de la racine cubique sont encore suivies approximativement.

3.2.4. Pressions de déflagration dans les récipients cylindriques.

Dans un récipient non sphérique, la flamme d'un mélange explosif entre en contact avec la partie de la paroi la plus proche du centre d'inflammation, et, à partir de cet instant, les gaz brûlés perdent de la chaleur enlevée par conduction par la paroi au cours de l'achèvement de la déflagration.

Pour cette raison, la perte de chaleur, à volume égal, est toujours dans un appareil cylindrique supérieure à celle qui se produit dans une sphère.

D'une façon générale, la diminution relative de la pression maximale, due à cette perte d'énergie, est d'autant plus grande, pour un volume total donné, que la forme du cylindre s'éloigne davantage de celle d'une sphère c'est-à-dire que le rapport $\frac{H}{D}$ de la hauteur au diamètre du cylindre diffère davantage de l'unité.

Dans des récipients cylindriques ayant même valeur du rapport $\frac{H}{D}$ mais de volumes différents des relations analogues à celles qui ont été indiquées pour les récipients sphériques sont encore suivies :

pour un mélange explosif donné, la durée de l'explosion est proportionnelle à la racine cubique du volume et la vitesse de montée en pression inversement proportionnelle à cette racine.

Cette loi de la racine cubique paraît valable pour des volumes d'un litre jusqu'à des volumes de plusieurs centaines de mètres cubes, à condition que les récipients soient géométriquement semblables, que la source d'inflammation soit toujours semblablement placée et que le gaz ne soit pas en état turbulent.

3.2.5. Evolution de la pression dans un récipient présentant une ouverture.

Quant un gaz déflagre dans un récipient muni d'une ouverture, le gaz explosif étant donc initialement à la même pression que le milieu extérieur, l'explosion expulse le gaz vers l'ouverture ; les gaz ainsi chassés sont des gaz brûlés si la source d'inflammation est proche de l'ouverture ; ce sont des gaz non brûlés si elle en est éloignée ;

la pression maximale sera évidemment moindre que celle qui aurait été atteinte en enceinte close, mais, la flamme étant perturbée par le déplacement gazeux, elle fait brûler par unité de temps un volume gazeux plus grand que ce qui aurait lieu en vase clos, et ceci peut avoir pour effet, en certains cas, de donner lieu à une vitesse de montée en pression plus grande qu'en récipient fermé.

Envisageons maintenant le cas des récipients qui étaient clos au moment de l'inflammation, mais dans lesquels, à un certain moment au cours de la déflagration, une issue est offerte au gaz (par le dégagement quasi-instantané d'un évent). La pression qui jusque là suivait la loi de montée en vase clos évolue ensuite d'une façon tout à fait différente.

Si l'évent a une très grande surface, l'importance du débit déchargé est telle qu'il y a une chute rapide de pression jusqu'à la pression extérieure ; (fig. 7 a) ; avec un évent de moindre surface, le débit de décharge n'est pas assez grand pour permettre à la pression intérieure de diminuer ; il ne se produit qu'un ralentissement de la montée en pression (fig. 7 b) ; pour certaines valeurs du niveau de pression auquel l'ouverture est créée, on peut observer sur les enregistrements de pression, après le pic correspondant à l'ouverture, un second pic de pression pouvant être moins important que le premier (fig. 7 c) ou parfois plus important (fig. 7 d) ; c'est qu'en effet au moment où l'ouverture est démasquée, il se produit dans l'enceinte une perturbation qui engendre une forte turbulence de gaz et par conséquent une augmentation considérable de la vitesse de flamme.

Il est possible de compléter ce qui précède par quelques considérations quantitatives, en prenant le cas relativement simple d'un cylindre (ou parallélépipède) de longueur n'excédant pas 3 fois le diamètre ayant un volume V , une section droite d'aire A et présentant sur son fond une ouverture (circulaire par exemple) de surface Σ

On distingue 2 cas :

a) L'ouverture dans le fond du récipient n'est pas couverte

Dès le début de l'explosion, du gaz s'échappe à l'air libre à cause de l'augmentation de pression dans le récipient dans une direction opposée à celle de l'ouverture, la flamme a une forme à peu près hémisphérique son rayon au temps t étant $r = v_m t$ en appelant v_m la vitesse de la flamme ; mais, vers l'ouverture, la vitesse spatiale du front de flamme est plus grande et la flamme prend une forme allongée (fig. 8 a) ; sa surface est plus grande que celle d'une sphère de rayon r et par conséquent, le volume de gaz brûlé par unité de temps étant plus grand que ce qui se passerait dans le même récipient sans ouverture, la vitesse de montée en pression est plus grande (fig. 8 b) ; quand la flamme vient à toucher la paroi, sa surface vers le fond fermé reste à peu près constante, mais celle qui se présente vers l'orifice va en augmentant, ce qui conduit encore à un accroissement de la vitesse de montée en pression.

Considérons maintenant la déflagration dans un récipient de forme semblable au précédent le rapport de similitude valant λ pour ce récipient on aura :

$$V' = \lambda^3 V$$

$$A' = \lambda^2 A$$

$$\Sigma' = \lambda^2 \Sigma$$

Si la vitesse spatiale moyenne v_m est indépendante de l'enceinte au temps t , dans le volume V' la partie hémisphérique de la flamme aura un rayon r et il est naturel de penser que dans ce cylindre V ; le rapport de similitude étant λ (fig. 8c) ; aux deux instants ici considérés ; la pression de l'une et de l'autre enceinte a la même valeur et les pressions maximales atteintes seront les mêmes ; les vitesses de montée en pression et en particulier leurs maximums R_m et R'_m sont dans le rapport

$$\frac{R'_m}{R_m} = \frac{1}{\lambda} = \sqrt[3]{\frac{V}{V'}}$$

et l'on retrouve bien la loi de l'inverse de la racine cubique ; mais ceci n'a lieu qu'à la condition qu'on ait pour les surfaces d'ouverture et les volumes la similitude

$$\frac{\left(\frac{\Sigma'}{\Sigma}\right)^{\frac{1}{2}}}{\left(\frac{\Sigma'}{\Sigma}\right)^{\frac{1}{2}}} = \left(\frac{A'}{A}\right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{V'}{V}\right)^{\frac{1}{3}}$$

donc $\Sigma = k_1 V^{\frac{2}{3}}$

et $\frac{\Sigma}{V} = k_1 V^{-\frac{1}{3}}$

on a donc aussi la loi de l'inverse de la racine cubique pour le rapport

$$X = \frac{\Sigma}{V}$$

appelé coefficient d'évent ;

dans ces comparaisons, le quotient $\frac{A}{\Sigma} = K$ est constant c'est le coefficient de CUBBAGE.

- b) L'ouverture dans le récipient se produit postérieurement à l'allumage de la flamme lorsque la pression intérieure atteint une valeur p'_1 supérieure à la pression initiale p_1 .

Tant que la pression n'a pas atteint la valeur p'_1 le développement de la pression est le même qu'en récipient clos et par conséquent, pendant cette phase la vitesse de montée en pression obéit à la loi de la racine cubique.

Ensuite, lorsque l'ouverture est démasquée, la flamme change de forme et l'évolution de la déflagration serait semblable à celle qui a été analysée sous a) s'il n'y avait pas une brusque perturbation du mouvement des gaz lors de l'ouverture ; c'est à cette perturbation que sont dus les points de rebroussement (au premier pic de pression) des courbes des fig. 7 b, c, d.

Mais si p'_1 est peu supérieure à la pression extérieure p_1 la perturbation est faible et le phénomène doit se poursuivre comme en a) ; si p'_1 est élevé et voisin de la pression maximale p_2 qui serait atteinte en vase clos, la plus grande partie de la déflagration s'est déroulée comme en vase clos et la loi de la racine cubique doit encore être à peu près suivie ; ce n'est que si p'_1 a une valeur relativement éloignée de p_1 aussi bien que de p_2 que le phénomène peut se dérouler d'une façon assez différente.

L'expérience montre que lorsque p'_1 ne diffère pas trop de p_1 la pression maximale atteinte est indépendante du volume, à condition que le coefficient K reste constant.

3.2.6. Conclusions.

La pression maximale susceptible d'être atteinte en vase clos est toujours moindre que la pression théorique.

Il n'y a pas de méthode même compliquée, qui permette de déterminer à l'avance, de façon précise, la courbe de montée en pression se produisant dans un appareil déterminé ; mais, pour une enceinte d'un volume et d'une forme donnée si on possède des résultats expérimentaux relatifs à divers gaz explosifs, ils peuvent servir à une estimation de ce qu'on peut attendre d'un nouveau mélange d'après ses caractéristiques et en particulier des valeurs de la pression maximale et de la vitesse de montée en pression dans une bombe sphérique normalisée ; l'application de la règle de la racine cubique donne des ordres de grandeurs acceptables pour les durées d'explosion.

3.3. Les diaphragmes de rupture.

3.3.1. Définition des diaphragmes de rupture.

Alors que les soupapes de sûreté sont des appareils comprenant des parties mobiles et dont le fonctionnement est réversible les diaphragmes de rupture sont des dispositifs statiques à fonctionnement irréversibles, puisque celui-ci consiste en la rupture d'une plaque ou d'une membrane généralement en métal lorsque la différence des pressions s'exerçant sur les deux faces dépasse une certaine valeur.

Ils sont souvent de forme circulaire et portent alors le nom de disques de rupture.

La rupture peut s'effectuer en un temps très court de quelques ms (millisecondes) contrairement à l'entrée en action d'une soupape qui est bien moins rapide ; elle dégage un orifice pouvant avoir une grande section offrant ainsi une issue au gaz sous pression.

On emploie surtout les disques de rupture pour doubler ou pour remplacer les soupapes de sûreté sur les appareils à pression ; mais ils peuvent aussi servir à limiter les effets d'une explosion dans un appareil et empêcher qu'il éclate, si cette explosion n'est pas trop rapide, chose qu'on ne peut généralement pas obtenir avec les soupapes parce qu'elles sont d'un fonctionnement trop lent et qu'elles n'ont pas un débit suffisant.

Sous sa forme la plus simple, un disque de rupture consiste en une membrane fermement tenue entre deux brides (fig.9) ; une des faces est exposée à la pression du gaz dans l'appareil à protéger l'autre à la pression atmosphérique (éventuellement au vide).

3.3.2. Types de disques de rupture.

Depuis 1930 on emploie de plus en plus des disques bombés (fig. 10) qui sont montés dans des pièces dont le profil a été étudié pour éviter les effets de cisaillement sur les bords ; le métal est soumis à la pression sur la face concave, il est donc mis en traction par la pression qu'il subit. La fabrication de ces disques exige l'emploi de métaux de qualité contrôlée, en feuille d'épaisseur bien uniforme.

Vers 1965, sont apparus les disques de type "inversé" (fig. 11) qui exposent la face convexe à la pression ; le métal y travaille donc à la compression, et lorsque la pression devient trop forte, le flambement fait effondrer la surface et le disque tend à prendre la forme opposée ; il entre alors en contact avec des pièces à arête vive portant une pointe centrale, ce qui crève le métal et le déchire.

Quand il s'agit de limiter les effets d'une explosion un disque de rupture doit être monté le plus près possible de l'appareil à protéger au mieux sur une très courte tubulure que porte l'appareil.

Des dispositions sont à prendre pour que les gaz libérés par rupture d'un disque soient évacués hors des ateliers.

3.3.3. Matière des disques de rupture.

Autrefois, le cuivre en feuille était à peu près le seul métal utilisé et de là vient le nom de "cliquant de rupture" que l'on donnait à ces disques minces.

Certains aciers inoxydables, le nickel et des alliages de nickel permettent d'obtenir des disques très réguliers pour haute pression de rupture.

Si le disque doit être en contact avec des produits corrosifs on le fait en métaux moins courants comme l'or, le titane, le platine ou on lui applique un revêtement inattaquable en matière plastique approprié :

le polytetrafluorethylène.

La température à laquelle on peut utiliser un disque de rupture métallique est limitée par le phénomène de fluage qu^u subissent les métaux sous des charges élevées.

Ainsi pratiquement on ne peut pas employer l'aluminium au dessus de 100 °C, la cuivre au dessus de 200°C tandis que le nickel et les aciers inoxydables austénitiques restent utilisables à 400°C ; avec certains alliages, des disques pouvant servir à 450°C.

Une mention spéciale doit être faite du graphite ; il s'agit de graphite imprégné d'une résine thermodurcissable ; le graphite a une très bonne résistance chimique à la plupart des agents corrosifs il a été possible de faire des disques ayant une bonne tenue à des températures aussi élevées que 450°C grâce à une forme de carbone vitreux réfractaire.

On donne à ces disques de graphite la forme d'un cylindre dont la partie centrale évidée a une épaisseur correspondant à la pression de rupture désirée (fig. 12).

3.3.4. Pression de rupture des disques.

Quand un disque métallique plan, monté dans son support, est soumis sur une de ses faces à une pression statique allant croissant il prend une forme de calotte approximativement sphérique, s'amincit en son centre et se rompt à une pression qui, pour un métal donné, est à peu près proportionnel à l'épaisseur e et inversement proportionnel au diamètre D

$$p_R = A \frac{e}{D}$$

le coefficient A varie beaucoup avec la qualité du métal (étirage, recuit ou non,).

Pour un métal donné le coefficient A varie avec la température.

Les fabricants livrent les disques par lots en indiquant pour chaque lot la pression nominale d'éclatement (+ 10%) pression à laquelle cède le disque, à la température ambiante, quand il est soumis à une certaine pression d'air comprimé, appliquée progressivement, par exemple en plus de 10 secondes, jusqu'à la rupture.

Il doit y avoir un écart suffisant entre la pression maximale que peut supporter l'appareil sur lequel un disque est placé et la pression de rupture de ce disque.

3.3.5. Fonctionnement dynamique des disques de rupture.

Monté sur un appareil dans lequel se produit une explosion, un disque est soumis à une pression qui atteint sa valeur maximale en un temps très court de l'ordre de 5 à 100 ms dans une déflagration; ces pressions très rapidement appliquées sont appelées des pressions dynamiques.

A l'extrême, la pression dynamique devient un choc de pression quand elle vient s'appliquer en quelques μ s.

Le comportement d'une pièce en métal sous l'effet de sollicitations appliquées très rapidement, dépend de la loi de variation avec le temps de ces sollicitations; un disque soumis à une sollicitation rapide peut supporter sans se rompre, pendant un temps très court une pression plus élevée que la pression statique d'éclatement.

En vue de leur emploi sur des appareils pouvant être le siège d'une explosion, il serait très utile de connaître les pressions de rupture des disques en fonction de la vitesse de montée en pression qui leur est appliquée; malheureusement, nos connaissances à ce sujet sont très maigres.

LUKER et LEIBSON ont fait des expériences sur des disques bombés en divers métaux soumis à un choc de pression résultant de la réflexion sur le disque d'une onde de détonation d'un mélange $2H_2 + O_2$; ils se rompent à une pression qui va de 1,3 à 1,8 fois la pression statique de rupture; dans le cas des pressions dynamiques moins brutales le coefficient pour ces métaux est probablement moindre.

3.4. Protection d'appareils au moyen d'évents.

3.4.1. Caractères généraux des pressions en enceintes non closes.

Dans une enceinte qui n'est pas complètement close, une déflagration d'un mélange gazeux produit une pression variable au cours de la déflagration, mais dont la valeur maximale est moindre que celle qui serait atteinte dans la même enceinte restant complètement close pendant toute la durée de l'explosion.

Une ouverture, même petite, suffit à modifier profondément la loi de variation de la pression en fonction du temps; cette loi ne sera pas la même selon que l'origine de la déflagration est voisine de l'ouverture ou qu'elle en est éloignée; mais si une faible ouverture (< 1% de la surface de l'enceinte) diminue la pression maximale, elle peut éventuellement rendre la montée en pression plus rapide, à cause de l'augmentation de la surface de flamme qu'elle produit ou à cause de la turbulence qu'elle favorise.

Dans un local qui est ouvert sur une de ses faces ou à fortiori sur plus d'une face, comme un hangar, une déflagration de l'atmosphère de ce local ne produit que des effets de pression très faible, mais bien entendu la flamme pourra brûler + gravement le personnel.

3.4.2. Protection contre les effets de pression d'une déflagration dans une enceinte close.

Dans certaines fabrications industrielles, on est amené à traiter dans des appareils des mélanges gazeux sans pouvoir exclure tout risque d'explosion accidentelle, soit que le mélange normalement traité soit explosif soit que ce mélange, normalement non explosif, risque de le devenir en cas de certaines perturbations de fonctionnement, prévisibles ou non.

Il faut alors que l'appareil puisse supporter sans dommage (ou seulement avec des dommages minimes, acceptables, aisément réparables) et dans tous les cas sans mettre en danger le personnel, les effets d'une explosion interne ; on a alors le choix entre diverses solutions :

- 1°) La première solution consiste à construire un appareil très robuste supportant sans rupture ni déformation notable la pression d'explosion

C'est possible dans le cas de mélanges travaillant sous une pression faible ou modérée, susceptibles de déflagrer mais non de détoner.

Ce n'est que dans des cas assez rares (pression normale de fonctionnement peu élevée, appareil de petites dimensions) que l'on peut construire un appareil pouvant résister à une détonation interne, à cause des pressions très élevées qui sont produites.

- 2°) La seconde solution qui est celle que l'on adopte le plus souvent, consiste à munir l'appareil de dispositifs aptes à créer, en cas d'élévation anormale de la pression, un orifice de décharge du gaz.

Ces orifices sont nommés évents. Ils sont fermés pendant le fonctionnement normal par des panneaux ou par des disques de rupture.

- 3°) Enfin quand l'appareil est de grandes dimensions et qu'il n'est pas possible de le munir d'évents efficaces, on le place à l'intérieur d'un blockhaus en béton qui retiendrait les éclats en cas d'explosion.

3.4.3. Conditions d'installation des événements.

Les événements sont des orifices, fermés en service normal, mais dont le dispositif d'obturation peut céder sous l'effet d'une certaine pression intérieure, en démasquant une ouverture permettant la décharge des gaz contenus dans un appareil, quand ces gaz sont sous une pression plus élevée que la pression ambiante.

Un événement peut consister, dans le cas d'un appareil parallélépipédique utilisé à la pression atmosphérique comme une étuve par exemple, en un des panneaux formant une face ou un fond et dont la fixation cède facilement en cas de pression intérieure.

Il peut être aussi une trappe qui se soulève sous la pression des gaz ou des volets qui se rabattent latéralement.

Sur des appareils qui doivent être bien étanches en service et sur ceux qui sont normalement sous pression, les événements sont constitués par des disques de rupture ou par des cadres sur lesquels sont tendues des feuilles en matière plastique.

L'installation d'événements sur un appareil exige que l'on ait préalablement répondu aux questions suivantes :

- quelle doit être la surface à donner à l'événement - ou aux événements - et si c'est un disque de rupture,
- à quelle valeur doit-on fixer la pression à laquelle il se rompt ?

On doit bien entendu savoir la pression qui ne doit pas être dépassée dans l'appareil et connaître les données caractéristiques de la déflagration, (ou des divers types de déflagration) susceptible de s'y produire, en particulier la vitesse maximale de la montée en pression.

Pour caractériser la surface S de l'événement (ou la surface totale des événements quand il y en a plusieurs) duquel il faut doter une enceinte de volume V ; les auteurs américains, et en particulier COUSINS et COTTON, emploient sous le nom de rapport de mise à l'air ou rapport d'événement la fraction $\frac{100 S}{V}$

identique, au facteur 100 près, à ce qui est appelé l'ouverture spécifique $\frac{S}{V}$ par STRAVMAN ou le coefficient d'événement par le CERCHAR.

Mais la valeur qu'il faut donner à ce coefficient pour que la pression de l'appareil que l'on veut protéger ne dépasse pas une valeur donnée à l'avance, dépend de V , ainsi que, dans une certaine mesure, de la forme de cet appareil.

Ce coefficient a pour dimension l'inverse d'une longueur, ce qui n'est pas satisfaisant ; c'est pourquoi CUBBAGE emploie pour caractériser l'événement dans le cas d'une enceinte cylindrique de section droite A

$$\text{le rapport } K = \frac{A}{S}$$

Divers chercheurs ont tenté de soumettre au calcul le problème des événements.

Probablement vaut-il mieux aborder empiriquement le problème, en prenant en considération les résultats d'expérimentations ayant été faites sur des mélanges gazeux explosifs comparables aux mélanges en cause, et dans des appareils de forme et de dimensions analogues à celles des appareils qu'on se propose d'utiliser ; les expériences qui ont été faites dans ce domaine sont malheureusement peu nombreuses. A partir de ces résultats expérimentaux on pourra tenter un calcul mais le mieux sera toujours, si c'est possible, de vérifier par un essai de l'appareil à protéger, l'efficacité des événements dont on aura fait choix.

3.5. Les coupe-flammes.

3.5.1. Le coincement des flammes.

La photographie d'une flamme déflagrante avançant dans un tube vertical en verre montre que la forme de la flamme est approximativement celle d'une hémisphère dont la base ne rejoint pas la paroi du tube (fig. 13) ; il existe un espace mort dans lequel le gaz non encore brûlé s'écoule au voisinage de la paroi c'est un fait général : une flamme ne peut ^{est} pas être en contact avec une paroi solide (sauf peut être si celle-ci a une température comparable à celle de la flamme), car la paroi à la température T_0 constitue par rapport au gaz chaud un "puits de chaleur" et il doit nécessairement y avoir entre la flamme à la température T_f et la paroi à la température T_0 une couche de gaz de température variant de T_0 à T_f .

Ainsi quand on expérimente avec un mélange donné dans des tubes de diamètres de plus en plus petits, après avoir observé que la vitesse spatiale de la flamme va en diminuant on constate que pour un certain diamètre et aux diamètres plus petits la propagation de la flamme ne peut plus avoir lieu ; le diamètre est trop faible pour qu'il y ait simultanément la flamme et les espaces morts de gaz moins chauds dans le tube.

Cette impossibilité pour une flamme de se propager dans un tube de diamètre insuffisant fut découvert par DAVY en 1815 et a reçu plus tard le nom de "coincement de la flamme".

De même entre deux surfaces solides planes (ou courbes) très rapprochées une flamme ne peut pas se propager ; c'est encore le phénomène du coincement. On le retrouve aussi quand une flamme aborde des espaces tortueux et étroits, ou des canaux, même courts, mais de petite largeur, comme le sont les mailles d'une toile métallique ; il est à la base de l'emploi des toiles métalliques dans la construction des lampes de sûreté de mineur en mines grisouteuses.

3.5.2. Définition des distances de coincement.

Si l'on considère le puits de chaleur constitué par deux plaques planes parallèles, le plus grand écartement que peuvent avoir ces plaques sans qu'une flamme d'un certain mélange gazeux explosif puisse s'y propager est la distance de coincement pour ce mélange ;

Si l'on considère un puits de chaleur cylindrique (tube) la distance de coincement est le plus grand diamètre du tube dans lequel il ne peut y avoir de propagation.

Ce diamètre est toujours plus grand (de 20 à 45%) que la distance de coincement entre plaques, aussi serait-il préférable de parler d'une part d'interstice maximal de coincement et d'autre part de diamètre limite de coincement.

Pour un gaz explosif constitué par un mélange d'un combustible et d'un comburant, les distances de coincement dépendent beaucoup de la composition et sont une dizaine de fois plus grande pour un mélange voisin d'une des limites d'inflammabilité que pour les mélanges voisins du mélange équilibré.

Les valeurs qui ont été publiées pour divers mélanges gazeux présentent, d'un auteur à l'autre, quelques divergences tenant à ce que les modes opératoires étaient différents ; avec une méthode d'épreuve codifiée comme celle de la détermination des interstices de sécurité pour enveloppes antidéflagrantes on aurait des valeurs concordantes.

Le tableau n°6 reproduit quelques uns des résultats obtenus par CALOTTE et ses collaborateurs pour des mélanges équilibrés avec l'air de gaz ou vapeur.

Tableau n°6.

<u>Distances de coincement entre plans parallèles de mélanges avec l'air.</u>	
gaz	Distance de coincement en mm
Hydrogène	0,45
Sulfure de carbone	0,68
Ethane	1,5
Propane	1,8
Ethylène	1,0

Le tableau n°7 donne les valeurs relatives au CH_4 à différentes pressions.

Tableau n°7.

<u>Distances de coincement de mélanges à base de méthane</u>		
gaz	pression	distance de coincement en mm
méthane-air	1	0,22
méthane-air	0,5	0,39
méthane-air	0,2	0,90
méthane-air	0,1	1,8

On voit que les distances de coincement (d) varient en sens inverse de la pression ; ceci est général et les expérimentateurs sont d'accord pour la loi de variation

$$dp^n = \text{cte}$$

l'exposant n, variant d'un gaz à l'autre et avec les conditions de mesures, étant compris entre 0,85 et 1,02.

3.5.3. Les coupe-flammes.

Par coupe-flamme on désigne un dispositif qui lorsqu'il est intercalé dans une canalisation renfermant un gaz explosif au repos ou en mouvement, est apte à empêcher qu'une déflagration, abordant une face du dispositif, le traverse et poursuive sa propagation au delà du coupe-flamme.

Tous ces dispositifs sont conçus de façon qu'une flamme qui les aborde est divisée en une pluralité de petites flammes s'engageant dans des canaux moins larges que la distance de coincement relative au gaz considéré ; toutefois, un coupe-flamme ayant toujours pratiquement une longueur assez réduite, il ne fonctionne efficacement que si la vitesse de la flamme déflagrante qui l'aborde ne dépasse pas une certaine valeur qui dépend des caractéristiques géométriques de l'appareil ainsi que de la nature du gaz explosif.

Les coupe-flammes sont utiles pour limiter les longueurs de canalisations de transport susceptibles d'être endommagées par une explosion ; ils sont aussi très utiles lorsqu'ils sont placés dans une canalisation reliant un appareil au suivant dans une unité de fabrication, car ils limitent à un seul appareil les dégâts possibles.

L'élément efficace, porteur des passages dans lesquels la déflagration subit le coincement peut avoir une disposition géométrique régulière, (comme les mailles d'une toile métallique), ou des trous en quinconce à travers une plaque perforée ou un faisceau de tubes de petits diamètres ou un bloc percé de canaux cylindriques ou encore un enroulement de ruban gaufré.

Les espaces dans lesquels le gaz circule peuvent être des interstices étroits entre des surfaces planes parallèles comme dans l'appareil destiné à être placé sur une canalisation parcourue par un mélange d'air et de méthane qui a été mis au point par LOISON (plaques métalliques de 5cm de largeur, placées à 0,5 mm les unes des autres).

Un coupe-flamme peut aussi être constitué par un assemblage sans régularité géométrique de canaux tortueux, comme dans une colonne remplie en vrac de cailloux.

On a aussi constitué des coupe-flammes en métal fritté ou en pressant ensemble des fils métalliques ou de laine d'acier ; récemment, on a proposé des "mousses" métalliques préparées par pulvérisation de métal (mélange de chrome et de nickel) sur une mousse plastique réticulée qu'on élimine ensuite pour ne garder que le dépôt métallique.

On peut enfin mentionner le dispositif quelquefois employé dans les tuyauteries de mise à l'air de réservoirs de liquides inflammables, et qui consiste en un remplissage de billes en métal compris entre deux grilles avec fentes allongées.

Les éléments efficaces d'un coupe-flamme sont généralement maintenus dans une armature robuste qui permet la fixation du coupe-flamme dans une canalisation.

Dans le choix d'un coupe-flamme on doit tenir compte non seulement de l'efficacité vis-à-vis du gaz en cause mais aussi de la perte de charge qu'il fait subir, en service normal, au courant gazeux.

Dans une canalisation munie d'un coupe-flamme, il convient d'installer un système d'alarme prévenant si une déflagration a eu lieu, car si une flamme ne franchit pas le dispositif d'arrêt, elle peut éventuellement se maintenir en amont, juste avant le coupe-flamme et l'échauffer peu à peu jusqu'à ce qu'il atteigne une température à laquelle il est inapte à arrêter la flamme.

3.5.4. Les coupe-flammes à ruban gaufré.

Un ruban métallique gaufré, c'est-à-dire une bande de métal qui a été passée entre deux roues dentées qui ont formé des plis alternativement dans un sens et dans l'autre peut être enroulé pour former un bloc présentant un très grand nombre de petits canaux à section approximativement triangulaire.

Des coupe-flammes constitués par des blocs de ce genre ont été étudiés en 1959 par CUBBAGE et en 1963 par PALMER et TONKIN.

Ces derniers ont expérimenté avec un mélange oxyéquilibré de propane-air qui peut être considéré comme représentatif des mélanges d'air avec des hydrocarbures saturés ou avec beaucoup de vapeurs organiques en général.

Ils ont conclu qu'un coupe-flamme ainsi constitué est apte à arrêter efficacement une flamme de déflagration quand la vitesse spatiale (v_s) de celle-ci ne dépasse pas une certaine valeur donnée par la relation:

$$v_s = C n y$$

ou n = la nombre de canaux par unité d'aire de la section droite et y = l'épaisseur du coupe flamme (longueur de ces canaux)

C est une constante dont la valeur peut être calculée d'après les propriétés du gaz explosif ;

v_s étant exprimé en cm/s et $n y$ en cm^{-1} , la constante est numériquement égale à 0,95.

De ceci résulte que le coupe-flamme est d'autant plus efficace qu'il est abordé par une déflagration moins rapide, et il convient de l'installer dans une partie de conduite éloignée des coudes ; il est souvent avantageux d'utiliser un coupe-flamme de diamètre plus grand que celui de la canalisation à protéger en aménageant un raccordement conique (fig. 14).

Les coupe-flammes à ruban gaufré sont maintenant préférés à ceux qui sont constitués par des empilages de toiles métalliques, parce qu'ils sont plus robustes, plus efficaces pour arrêter les flammes de déflagration violentes et qu'ils n'imposent au débit gazeux qu'une perte de charge modérée.

4. Températures d'inflammation des mélanges gazeux explosifs.

4.1. Déclenchement thermique d'une explosion homogène.

La plupart des mélanges gazeux susceptibles d'exploser sont indéfiniment stables aux températures ordinaires ou peu élevées.

Si un de ces mélanges est chauffé progressivement ou s'il est introduit d'un seul coup dans une enceinte à température élevée il se produit une explosion homogène, qui entraîne une élévation de température et de la pression ainsi qu'une émission de flamme.

La température à laquelle se produit cette explosion dépend de la pression à laquelle se trouve le mélange et des caractéristiques du récipient, en particulier de sa forme, de ses dimensions et de la nature de ses parois.

On peut aussi en maintenant la température fixe et le mélange gazeux étant d'abord à une pression à laquelle il n'explose pas faire varier la pression et observer pour quelle valeur de celle-ci on observe l'explosion.

Ainsi, pour un mélange gazeux donné et pour un appareillage donné, on peut tracer une courbe (θ -p) qui sépare le domaine des explosions de celui où il n'y a pas explosion. La figure 15 donne cette courbe de température d'inflammation en fonction de la pression (θ température p pression). Un seul arc de courbe sépare le domaine de l'explosion de celui de la réaction lente. Un diagramme de cette espèce est celui que l'on obtient avec divers mélanges de gaz organiques avec l'air ou avec l'oxygène..

Mais on peut avoir un diagramme (fig. 16) sur lequel à une température déterminée on observe deux -et généralement même trois- passages du domaine de la réaction lente au domaine explosif ou inversement ; c'est le cas des mélanges avec l'oxygène, de l'hydrogène et du CO.

4.2. Températures d'inflammation obtenues par la méthode du pyromètre

Le principe de la méthode de MALLARD et LECHATELIER consistait (fig. 17) à faire pénétrer le mélange gazeux dans un récipient en porcelaine M dans lequel ils avaient fait le vide et qui était préalablement chauffé dans un four. Un récipient analogue N servait de thermomètre à air.

Pour chaque mélange gazeux, les expérimentateurs faisaient des expériences à diverses températures ce qui permettait d'encadrer la température au-dessus de laquelle on observait l'inflammation.