



(ID Modèle = 454913)

Ineris - 207093 - 2742676 - v2.0

28/02/2023

Events d'explosion

Document de synthèse relatif à une Barrière Technique de Sécurité (B.T.S.)

PRÉAMBULE

Le présent document a été réalisé au titre de la mission d'appui aux pouvoirs publics confiée à l'Ineris, en vertu des dispositions de l'article R131-36 du Code de l'environnement.

La responsabilité de l'Ineris ne peut pas être engagée, directement ou indirectement, du fait d'inexactitudes, d'omissions ou d'erreurs ou tous faits équivalents relatifs aux informations utilisées.

L'exactitude de ce document doit être appréciée en fonction des connaissances disponibles et objectives et, le cas échéant, de la réglementation en vigueur à la date d'établissement du document. Par conséquent, l'Ineris ne peut pas être tenu responsable en raison de l'évolution de ces éléments postérieurement à cette date. La mission ne comporte aucune obligation pour l'Ineris d'actualiser ce document après cette date.

Au vu de ses missions qui lui incombent, l'Ineris, n'est pas décideur. Les avis, recommandations, préconisations ou équivalents qui seraient proposés par l'Ineris dans le cadre des missions qui lui sont confiées, ont uniquement pour objectif de conseiller le décideur dans sa prise de décision. Par conséquent, la responsabilité de l'Ineris ne peut pas se substituer à celle du décideur qui est donc notamment seul responsable des interprétations qu'il pourrait réaliser sur la base de ce document. Tout destinataire du document utilisera les résultats qui y sont inclus intégralement ou sinon de manière objective. L'utilisation du document sous forme d'extraits ou de notes de synthèse s'effectuera également sous la seule et entière responsabilité de ce destinataire. Il en est de même pour toute autre modification qui y serait apportée. L'Ineris dégage également toute responsabilité pour chaque utilisation du document en dehors de l'objet de la mission.

Nom de la Direction en charge du rapport : DIRECTION INCENDIE DISPERSION EXPLOSION

Rédaction : GREGOIRE YANN - RODRIGUES MARTA

Vérification : LEPRETTE EMMANUEL; JOUBERT LAURIS; TARRISSE ALBIN

Approbation : Document approuvé le 28/02/2023 par PIQUETTE BERNARD

Table des matières

1	Fonction de sécurité assurée par un événement d'explosion	5
2	Objet de la fiche.....	6
3	Principales normes, directives et dispositions applicables aux événements d'explosion	8
4	Fonctionnement d'un événement d'explosion	9
4.1	Phénoménologie de l'explosion interne	9
4.2	Dimensionnement d'un événement d'explosion standard	11
4.3	Effets externes.....	12
4.4	Cas limite	13
5	Les technologies et fonctionnalités des événements d'explosion et leurs accessoires	15
5.1	Description générale du dispositif d'événement d'explosion	15
5.2	Événements d'explosion de type membrane à panneau de rupture	16
5.3	Dispositifs à panneau éjectable	16
5.4	Événements d'explosion de type « porte » ou « clapet »	17
5.4.1	Les portes d'explosion à contrepoids	17
5.4.2	Les portes d'explosion à ressort	17
5.4.3	Les dispositifs à tige déformable	17
5.5	Accessoires et instruments complémentaires	18
5.5.1	Canalisations de décharge	18
5.5.2	Déflecteurs.....	18
5.5.3	Protection contre les intempéries	19
5.5.4	Cas particulier des événements pare-flamme	19
6	Critères d'évaluation des performances	21
6.1	Efficacité en tant que barrière de sécurité	21
6.2	Dimensionnement de l'événement et notion d'efficacité ou rendement de l'événement d'explosion	21
6.3	Temps de réponse	22
6.4	Niveau de confiance	22
6.4.1	Choix et installation de l'événement	22
6.4.2	Maintenance	23
7	Liste de sources utilisées	24

Résumé

Ce document présente les informations relatives aux événements d'explosion qui représentent aujourd'hui la solution de mitigation des effets des explosions confinées la plus répandue dans l'industrie. Ces événements d'explosion sont essentiellement utilisés afin d'évacuer des gaz chauds d'une enceinte en vue de décharger la pression d'explosion et d'empêcher son éclatement. Des utilisations secondaires, par exemple pour ralentir la propagation de flammes sont également possibles mais ne sont pas décrites dans ce rapport car elles concernent une fonction de sécurité entièrement différente.

Les différentes technologies d'événements d'explosion sont d'abord présentées en expliquant leur principe de fonctionnement, leurs avantages et leurs limites d'utilisation. Des informations sur le dimensionnement et l'installation de ces équipements sont apportées afin de pouvoir juger de leur efficacité selon leurs conditions d'utilisation.

Ensuite, le document présente des modes de défaillance courants des événements ainsi que des notions de fiabilité afin de guider l'évaluation du niveau de confiance des dispositifs.

Enfin, des recommandations pour assurer le maintien des performances dans le temps sont présentées.

Pour citer ce document, utilisez le lien ci-après :

Institut national de l'environnement industriel et des risques, Evénements d'explosion - Document de synthèse relatif à une Barrière Technique de Sécurité (B.T.S.), Verneuil-en-Halatte : Ineris - 207093 - v2.0, 28/02/2023.

1 Fonction de sécurité assurée par un événement d'explosion

Un événement d'explosion est un dispositif monté sur une enceinte où peut survenir une explosion de gaz ou de poussière, et conçu pour décharger rapidement les gaz de combustion de l'explosion afin de limiter la pression d'explosion. Il est prévu pour s'ouvrir lorsque la pression interne dépasse une valeur seuil appelée pression statique d'ouverture (P_{stat}). La pression maximale atteinte dans l'enceinte après ouverture de l'événement est appelée pression réduite d'explosion (P_{red}). Elle doit être significativement plus petite que la pression maximale admissible par l'ensemble de la structure (pression d'éclatement de l'enceinte).

La fonction de sécurité d'un événement d'explosion consiste à éviter l'éclatement d'une enceinte (équipement ou local) en cas d'explosion de gaz ou de poussières survenant à l'intérieur. L'événement permet ainsi de maintenir l'intégrité de l'enceinte et d'éviter les projections.

Note : Un événement d'explosion peut assurer également une protection contre les surpressions internes dues par exemple au dysfonctionnement d'autres appareils. Il peut également servir de protection contre les risques de mise sous vide accidentelles.



Figure 1 : Exemples d'événements d'explosion installés sur un filtre (à gauche), ou un élévateur (à droite)

Les événements peuvent assurer un rôle secondaire de découplage des explosions lorsqu'ils sont placés sur des canalisations. Ce cas n'est pas traité dans le présent rapport car la barrière ainsi formée réalise une fonction de sécurité différente de celle des événements installés sur des enceintes, dont l'objectif est de limiter la surpression d'explosion.

2 Objet de la fiche

Cette fiche présente des éléments de synthèse relatifs à l'évaluation des performances des événements d'explosion.

L'arrêté du 29 septembre 2005 (dit arrêté PCIG) précise qu'il est nécessaire que les études de danger examinent les performances des mesures de maîtrise des risques et qu'une justification soit fournie. L'article 4 de cet arrêté dispose que « *pour être prises en compte dans l'évaluation de la probabilité, les mesures de maîtrise des risques doivent être efficaces, avoir une cinétique de mise en œuvre en adéquation avec celle des événements à maîtriser, être testées et maintenues de façon à garantir la pérennité du positionnement précité.* »

Dans cette optique, la méthode de définition et d'évaluation des mesures de maîtrise des risques (plus généralement appelées barrières de sécurité) doit être explicitée en s'appuyant sur les critères définis à l'article 4 de l'arrêté précité. Pour cela, l'Ineris a développé des méthodes génériques d'évaluation des barrières techniques (Ω 10 [1]) et humaines (Ω 20 [2]) de sécurité.

La typologie des barrières techniques de sécurité présentées dans le rapport Ω 10 [1] est reprise dans la figure ci-dessous :

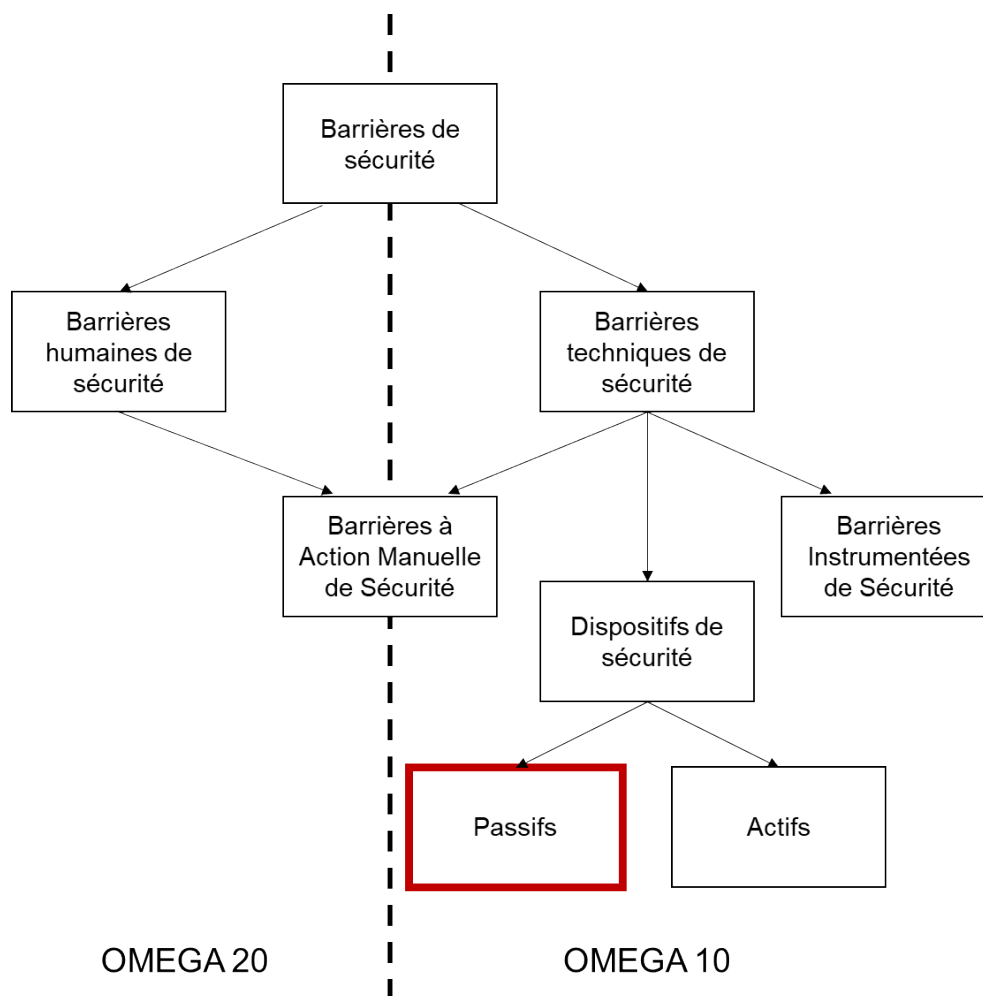


Figure 2 : Typologie des Barrières Techniques de Sécurité, Ω 10 [1]

Dans l'approche de l' Ω 10, on définit les barrières de sécurité comme l'ensemble des éléments techniques et humains nécessaires à la réalisation d'une fonction de sécurité.

En général, un événement d'explosion correspond à un dispositif passif. Un dispositif passif est défini comme une barrière ne mettant en jeu aucun système mécanique pour remplir sa fonction et ne nécessitant ni action humaine (hors intervention de type maintenance), ni action d'une mesure technique, ni source d'énergie externe pour remplir sa fonction.

Certains événements sont toutefois considérés comme des dispositifs actifs. C'est le cas par exemple des événements à clapet refermables, car ils mettent en jeu des dispositifs mécaniques tels que des ressorts, leviers ou vérins pour remplir leur fonction de sécurité.

L'évaluation des dispositifs passifs et actifs repose globalement sur les mêmes principes : vérification que le fonctionnement du dispositif n'est pas affecté par la phase accidentelle (indépendance), évaluation de l'efficacité dans un contexte d'utilisation et pour une durée de fonctionnement donnée, évaluation du temps de réponse (critère généralement non pertinent pour un dispositif passif) et évaluation du Niveau de Confiance (NC).

Le présent document donne les éléments essentiels sur les événements d'explosion, notamment :

- Les normes applicables pour leur conception, dimensionnement et qualification au chapitre 3 ;
- Les principes de fonctionnement général au chapitre 4 ;
- Les différentes technologies et leurs constituants au chapitre 5 ;
- La vérification du respect des critères de performance tels qu'ils sont définis par la méthode $\Omega 10$ [1] en termes d'efficacité, de temps de réponse et de niveau de confiance au chapitre 6.

3 Principales normes, directives et dispositions applicables aux événements d'explosion

Les événements d'explosion sont des dispositifs de protection contre l'explosion qui doivent être certifiés conformes à la Directive 2014/34/UE . Cette certification requiert impérativement la réalisation d'essais d'explosion sur un certain nombre d'événements. Ainsi, il existe en Europe :

- Une norme harmonisée dédiée à la conception et l'essai de ces dispositifs :
 - NF EN 14797 (avril 2007) : Dispositifs de décharge d'explosion. Ce document inclut les exigences relatives à la fabrication, à l'inspection, aux essais, au marquage, à la documentation et à l'emballage.
- Deux normes harmonisées qui concernent leur dimensionnement et conditions d'installation dans un procédé industriel. Outre le dimensionnement pour limiter la surpression interne, ces deux normes incluent des indications sur les effets de la flamme et de la pression à l'extérieur de l'enceinte protégée, les forces de recul, ou encore l'influence des canalisations de décharge :
 - Pour les gaz, la norme NF EN 14994 (avril 2007) : Systèmes de protection par événement contre les explosions de gaz.
 - Pour les poussières, la norme NF EN 14491 (novembre 2012) : Systèmes de protection par événement contre les explosions de poussières.
- Une norme harmonisée qui concerne les dispositifs de décharge d'explosion pare-flamme et les limites spécifiques qui leur sont associées :
 - NF EN 16009 (septembre 2011) : Dispositifs de décharge d'explosion sans flamme.

A l'écriture du présent document, en 2022, les normes NF EN 14994 (avril 2007) sur la décharge des explosions de gaz et NF EN 16009 (septembre 2011) sur les dispositifs de décharge d'explosion sans flamme, sont en cours de révision. Par ailleurs, la norme internationale IEC/ISO 80079-50 « Explosion venting devices » est en cours d'élaboration.

Une large partie des recommandations des normes Européennes sur la protection par événement contre les explosions de poussières est issue de la norme Allemande VDI 3673 de 2002. Aux Etats-Unis d'Amérique, le document de référence pour la mise en œuvre des événements d'explosion est le guide NFPA68 dont l'édition la plus récente, en 2022, est celle de l'année 2018.

Ces normes permettent, en particulier pour une application industrielle donnée, de sélectionner et dimensionner une solution technique de protection par événement d'explosion, en calculant une surface minimale d'événement requise pour protéger une enceinte. Des indications sont également données pour estimer l'amplitude des effets externes ou autres conséquences sur la structure (ex : les forces de recul).

Toutefois, il existe un certain nombre de cas limites sur le fonctionnement des événements auxquelles les normes actuelles ne peuvent pas répondre. Ces sujets font partie de la recherche en cours sur ces dispositifs. La liste est non exhaustive mais peut regrouper :

- Le dimensionnement d'événements dans les procédés en nette surpression en fonctionnement normal ou si des parties de l'installation sont spécifiquement conçues pour monter en pression (broyeurs notamment), ce qui peut générer des effets pistons importants, ou si l'atmosphère explosive est très turbulente.
- Le dimensionnement d'événement pare-flamme lorsque l'atmosphère explosive de poussières est mal connue en termes de concentration, granulométrie, etc.
- Le dimensionnement de plusieurs événements pare-flamme sur une même enceinte.
- Les procédés nécessitant plusieurs événements ou déviateurs d'explosion pour une protection suffisante (par exemple : boucles de broyage/transport/filtration, transports longs et complexes).

4 Fonctionnement d'un événement d'explosion

4.1 Phénoménologie de l'explosion interne

La situation de référence dans un procédé industriel est celle d'une enceinte totalement ou partiellement confinée, équipée d'un ou plusieurs événements d'explosion et dans laquelle une atmosphère explosive (ATEX) est présente. Cette ATEX peut être de différentes natures : gaz combustible – oxydant, suspension de poussières dans l'air, mélange hybride¹, etc. Elle suppose une combustion suffisamment rapide pour pouvoir être qualifiée d'explosion plutôt que d'incendie. On suppose le mélange enflammé en un point quelconque de l'enceinte.

De manière très simplifiée, la flamme peut être assimilée à une surface qui croît dans l'enceinte, transformant des réactifs froids en produits chauds. On assimile généralement les réactifs ou produits brûlés à des gaz parfaits suivant l'équation d'état bien connue :

$$P.V = n.R.T$$

Avec P la pression dans l'enceinte, V son volume, n la quantité de matière, T la température du gaz et R une constante thermodynamique. Au cours de la transformation, la température passe d'environ 300 K à 2000-3500 K, suivant la nature du mélange explosif. Dans une enceinte totalement confinée, le volume V ne change pas et c'est la pression qui augmente, d'un facteur équivalent au rapport des températures. Ainsi, dans une enceinte entièrement confinée et résistante à la pression, il est tout à fait possible d'atteindre des surpressions de l'ordre de 7 à 12 bar, même avec des mélanges explosifs considérés comme peu réactifs. On suppose ici une ATEX dans des conditions optimales de remplissage, de distribution dans le volume et de réactivité (par exemple proche de la stœchiométrie pour les gaz, ou vers 500-1000 g/m³ pour les poussières dans l'air).

Remarque : d'autres régimes d'explosion sont possibles, notamment lorsque des flammes se propagent à grande vitesse, proche ou au-delà de la vitesse du son dans le milieu. On parle alors de détonation. Les événements d'explosion ne sont pas prévus pour faire face à cette situation.

Ce type de situation peut apparaître avec des mélanges très réactifs, notamment certains gaz (susceptibles de détoner), ou dans des conditions d'amorçage très fortes de l'explosion (par exemple une inflammation à l'explosif), ou dans des canalisations (ou les flammes s'accélèrent naturellement).

Le principe des événements d'explosion est toujours le même : il s'agit de permettre à une partie des gaz de se détendre dans un volume plus grand, externe, et limiter la hausse de pression. Si le principe fondamental semble simple, sa phénoménologie est complexe. En effet, le dimensionnement d'un événement d'explosion est tel que l'excédent de gaz produit par la combustion puisse être déchargé vers l'extérieur de manière à ce que la surpression interne reste en deçà de la pression maximale admissible par la structure².

Il existe une compétition entre la production de gaz brûlés par la flamme et l'évacuation de gaz frais et brûlés par l'événement. La surface et la vitesse de flamme déterminent le taux de production des gaz brûlés, mais ces dernières, si elles sont dépendantes des conditions initiales d'amorçage et de réactivité du nuage, sont également fortement influencées par leur environnement : la géométrie de l'enceinte ou la turbulence des gaz, entre autres.

Un schéma de principe de la décharge d'explosion par un événement est présenté dans la Figure 3 :

¹ Mélange constitué d'un gaz ou une vapeur inflammable, d'une poussière inflammable et d'air.

² La notion de pression maximale admissible par l'enceinte masque en réalité un phénomène relativement complexe. En effet, la résistance des équipements industriels est évaluée vis-à-vis de chargements statiques, tandis que le chargement induit par l'explosion est un chargement dynamique. De fait suivant la sollicitation et les modes de vibration de la structure, un écart d'un facteur de 0.5 à 2 existe entre la pression de résistance statique de la structure et sa résistance à cette sollicitation dynamique particulière. En pratique, l'évaluation de cette pression de résistance dynamique est relativement imprécise, si bien qu'on s'intéresse à des ordres de grandeurs permettant de déterminer un seuil minimum qu'on souhaite ne pas atteindre en plaçant un événement.

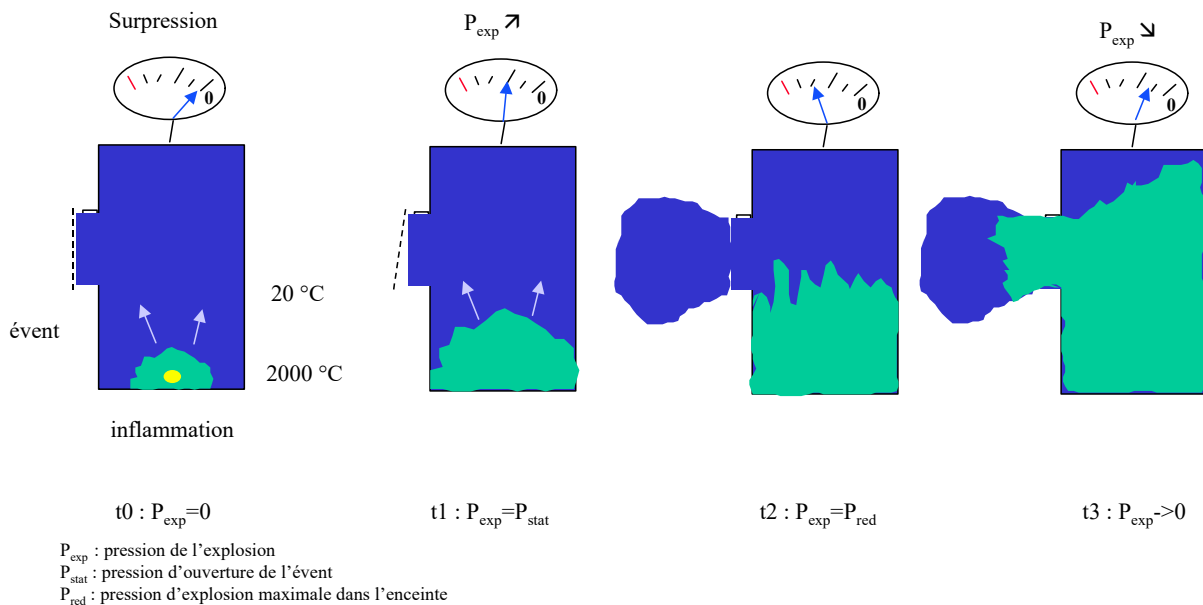


Figure 3 : Principe de fonctionnement d'un événement

La séquence présentée en Figure 3, schématise l'explosion d'une ATEX occupant tout le volume d'une enceinte équipée d'un événement. Dans un premier temps, à $t = t_0$, la flamme se développe en transformant les réactifs « froids », à 20 °C en produits chauds – de température de l'ordre de 2000°C dans cet exemple. A volume constant, l'équation d'état des gaz parfaits présentée au début du paragraphe implique que la pression va suivre la hausse de température.

Arrivé à $t = t_1$, au seuil d'ouverture de l'évent, à la pression P_{stat} , l'évent s'ouvre. Le délai d'ouverture de l'évent est fonction de la pression dans l'enceinte mais aussi de sa propre inertie. La création d'une ouverture sur l'enceinte qui subit l'explosion fait apparaître un gradient de pression entre l'intérieur et l'extérieur qui implique une accélération de l'écoulement. Cette accélération concerne aussi la flamme dont la surface grandit, ce qui a pour conséquence la production d'une plus grande quantité de gaz brûlés à chaque instant.

Par ailleurs, la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur de l'enceinte impose un certain débit massique d'évacuation des gaz. Les gaz brûlés étant beaucoup moins denses que les gaz frais, pour une même différence de pression entre l'enceinte et l'extérieur, on éjecte beaucoup plus de volume de gaz brûlés que frais. Physiquement cela implique que la vitesse de montée en pression ralentit une fois que la flamme a atteint l'évent. Plus l'explosion démarre près de l'ouverture et moins les effets de pression seront importants.

Ce qui se passe hors de l'enceinte peut également avoir un effet sur l'explosion interne. En effet, la vitesse d'évacuation des gaz dépend de la vitesse de libération de la surface de décharge, qui peut être limitée par le délai d'ouverture de l'évent, s'il a une inertie non négligeable ou par un encombrement externe générant une contre pression, tel qu'un carneau.

Aussi tant que la flamme ne sort pas de l'enceinte, jusqu'à $t = t_2$ dans la Figure 3, c'est d'abord un mélange combustible qui est éjecté par l'évent ouvert. Un nuage inflammable peut être formé puis s'enflammer devant l'évent au moment de la sortie de la flamme, au temps $t = t_3$ dans l'exemple ci-dessus. On parle alors d'explosion secondaire ou externe, susceptible de générer une contre-pression, limitant l'évacuation des gaz, voire intensifiant la combustion dans l'enceinte.

Enfin dans l'enceinte, la surpression est suivie d'une dépression suite à l'écoulement des gaz ou leur refroidissement, qui dans le cas d'un événement standard, non refermable, s'étale sur une courte durée (typiquement de moins de 1 s pour les plus gros équipements, moins pour les plus petits). Toutefois lorsqu'un événement refermable est mis en place, il faut vérifier que l'enceinte pourra résister au vide consécutif au refroidissement des gaz si celle-ci est de nouveau étanche aux gaz.

Pour aller plus loin sur la physique des explosions confinées, on recommande de consulter le rapport Oméga 31 [3].

4.2 Dimensionnement d'un événement d'explosion standard

La Figure 4 montre la courbe comparative « Pression/Temps » d'une déflagration dans une enceinte équipée ou non d'un événement, c'est-à-dire respectivement pour une explosion évacuée ou contenue.

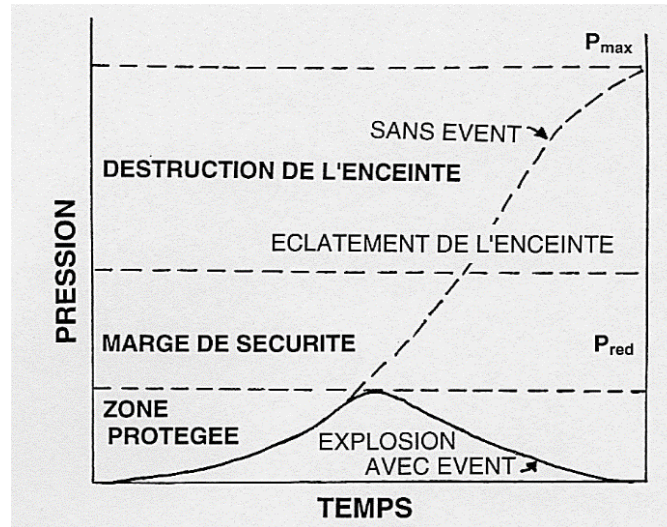


Figure 4 : Représentation graphique d'une explosion avec ou sans événement

Dimensionner un événement consiste à calculer une surface d'ouverture minimale nécessaire pour limiter la surpression en cas d'explosion au niveau « P_{red} » (Pression réduite d'explosion) de la Figure 4. Le niveau « P_{max} » (Pression maximale d'explosion) correspond à la surpression atteinte dans une enceinte ne contenant aucune ouverture.

Les formules de dimensionnement d'événements d'explosion standard font appel aux variables suivantes :

- Le volume de l'enceinte : plus il est petit et plus la surpression augmentera rapidement.
- La longueur maximale de flamme : plus elle est grande et plus la surpression d'explosion augmente.
- Un rapport de longueur sur diamètre de l'enceinte¹ qui caractérise la déformation de la flamme (et donc l'augmentation du taux de production des gaz brûlés) dans les enceintes allongées.
- Deux paramètres sur la réactivité de l'ATEX : la vitesse de montée en pression, exprimée par le paramètre K_G (pour les gaz) ou K_{ST} (pour les poussières) et la surpression maximale d'explosion P_{max} qui quantifie indirectement la température des gaz brûlés. Plus ces paramètres sont élevés et plus on s'attendra à des effets violents (sauf cas particuliers explicités plus loin).
- La pression statique d'ouverture de l'événement « P_{stat} ».
- La valeur de « P_{red} » choisie pour garantir la tenue de l'enceinte. Cette valeur doit être inférieure à la pression maximale admissible par l'enceinte.

Dans tous les cas, il s'agit de dimensionner un système de sécurité, donc les normes se placent sous les hypothèses majorantes d'une ATEX occupant tout le volume, avec une réactivité égale au maximum mesuré dans les conditions de référence de mesure de K_G/K_{ST} et P_{max} , et pour des explosions démarrant le plus loin possible des événements d'explosions.

Lors de leur fabrication les événements sont contrôlés : une partie de la production est testée à la pression en régime statique. Les événements sont placés sur une enceinte étanche dans laquelle on augmente progressivement la pression. Les événements doivent dans ces conditions s'ouvrir à la pression P_{stat} spécifiée par le fabricant, avec une marge de tolérance en général de l'ordre de 15 %, spécifiée sur le panneau certifié, à côté de la valeur de P_{stat} .

¹ Les normes précisent la manière de calculer le rapport L/D d'une enceinte. La dimension L correspond à la plus grande longueur de parcours entre la flamme et l'événement, ce n'est donc pas toujours la longueur physique de l'enceinte.

En régime dynamique, en présence d'une explosion, il n'est pas anormal d'observer un écart jusqu'à 50 % entre la pression effective d'ouverture et la valeur de P_{stat} . En tout état de cause une valeur de P_{stat} plus petite doit conduire à une pression effective d'ouverture plus basse et donc une décharge plus anticipée des gaz. Dans ce cas, à taille d'évent équivalente, cela doit entraîner une réduction de la surpression réduite d'explosion P_{red} .

On peut ajouter que cette surpression réduite d'explosion détermine la vitesse maximale de décharge des gaz. Plus elle est élevée, plus les gaz sont déchargés rapidement et moins la surface d'évent nécessaire sera grande. Il existe bien sûr une limite : pour des pressions de l'ordre de 2 bar, on sort du régime sonique et on observe un écoulement choqué, dont la vitesse ne dépend plus de la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur. Cette vitesse d'éjection est limitée par la pression interne et est plus lente que si on suivait le modèle sonique au-delà de sa limite de validité.

En conséquence, les hypothèses retenues pour les formules de dimensionnement des événements ne sont plus adéquates car elles pourraient minorer la surface d'évent. Cela explique pourquoi les formules retenues dans les normes Européennes ou dans le guide Américain NFPA sont mentionnées comme n'étant pas applicables au-delà de $P_{red} = 2$ bar.

Remarque : si un événement est surdimensionné, la fonction de sécurité reste assurée. L'événement n'a pas d'effet sur la résistance de l'enceinte. Néanmoins les plus grands événements imposent souvent des coûts plus importants et parfois aussi des contraintes plus grandes en termes d'effets externes (hors de l'enceinte). En effet un événement plus grand permettra de réduire davantage la surpression interne d'explosion mais conduit à l'éjection d'une plus grande quantité de gaz à l'extérieur.

4.3 Effets externes

Les événements d'explosion reposent sur l'éjection de gaz en combustion hors d'une enceinte. De fait, des effets externes de différentes natures sont attendus :

- Des effets thermiques, principalement par une exposition directe à la flamme : les formules des normes lient directement la longueur de flamme devant un événement au volume de l'enceinte :

$$L_f = 10 \cdot V^{1/3}$$

Pour donner un ordre de grandeur : cela peut impliquer des flammes à plus de 20 m d'un équipement industriel (tel qu'un filtre, un broyeur, ...) de 10 m³. Une illustration est donnée dans la Figure 5, qui présente des images issues d'un essai d'évent standard soumis à une explosion de poussières. Dans cet essai la longueur de flamme est de 15 m.



Figure 5 : Images de la décharge d'une explosion de poussières d'amidon de maïs par un événement d'explosion standard. La cuve est de volume 10 m³ et l'événement de dimensions 1,1 x 1,1 m (400 ms entre les images).

- Des effets de pression externe suivant 2 mécanismes différents, qui se superposent :
 - La détente des gaz comprimés hors de l'enceinte,

- La possible explosion d'une partie des réactifs évacués par l'événement hors de l'enceinte, qui peut à la manière d'une source acoustique, générer des ondes de pression de grande amplitude. Une illustration est proposée dans la Figure 6, où on voit une boule de feu externe plus grande que le confinement initial et se développant sur une période de quelques dizaines de ms tout au plus. Ce mouvement brutal des gaz hors de l'enceinte est également la source d'ondes de pression dans l'air.

A plus grande distance les effets de l'onde sonore sont également susceptibles de présenter un danger de sécurité pour les personnes. Toutefois encore peu de travaux ont été publiés sur ce sujet.

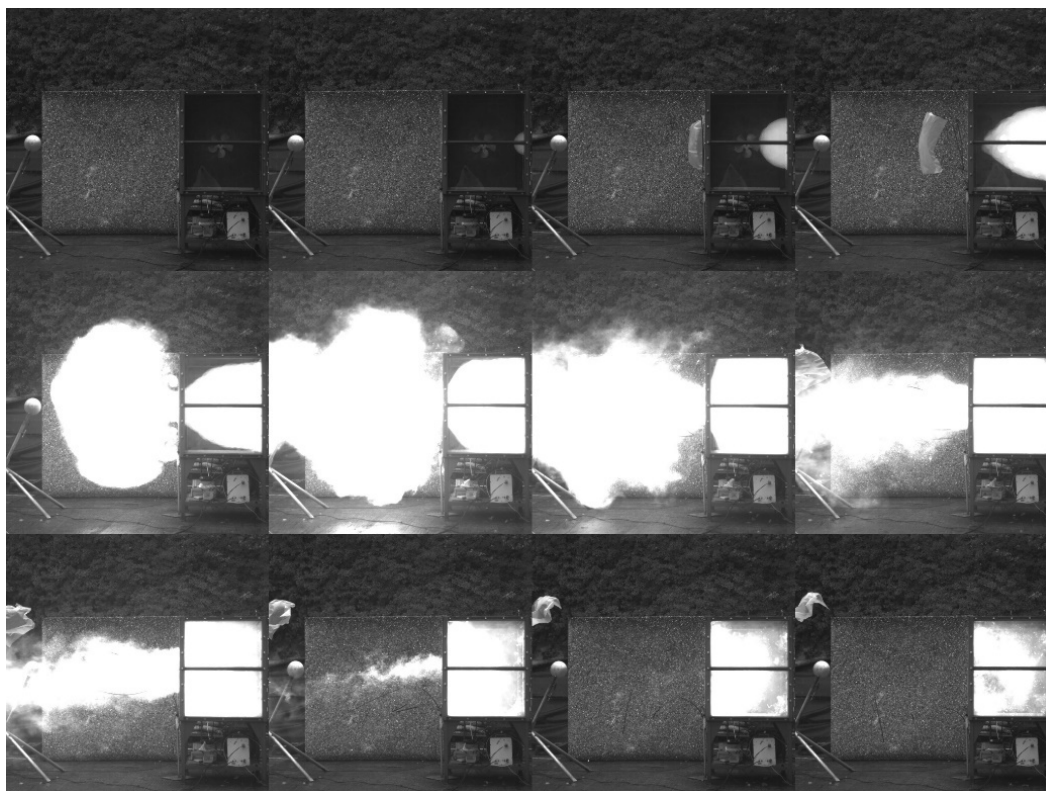


Figure 6 : Explosion confinée de gaz méthane dans une enceinte de 1 m³ équipée d'une surface soufflable puis explosion secondaire devant l'ouverture (25 ms entre les images)

- Des effets mécaniques sur la structure : un peu à la manière d'une fusée, l'éjection rapide d'une grande quantité de gaz par un orifice génère une force de recul sur l'enceinte.
- Lorsque le système est utilisé dans de mauvaises conditions : des effets toxiques. Les fumées de combustion doivent être évacuées rapidement. Lorsque l'enceinte fonctionne avec des matières toxiques pouvant générer des ATEX, on privilégie d'autres solutions de mitigation telles que la suppression d'explosion.

4.4 Cas limite

Toutes ces assertions reposent sur l'hypothèse qu'on peut considérer une valeur unique de pression dans l'enceinte au cours de l'explosion. Pour les enceintes allongées telles que des canalisations, mais aussi des ascenseurs ou des convoyeurs industriels, cette hypothèse de départ peut ne plus être valable. Les formules de dimensionnement d'événement affichées dans les normes sont en général valables pour des rapports de longueur sur diamètre de l'enceinte (rapport L/D) de 20 ou moins (cas par exemple de la norme sur les explosions de poussières).

En pratique, les canalisations sont en général très résistantes aux effets de pression si bien que les événements qui les équipent ont plus souvent vocation à ralentir la flamme (et protéger les équipements connexes aux canalisations concernées) que limiter les effets de pression. Ce n'est pas le cas des ascenseurs ou convoyeurs mais dans ce cas leur résistance est régulièrement, au mieux, de 500 mbar.

Or les formules de la norme pour le dimensionnement des événements face aux explosions de poussières incluent une fonction de correction de la surface d'événement pour prendre en compte le rapport L/D. Ainsi, au-delà d'un rapport L/D de 5, jusqu'à 20 et pour des surpressions inférieures à 500 mbar, la norme indique qu'il faut augmenter la surface d'événement de 150 à 700 %, ce qui rend l'application de cette solution rapidement prohibitive.

Si on s'intéresse aux explosions de gaz dans les enceintes allongées (donc a priori à des enceintes autres que des élévateurs ou convoyeurs), la norme EN14994 (en révision en 2022) propose également des corrections de calcul de surface d'événement. Encore une fois des limites relativement contraignantes sont fixées : il ne doit y avoir que des gaz au repos, de réactivité proche de celle du méthane ou propane, dans une enceinte pratiquement sans élément favorisant la turbulence (absence d'obstacles), aucun coude ni changement de section.

Les surfaces d'événement déterminées par les formules des normes sont de manière générale inapplicables si l'explosion se propage d'une enceinte à une autre par une canalisation qui les relie. En l'absence de système de découplage, ou d'isolation, une turbulence accrue, une accumulation de pression et une inflammation par un jet de flamme étendu dans l'enceinte en aval peuvent donner lieu à des explosions de plus grande violence, qui entraîneront des répercussions sur l'enceinte en amont.

Dans la plupart des situations, des dispositions doivent donc être prises pour le découplage de l'explosion dans la canalisation de liaison. On notera malgré tout que les systèmes de découplage ou isolation, ont eux aussi un effet sur l'explosion qui peut parfois conduire à des surpressions augmentées dans les enceintes connectées.

La norme sur les événements contre les explosions de poussière (EN14491) identifie quelques cas limites d'utilisation sans système d'isolation, qui reviennent à augmenter les surfaces d'événement, mais leur champ d'application est limité. Pour le cas des gaz la norme EN14994 stipule explicitement qu'il faut avoir recours à d'autres solutions (comme l'isolation) car aucune formule de dimensionnement n'est disponible.

5 Les technologies et fonctionnalités des événements d'explosion et leurs accessoires

5.1 Description générale du dispositif d'événement d'explosion

La protection d'un volume par des événements ou des surfaces soufflables consiste en l'aménagement, sur les parois de ce volume, de surfaces plus fragiles que la structure du volume. En cas d'explosion, ces surfaces se rompent prioritairement sous l'effet de la surpression, permettant à celle-ci de s'évacuer vers l'extérieur et évitant ainsi la destruction du volume.

On distingue les événements, qui sont l'objet du présent document, des surfaces soufflables :

- Les événements sont des surfaces normalisées, de pression de rupture en cas d'explosion connue (le matériau et la surface de l'événement sont fixés par le constructeur, selon des normes de dimensionnement et des normes de construction, pour conduire à une certaine pression de rupture ; ce type de surface est souvent rencontrée sur les filtres à poussières par exemple). L'événement doit rester solidaire des parois sur lesquelles il est attaché et ne pas se fragmenter.
- Les surfaces soufflables (essentiellement utilisées pour la protection de bâtiments) peuvent être des éléments du volume plus fragiles que la structure de celui-ci et de pression de rupture relativement faible (vitres, bardages...). Ces surfaces ne sont pas solidaires des parois et leur rupture engendre des projections.

Il existe aujourd'hui de nombreux types de systèmes d'événement, les plus courants sont les « membranes » (cf. Figure 7) qui se déchirent selon un schéma prédéfini afin d'éviter la fragmentation.



Figure 7 : Photographies d'un événement d'explosion standard de 1,1 x 1,1 m sur une cuve de 10 m³, avant et après une explosion confinée de poussières

Il existe également des événements de type « portes » (ou « clapets ») qui peuvent se refermer après la décharge. Ils doivent être considérés comme des dispositifs actifs, contrairement à l'exemple précédent qui est un système passif.



Figure 8 : Clapet de décharge refermable

La pression nominale d'ouverture (ou pression statique P_{stat}) est le plus souvent de 50 ou 100 mbar, on en trouve également sur la plage de 35 mbar à 700 mbar.

Il existe de nombreuses variations dans leur conception, dont on peut citer ceux qui sont conçus spécialement pour résister à une température élevée, aux dépressions ou aux variations de pression interne.

Selon leur technologie, les événements pourront être partiellement ou totalement réutilisables ou être conçus pour une seule utilisation.

L'événement est fixé sur la paroi d'une enceinte, c'est un dispositif passif ou actif (cf. chapitre 2) selon la technologie retenue (sans ou avec dispositif actif de détection d'explosion et déclenchement de l'ouverture). Il s'ouvre en restant solidaire de l'enceinte quand l'explosion survient. Une fois ouvert, le panneau ne peut pas être refermé et constitue donc l'élément non réutilisable du dispositif.

5.2 Événements d'explosion de type membrane à panneau de rupture

Les événements d'explosion de type membrane à panneau de rupture consistent en des panneaux ou disques de rupture avec des zones prédécoupées ou des joints, le plus souvent fabriqués en acier inoxydable ou en aluminium avec une membrane d'étanchéité (en PTFE par exemple) conçus pour rompre à une pression bien définie. Ils peuvent être plats, bombés, cintrés, de forme circulaire ou rectangulaire. L'intérêt de la forme bombée est souvent d'offrir une résistance à la dépression. Le panneau peut être fait d'un matériau monocouche ou multicouches, complètes ou partielles, et est étanche au gaz tant que la surpression interne reste inférieure à sa pression de rupture. Il est conçu pour s'ouvrir à une pression prédéterminée afin de dégager, après ouverture, une surface d'événement spécifiée. Il s'agit de dispositifs passifs.

5.3 Dispositifs à panneau éjectable

Les dispositifs à panneau éjectable comprennent des panneaux d'événement semi-rigides fixés au niveau de leurs bords. Ils sont conçus pour se déformer lorsqu'ils sont soumis à une surpression sur leur face côté procédé et pour se détacher de leur joint de fixation. En cas d'utilisation d'un joint en plastique ou en caoutchouc souple, la pression d'ouverture dépendra de la taille du panneau et des propriétés du joint.

Selon une conception différente, un châssis métallique rigide est utilisé pour fixer les bords du panneau, généralement en combinaison avec une bande d'étanchéité souple. La pression de fixation et la largeur du bord de panneau maintenue par la fixation affectent la pression d'ouverture.

Les dispositifs à panneau éjectable seront équipés d'un système de retenue (par exemple une chaîne) pour éviter leur projection dans le voisinage de l'installation... Ces dispositifs sont également considérés comme passifs.

5.4 Événements d'explosion de type « porte » ou « clapet »

Les événements d'explosion de type « porte » ou « clapet » peuvent être fermés par des dispositifs mobiles autour d'un axe.

Certains événements d'explosion sont munis d'un clapet casse-vide permettant d'éviter la mise en dépression de l'enceinte protégée.

Tous ces dispositifs doivent être considérés comme actifs, car leur fonctionnement repose sur un mécanisme distinct de la surface éventable.

5.4.1 Les portes d'explosion à contrepoids

Les portes d'explosion à contrepoids utilisent comme élément de décharge un couvercle à charnière qui, dans les conditions normales du procédé, couvre l'orifice d'évent. En général, après la décharge et sous l'effet de la gravité, le couvercle à charnières referme l'orifice d'évent en retombant dans sa position initiale. Il convient que le couvercle soit installé dans ou sur un support de manière à éviter les défauts d'étanchéité. Le support est utilisé pour fixer la porte d'explosion à contrepoids sur l'orifice d'évent de l'enceinte protégée.

Le couvercle peut être maintenu en place par un ou plusieurs éléments de retenue et il est conçu pour s'ouvrir à une pression définie à l'avance afin de fournir une surface d'évent spécifiée lorsqu'il est ouvert.

Les portes d'explosion sont conçues pour être réutilisées après une explosion. La désintégration ou la déformation d'éléments de retenue nuit cependant à la bonne étanchéité des éléments de décharge réutilisables. Certains types d'éléments de retenue peuvent être réutilisés, d'autres peuvent nécessiter un remplacement.

L'orientation d'une porte d'explosion à contrepoids est cruciale pour son bon fonctionnement.

5.4.2 Les portes d'explosion à ressort

Les portes d'explosion à ressort sont des dispositifs qui permettent de décharger la pression d'explosion et qui se referment automatiquement après l'explosion.

La montée en pression due à l'explosion soulève le couvercle du dispositif de décharge et le place dans une position où il n'empêche plus le processus de décharge.

Le couvercle se referme après l'explosion sous l'effet d'un dispositif à ressort.

Le dispositif à ressort, conçu pour refermer le couvercle automatiquement après la décharge, permet également de maintenir le couvercle dans sa position de fermeture dans les conditions de déroulement normal du procédé. De même, il maintient le couvercle fermé en cas de fluctuations de la pression, tant que la valeur préréglée de la pression statique d'ouverture n'est pas dépassée. Enfin, le fait de refermer l'ouverture permet de ne pas activer un éventuel incendie.

Les portes d'explosion à ressort peuvent être montées dans n'importe quelle orientation.

5.4.3 Les dispositifs à tige déformable

Les dispositifs à tige déformable sont en principe constitués par trois éléments principaux : une structure de support, un élément de décharge et une tige déformable. La structure de support retient les deux autres éléments, assurant une fermeture étanche efficace de l'élément de décharge et jouant le rôle de butée de la tige déformable. L'élément de décharge est généralement libre de se déplacer selon un axe lorsqu'il n'est pas maintenu par une tige déformable, tandis qu'il est maintenu par l'élément de support et ne peut pas se déplacer selon les deux autres axes. La tige déformable fixe l'élément de décharge en place jusqu'à ce que la pression prescrite soit atteinte ; à cet instant, l'élément de décharge se déplace, dégageant l'orifice d'évent dans la structure de support. La tige déformable qui est généralement mince (rapport longueur sur diamètre élevé) est l'élément « contraint » qui est conçu pour se déformer sous une force déterminée. La force est transmise à la tige déformable par la pression d'explosion qui s'exerce sur l'élément de décharge. Une fois déformée, la tige déformable doit être retirée, puis remplacée (élément non réutilisable), après remise en place de l'élément de décharge. La pression d'ouverture du dispositif à tige déformable dépend donc de l'aire de l'élément de décharge, ainsi que de la géométrie et des propriétés du matériau de la tige déformable.

5.5 Accessoires et instruments complémentaires

5.5.1 Canalisations de décharge

Dans certaines situations, l'enceinte protégée par évent est dans un bâtiment et il est souhaitable de canaliser les effets externes de l'explosion vers l'extérieur du bâtiment. Cette fonction est réalisée par la mise en œuvre de canalisations de décharge, ou carneaux, qui consistent en une pièce tubulaire de section au moins équivalente à celle de l'évent.

Toutefois, si l'évent d'explosion est activé et qu'il y a une canalisation de décharge en aval de l'évent, celle-ci peut être remplie d'un mélange explosif avant que la flamme ne sorte de l'enceinte protégée. La combustion se transmettra alors dans la canalisation de décharge, ce qui à son tour, réduira l'efficacité de l'évent. En conséquence, la pression maximale réduite d'explosion augmentera à l'intérieur de l'enceinte en même temps que la longueur de la canalisation de décharge.

Sur l'influence des canalisations de décharge dans le fonctionnement des événements d'explosion, pour les explosions de poussière, on pourra se référer aux documents suivants :

- Roux P., Proust C. (2003), Méthodes de protection contre les explosions : événements, Rapport INERIS DRA-Pro-CPr-0225313.
- Grégoire Y., Proust C., Leprette E., Dust explosion development in a vessel-duct arrangement. 10. International symposium on hazards, prevention, and mitigation of industrial explosions (X ISHPMIE), Jun 2014, Bergen, Norway. Pp.1539-1556. ffineris-01862426.

Sur les explosions secondaires, en plus du rapport Oméga 31 [3], les travaux suivants présentent des avancées récentes :

- Proust, C. and Leprette, E., 2010, The dynamics of vented gas explosions, Process Safety Progress, vol. 29, 3, 2010, pp. 231–235.
- Daubech J., Proust C., Jamois D., Leprette E., 2011, Dynamics of vented hydrogen-air deflagrations, Proceedings of the 4th International Conference on Hydrogen Safety (ICHHS), Sep 2011, San Francisco, United States. ineris-00973626f, <https://hal-ineris.archivesouvertes.fr/ineris-00973626/document>.
- Daubech J., Proust C. and Lecocq G., 2016, Propagation of a confined explosion to an external cloud, 11th International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions, Dalian, China.

5.5.2 Déflecteurs

Dans d'autres cas, il est nécessaire de dévier les flammes hors de l'évent, par exemple pour éviter l'impact dans une structure sensible. Dans ce cas on peut mettre en place des déflecteurs d'explosion. Il s'agit d'une pièce qui réduit l'ouverture de l'évent et canalise les flammes dans une direction choisie. Toutefois, comme on réduit l'ouverture de l'évent, on diminue son efficacité et une surface plus grande doit être prévue si on souhaite conserver la même valeur de P_{red} dans l'enceinte.



Figure 9 : Illustration de l'effet d'un déflecteur posé sur un événement d'explosion standard : à gauche événement sans déflecteur, à droite événement avec déflecteur, dans des conditions expérimentales identiques

5.5.3 Protection contre les intempéries

Les événements montés en extérieur, notamment lorsqu'ils sont en position horizontale, sont généralement protégés par un dispositif de protection contre les intempéries. Ce dispositif est susceptible d'affecter l'efficacité de la décharge. Il ne doit pas produire de fragment dangereux en cas d'explosion.

5.5.4 Cas particulier des événements pare-flamme

Un événement pare-flamme est un dispositif d'événement qui permet de décharger les gaz de l'explosion tout en empêchant les flammes de sortir de l'enceinte. Plusieurs technologies existent mais le principe fondamental reste le même : il s'agit de faire passer les gaz dans un filtre, un matériau poreux qui les refroidit et empêche une partie des particules – pour le cas des explosions de poussières – de passer à l'extérieur. En absorbant suffisamment de chaleur, on peut éteindre la flamme et empêcher la ré-inflammation du combustible hors de l'enceinte. Le comportement de ces événements particuliers est décrit dans la norme EN16009 comme celui des événements standard avec certaines limites spécifiques additionnelles. En pratique le problème est loin d'être trivial, et cette norme est en révision en 2022.

Suivant la technologie mise en œuvre ces dispositifs seront considérés comme actifs, par exemple lorsque leur ouverture repose sur la compression d'un ressort, ou passif, par exemple lorsqu'ils intègrent une membrane (événement standard, disque de rupture) qui se rompt lors de l'explosion.

Les événements pare-flamme sont parfois constitués d'un filtre, fermé en l'absence d'explosion, qui peut se déformer pour laisser passer les gaz comprimés. D'autres événements pare-flamme sont constitués d'une membrane, qui peut être un événement d'explosion standard, qui permet de décharger l'explosion dans une enceinte secondaire, équipée d'un maillage fin essentiellement métallique (car ces technologies mettent en œuvre des matériaux dont le but est d'absorber un maximum de chaleur) qui a pour double objectif de refroidir les gaz et contenir une partie du nuage. Un exemple de décharge d'une explosion de poussières par un événement pare-flamme est présenté dans la Figure 10.

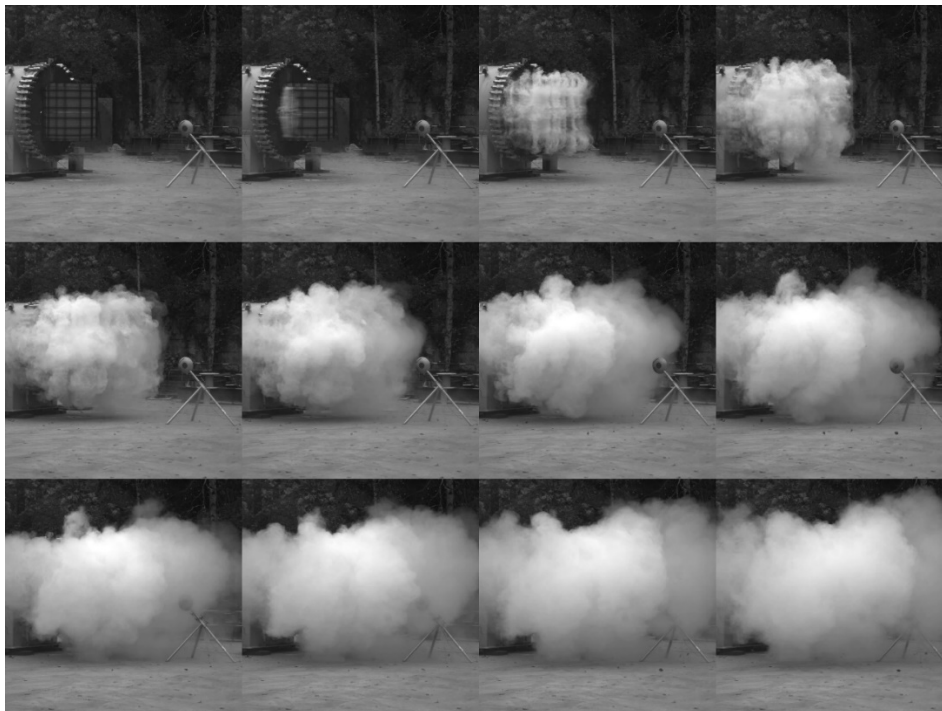


Figure 10 : Décharge d'une explosion de poussières par un événement pare-flamme (25 ms entre les images)

Lorsque le système est correctement dimensionné, les effets externes thermiques ou de pression peuvent être très largement réduits par rapport au cas d'une ouverture simple sur l'enceinte qui subit l'explosion. C'est la raison pour laquelle ils sont le plus souvent destinés à un usage à l'intérieur d'un bâtiment.

Toutefois, en présence de particules, ces dispositifs peuvent être bouchés partiellement ou complètement. Dans ces situations, la surface ouverte par l'événement n'est pas constante et peut devenir inférieure au minimum nécessaire pour garantir la protection de l'enceinte. Il a été mis en évidence que le blocage de ces dispositifs est fortement lié à la concentration des poussières, la distance au point d'inflammation et la granulométrie et morphologie de la poussière. Ces systèmes sont prévus pour fonctionner dans des conditions précises qu'il convient de vérifier avant leur installation, sous peine de les rendre entièrement inopérants. Il s'agit d'une première limite imposée sur l'écoulement.

Il existe pour ces systèmes une seconde limite, liée à la température des gaz dans l'enceinte. En effet la quantité de chaleur que ces systèmes peuvent absorber est limitée. L'énergie thermique dans l'enceinte dépend de la température de la flamme, du volume de l'enceinte, des gaz et de leur masse. Ainsi il existe pour ces systèmes des limites spécifiques sur les types de combustibles qui peuvent être mis en œuvre (gaz, poussières métalliques...) et une limite sur le volume maximal qu'un système peut protéger.

Enfin l'expérience montre que les événements pare-flamme ne se comportent comme des événements d'explosion standard que dans certaines conditions, correspondant souvent à des atmosphères avec une faible concentration en particules. Mettre en œuvre des poussières moins réactives ne garantit absolument pas de meilleures performances concernant la réduction de pression, contrairement à ce qui est observé avec des événements d'explosion standard.

En effet des poussières de granulométrie relativement grande ($> 50 - 100 \mu\text{m}$) ou de forme spécifique (comme des fibres) étant susceptibles de boucher fortement le filtre pare-flamme, on peut se retrouver dans une situation de quasi-fermeture du dispositif d'événement et donc une surpression plus élevée dans l'enceinte. Une altération du filtre (rouille, colmatage par des éléments externes), situé hors de l'enceinte, peut également conduire à un échec total de sa fonction de protection.

Par échec total, on entend un colmatage au moins partiel du filtre, suivi d'une hausse de la P_{red} à des valeurs possiblement supérieures à la résistance de l'enceinte (avec donc rupture de l'enceinte), l'éjection de l'événement pare-flamme à plusieurs dizaines de m (il s'agit d'un dispositif pesant d'une cinquantaine à plusieurs centaines de kg, éjecté à 200-500 m/s), et effets externes de flamme et pression correspondant à une explosion de P_{red} élevée.

Pour une description de la décharge d'explosion de poussières au travers d'un événement pare-flamme, on se référera à :

- Grégoire Y., Leprette E., Proust C., Flameless venting of dust explosion: Testing and modeling, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Volume 73, 2021, 104596, ISSN 0950-4230, <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104596>

6 Critères d'évaluation des performances

En règle générale, le bon fonctionnement d'un événement dépend :

- De la bonne sélection en fonction de l'application (choix technologique, matériaux et dimensionnement) ;
- D'une installation adaptée qui respecte des règles et techniques d'installation ;
- D'un programme de maintenance adapté.

6.1 Efficacité en tant que barrière de sécurité

L'efficacité en tant que barrière de sécurité correspond à l'aptitude de l'événement d'explosion à remplir la fonction de sécurité pour laquelle il a été défini, dans son contexte d'utilisation et pendant une durée donnée de fonctionnement. L'efficacité est évaluée notamment pour un scénario d'accident précis. Elle est donc principalement liée au dimensionnement et à son installation.

Attention il ne faut pas confondre ce terme d'efficacité de la barrière définie dans le rapport Oméga 10 pour évaluer la performance des barrières de sécurité au sens général, avec l'efficacité de l'événement d'explosion qui est un terme réservé, spécifique aux événements d'explosion et explicité dans le paragraphe suivant.

6.2 Dimensionnement de l'événement et notion d'efficacité ou rendement de l'événement d'explosion

Historiquement, plusieurs méthodes se sont succédées, entre le début du vingtième siècle et nos jours, pour dimensionner les surfaces d'événements à mettre en place. La méthode des « nomogrammes », qui date de 1980-1995, est issue d'essais effectués en Suisse, en Allemagne et en France entre 1970 et 1985. En France, elle a été formalisée sous la forme d'une norme expérimentale AFNOR U 54 - 540. Ensuite les normes de dimensionnement des surfaces d'événement EN14994 pour les gaz et EN14491 pour les poussières sont apparues.

Tous ces résultats reposent sur des travaux empiriques. Les abaques de dimensionnement des surfaces d'événement issus de la méthode des « nomogrammes » ont été établis au moyen de membranes fines et extrêmement légères (moins de 10 kg/m²) qui s'ouvrent très rapidement. Les systèmes d'événement commerciaux peuvent selon leur constitution, leur inertie notamment, s'ouvrir moins bien et moins vite, si bien que la surface moyenne offerte à la décharge des produits de l'explosion est plus petite que la surface maximale d'ouverture. La performance de ces systèmes d'événement est donc réduite par rapport à celle des membranes fines. Néanmoins leur fonctionnement reste le même.

En pratique un événement de surface ouverte A_v de forte inertie est équivalent, en termes de surpression réduite d'explosion P_{red} obtenue dans l'enceinte, à un événement sans inertie de surface A_0 plus petite que A_v . Le rapport A_0/A_v porte le nom d'efficacité, ou rendement, de l'événement. L'efficacité varie entre 0 et 1, elle est parfois exprimée sous forme d'un pourcentage, qui représente le fait que l'événement réel entièrement ouvert est équivalent à une surface ouverte plus petite que la surface physique réelle de l'événement.

Cette efficacité ne doit pas être confondue avec le critère d'efficacité dans l'évaluation de la performance de la barrière. L'efficacité d'un événement d'explosion est déterminée expérimentalement, selon la procédure décrite dans la norme EN 14797.

Pour dimensionner des événements sur un procédé industriel, on commence par déterminer la surface d'ouverture A_0 qu'il est nécessaire d'avoir, qui dépend des paramètres listés au point 4.2. Ensuite on choisit un ou plusieurs événements à installer sur le procédé, dont on connaît la surface réelle $A_{v,i}$ et l'efficacité E_i (valeur comprise entre 0 et 1), i étant un indice faisant référence à chaque événement retenu. La somme du produit des surfaces d'événement par leurs efficacités respectives doit être supérieure à A_0 , la surface totale d'ouverture nécessaire :

$$\sum_i A_{v,i} \cdot E_i \geq A_0$$

Si l'enceinte est petite et relativement symétrique, un événement de grande taille peut être aussi efficace que plusieurs petits événements dès lors que la surface du grand est égale à la somme de la surface des petits. Pour les enceintes de grande taille, il est souvent nécessaire d'installer plusieurs événements afin de permettre une répartition aussi uniforme que possible des événements sur toute la surface de l'enceinte.

Remarque : un événement rectangulaire est a priori moins efficace qu'un événement carré de même surface car son diamètre hydraulique est plus petit.

6.3 Temps de réponse

Comme la pression d'explosion se développe très vite, le temps pour arriver à une ouverture totale de l'événement est un élément essentiel. En pratique une explosion dure de quelques dizaines de ms pour des volumes de l'ordre du m³ à quelques s pour les volumes de plusieurs dizaines de milliers de m³. Le temps d'ouverture de l'événement est lié à la pression appliquée sur l'événement en fonction du temps, sa surface et sa masse (à mesure que l'événement s'écarte de la structure et se déforme, la force effectivement appliquée par les gaz sur cette surface varie). Les événements les plus grands mesurent quelques m² et il s'agit de structures relativement légères si bien que leur délai maximum d'ouverture est en général de quelques dizaines de ms. Il ne s'agit pas d'une valeur calibrée ou de référence mais d'un ordre de grandeur attendu. On retiendra que le temps d'ouverture dépendra principalement de la pression d'ouverture de l'événement, liée à sa P_{stat} et à son inertie.

6.4 Niveau de confiance

Le niveau de confiance peut être évalué en identifiant les causes de mauvais fonctionnement :

- Règles d'installation non respectées.
- Obstruction de la canalisation de décharge.
- Dépôt ou accumulation de toute substance sur les parois externes du dispositif (par exemple de la neige ou de la glace) ou dépôt ou accumulation de produit sur ses parois internes.
- Modifications non gérées correctement (changement du contenu - des poussières ou du gaz - de l'enceinte ...).
- Qualité de la maintenance non optimale (accumulations de dépôts à l'intérieur ou à l'extérieur de l'enceinte...).

Afin d'évaluer le niveau de confiance, une étude détaillée de fiabilité pourrait être réalisée portant par exemple sur le retour d'expérience disponible, sur une identification exhaustive des possibles causes et modes de défaillance des événements et la mise en œuvre des mesures de contrôle adaptés y compris pour les dégradations liées au vieillissement ou aux modifications de l'installation, sur la justification que le dimensionnement est adapté à l'ensemble des scénarios possibles.

Plus précisément, pour la partie active il pourrait s'agir d'une analyse du retour d'expérience et d'une identification des processus de dégradation permettant de mettre en place une surveillance adaptée.

Pour la partie passive, il faudrait s'assurer que l'événement est dimensionné et placé pour prendre en compte tous les scénarios, qu'il n'y a pas de moyens d'isoler l'événement, que les canalisations de décharge sont dimensionnées pour les pires cas y compris pour les cas d'ouverture de plusieurs événements simultanés, qu'il n'y a pas de possibilité d'obstruction et en général que les causes de mauvais fonctionnement sont bien identifiées et traitées.

En l'absence d'analyse spécifique, on peut retenir par défaut :

- Pour un événement de type actif : NC = 1
- Pour un événement de type passif : NC = 2

6.4.1 Choix et installation de l'événement

Les procédures d'installation et mise en service doivent permettre d'éviter et détecter les défauts lors de cette phase et de vérifier la validation globale de la fonction de sécurité.

L'installation doit être faite suivant les instructions du fournisseur, par des personnes compétentes et suivant des procédures et moyens adaptés.

En particulier, on sera attentif aux points suivants :

- L'événement doit pouvoir résister à la pression et à la température de fonctionnement, au régime pulsatoire, aux cycles de pression, à l'environnement corrosif et aux aléas météorologiques (neige, vent...). Des supports de contre-pression peuvent être mis en place pour empêcher la membrane de se rompre au cours des phases d'inversion de pression.
- Les événements doivent être conçus pour conserver les performances spécifiées dans leur environnement et dans les conditions du procédé.
- Les matériaux utilisés pour les pièces des événements doivent être choisis en fonction de leur bonne adaptation aux conditions chimiques et physiques auxquelles ils seront soumis en service.
- L'enceinte protégée ne doit pas être endommagée par le bon fonctionnement de l'événement.

- Les événements sont principalement réservés aux enceintes « isolées » pour empêcher qu'une explosion ne se transmette d'une enceinte à l'autre si le diamètre de la canalisation qui les relie le permet.
- Les différents types d'événements et leurs accessoires éventuels (déflecteurs, carneaux ...) sont sélectionnés en fonction de l'application. Par exemple, on sélectionnera des événements refermables s'il y a un risque fort d'entretenir un incendie violent après les explosions. Cela peut notamment être le cas des broyeurs et systèmes de convoyage du charbon. Dans ce cas le système refermable empêche les entrées d'air après l'explosion, ce qui limite la propagation du feu. Pour les panneaux d'explosion standard, les fabricants proposent un certain nombre de variantes, pour faire face à des contraintes du procédé : isolation thermique, panneaux résistants aux fluctuations de pression internes, panneaux adaptés aux applications alimentaires (antibactériens...), matériaux adaptés aux atmosphères corrosives, etc... Les événements pare-flammes sont plutôt destinés à un usage en intérieur dans des procédés ne mettant pas en œuvre de produits toxiques.
- Les forces de recul doivent être prises en compte lors du choix de l'emplacement et de la répartition des événements. Les normes sur le dimensionnement des événements d'explosion, pour les gaz comme pour les poussières proposent des formules empiriques permettant d'estimer ces effets.
- Les événements doivent pouvoir s'ouvrir et leurs effets externes doivent être intégrés convenablement dans l'étude de sécurité liée au procédé. Il ne doit pas y avoir d'obstacle devant un événement qui pourrait modifier son ouverture ou ralentir la décharge des gaz, sauf bien sûr s'il s'agit d'un déflecteur ou d'un conduit de décharge correctement dimensionné. Il ne doit pas y avoir non plus de personnel dans les zones de danger autour de l'événement.
- Par ailleurs, positionner les événements en hauteur permet parfois de limiter significativement les effets externes des explosions à hauteur d'homme. Néanmoins on retiendra que la surface d'événement à installer pour garder la surpression sous une P_{red} désirée, augmente avec la longueur maximale de flamme L_f dans l'enceinte. L_f est définie comme la distance maximale que peut parcourir la flamme avant d'atteindre un événement. Une conséquence directe est qu'une meilleure protection est obtenue pour une même surface d'événement A_v lorsque les événements sont distribués de manière à minimiser L_f dans l'enceinte.
- Les événements doivent être correctement signalés de manière à empêcher les personnes de traverser la zone de danger ou marcher sur les événements lorsqu'ils sont sur un toit.

6.4.2 Maintenance

Un événement d'explosion est soumis aussi bien aux conditions internes du procédé qu'aux conditions externes. Il est soumis aux contraintes spécifiques du processus d'un côté et à des conditions variables de l'autre. En effet, en raison des effets externes sévères que son déclenchement entraîne, ce dernier est souvent :

- Soit directement à l'extérieur, exposé aux aléas climatiques ;
- Soit couvert, éventuellement masqué par un canal de décharge ou un filtre pare-flamme.

La technologie de l'événement reste relativement simple, ainsi un simple contrôle visuel périodique doit permettre de détecter des anomalies. Un dépôt important de poussières, des fuites de produit ou de la rouille sont des signes indicateurs d'un problème. Les événements d'explosion sont généralement équipés d'un indicateur de rupture, qui permet de vérifier en temps réel qu'il n'y a pas eu d'ouverture intempestive. Cependant, certains cas rencontrés régulièrement sur le terrain sont plus problématiques et font alors l'objet d'une vérification accrue :

- Les événements pare-flamme nécessitent des vérifications spécifiques, par exemple pour s'assurer que le filtre pare-flamme n'est pas colmaté par des dépôts de poussières.
- Les situations avec un risque important de corrosion liée à l'extérieur (air marin ou procédés émettant des substances corrosives ...) ou à l'intérieur (condensation, corrosion). Cela est d'autant plus problématique dans le cas d'événements complexes (refermables, sans-flammes, etc.).
- Les procédés mettant en œuvre des substances pouvant coller les événements par réaction avec l'air ou par condensation/cokéfaction.
- Les installations sujettes au vieillissement prématuré des événements, par exemple les événements refermables trop sollicités (explosions fréquentes). Une vérification de la tenue mécanique et du bon fonctionnement des freins et absorbeurs de choc est alors nécessaire.

La périodicité de la maintenance des événements est fixée par le fabricant, en fonction notamment des contraintes du procédé et de l'environnement (atmosphère corrosive, abrasive, température, etc...).

7 Liste de sources utilisées

- [1] Ineris. « Evaluation de la performance des barrières techniques de sécurité - OMEGA 10 » (2018). Disponible sur le site <https://www.ineris.fr>.
- [2] Ineris. « Démarche d'évaluation des Barrières Humaines de Sécurité - OMEGA 20 » (2009). Disponible sur le site <https://www.ineris.fr>.
- [3] Ineris. « Phénoménologie et modélisation des explosions de gaz confinées - OMEGA 31 » (2022). Disponible sur le site <https://www.ineris.fr>.
- [4] Daubech J., Proust C., Jamois D., Leprette E., 2011, Dynamics of vented hydrogen-air deflagrations, Proceedings of the 4th International Conference on Hydrogen Safety (ICHHS), Sep 2011, San Francisco, United States. ineris-00973626f, <https://hal-ineris.archivesouvertes.fr/ineris-00973626/document>.
- [5] Daubech J., Proust C. and Lecocq G., 2016, Propagation of a confined explosion to an external cloud, 11th International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions, Dalian, China.
- [6] Grégoire Y., Proust C., Leprette E., Dust explosion development in a vessel-duct arrangement. 10. International symposium on hazards, prevention, and mitigation of industrial explosions (X ISHPMIE), Jun 2014, Bergen, Norway. pp.1539-1556. ffineris-01862426.
- [7] Grégoire Y., Leprette E., Proust C., Flameless venting of dust explosion: Testing and modeling, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Volume 73, 2021, 104596, ISSN 0950-4230, <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104596>.
- [8] Proust, C. and Leprette, E., 2010, The dynamics of vented gas explosions, Process Safety Progress, vol. 29, 3, 2010, pp. 231–235.
- [9] Roux P., Proust C. (2003), Méthodes de protection contre les explosions : événements, Rapport INERIS DRA-Pro-CPr-0225313.

