

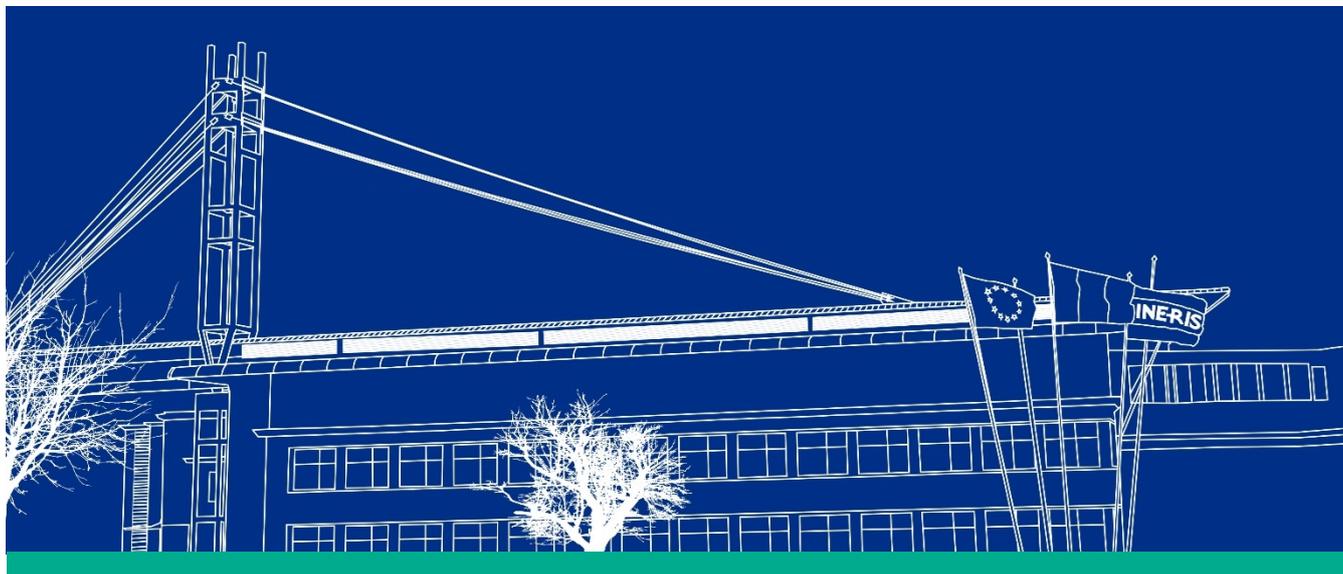


RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*

INERIS

maîtriser le risque |
pour un développement durable |



(ID Modèle = 454913)

Ineris - 227261 - 2804575 - v1.0

10/10/2024

Events d'explosion pare flamme

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

Vérification : LEPRETTE EMMANUEL; JOUBERT LAURIS; TARRISSE ALBIN

Approbation : PIQUETTE BERNARD - le 10/10/2024

Table des matières

1	Fonction de sécurité assurée par un événement d'explosion pare-flamme	5
2	Objet de la fiche.....	7
3	Principales normes, directives et dispositions applicables aux événements d'explosion pare-flamme	9
4	Fonctionnement d'un événement d'explosion pare-flamme	10
4.1	Principe général de fonctionnement et types d'événements d'explosion pare-flamme	10
4.2	Spécificités technologiques	11
4.2.1	Membrane.....	11
4.2.2	Chambre d'expansion.....	11
4.2.3	Filtre.....	11
4.3	Phénoménologie.....	12
4.3.1	Phénoménologie de la décharge d'explosion	12
4.3.2	Phénoménologie de l'extinction des flammes.....	15
4.3.3	Couplage décharge et extinction des flammes : les effets de la chambre et du filtre à la sortie de l'événement d'explosion	15
4.3.4	Effets périphériques.....	17
4.4	Limites critiques de fonctionnement	17
4.5	Conséquences sur le dimensionnement	18
4.6	Illustration avec des systèmes réels.....	19
4.6.1	Situation de référence : l'événement d'explosion standard	19
4.6.2	Essai d'un dispositif d'événement pare flamme.....	19
4.6.3	Sensibilité à la concentration en poussières.....	21
4.6.4	Sensibilité à la nature des poussières	21
4.6.5	Effets du filtre de rétention de particules	23
4.6.6	Effet de la limite en volume.....	24
5	Critères d'évaluation des performances	25
5.1	Indépendance.....	25
5.2	Efficacité en tant que barrière de sécurité	25
5.3	Dimensionnement de l'événement pare-flamme	25
5.4	Temps de réponse.....	26
5.5	Niveau de confiance	26
5.6	Evolution des performances dans le temps.....	27
5.6.1	Choix et installation de l'événement pare-flamme	27
5.6.2	Maintenance	27
5.6.3	Gestion des modifications.....	28
6	Références	29

Résumé

Ce document présente les informations relatives aux événements d'explosion pare-flamme. Ces événements d'explosion pare-flamme sont utilisés afin d'évacuer des gaz chauds d'une enceinte en vue de décharger la pression d'explosion et d'empêcher son éclatement, donc tout à fait comme des événements d'explosion standard. Leur spécificité est, en plus d'assurer la décharge de l'explosion, d'empêcher le passage des flammes dans l'environnement de l'enceinte protégée. De fait, ils sont essentiellement prévus pour un usage en intérieur.

Les différentes technologies d'événements d'explosion pare-flamme sont d'abord présentées en expliquant leur principe de fonctionnement, leurs avantages et leurs limites d'utilisation ainsi que des éléments nécessaires pour pouvoir vérifier le respect des critères de performance définis par la méthode Ω 10 et l'article 4 de l'arrêté du 29 septembre 2005 : efficacité, temps de réponse, test / maintenance et niveau de confiance.

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

Institut national de l'environnement industriel et des risques, Events d'explosion pare-flamme, Document de synthèse relatif à une Barrière Technique de Sécurité (B.T.S.), Verneuil-en-Halatte : Ineris - 227261 - v1.0, 10/10/2024.

1 Fonction de sécurité assurée par un événement d'explosion pare-flamme

Un événement d'explosion pare-flamme, également désigné par le terme événement « flameless », événement sans flamme ou dispositif de décharge d'explosion sans flamme, est un événement d'explosion doté d'un système spécifique pour empêcher la transmission des flammes.

Le mode de fonctionnement des événements pare-flamme, pour les aspects concernant la décharge des explosions, présente des similitudes avec celui des événements d'explosion standard. Néanmoins, il n'est pas identique et dans certains cas spécifiques, il existe une claire opposition dans le fonctionnement entre les deux types de systèmes. Le but de cette fiche est de décrire le fonctionnement des événements d'explosion pare-flamme et les différences fondamentales qui existent avec les événements d'explosion standard. Pour plus d'information sur les événements d'explosion standard consulter la fiche « Events d'explosion » disponible sur le site Ineris.

L'événement pare-flamme, comme l'événement d'explosion standard, 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).

A la différence des événements d'explosion standard, les événements d'explosion pare-flamme ne doivent pas permettre la sortie des flammes hors de l'enceinte qu'ils protègent. Ils sont équipés d'éléments filtrants dont le but est de retenir et refroidir le mélange combustible. Ces équipements sont donc généralement constitués d'un dispositif de décharge d'explosion couplé à un dispositif d'extinction des flammes.

La fonction de sécurité d'un événement d'explosion pare-flamme consiste à éviter l'éclatement d'une enceinte (équipement ou local) en cas d'explosion de gaz ou de poussières survenant à l'intérieur, tout en empêchant la transmission des flammes hors de l'enceinte protégée. L'événement d'explosion pare-flamme permet ainsi de maintenir l'intégrité de l'enceinte et d'éviter les projections. Devant la sortie de l'événement pare-flamme des fumées chaudes sont possibles, mais il ne doit pas y avoir de flamme.

Un événement d'explosion pare-flamme peut parfois remplir d'autres fonctions similaires à celles assurées par des événements standard. Par exemple, assurer une protection contre les surpressions internes dues au dysfonctionnement d'autres appareils. Il peut également servir de protection contre les risques de mise sous vide accidentelles. Ces dispositifs de décharge sans flamme induisent des zones de danger moindres à l'extérieur dans leur périphérie, mais induisent des coûts supplémentaires. Ils sont plutôt destinés à des usages spécifiques, lorsque des opérateurs sont amenés à travailler près de ces dispositifs, ou plus généralement à l'intérieur des bâtiments.

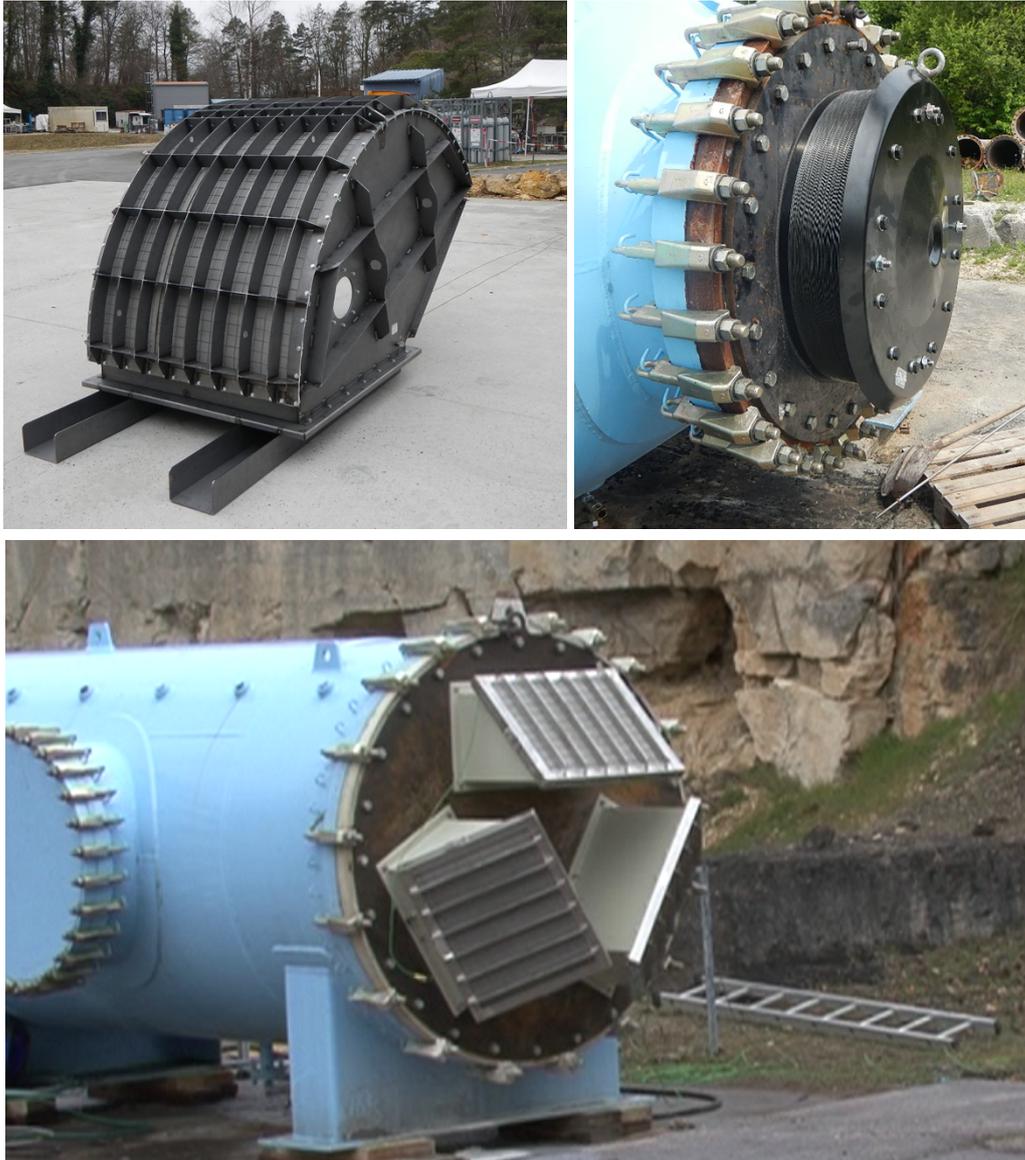


Figure 1 : Exemples d'événements pare-flamme

2 Objet de la fiche

Cette fiche présente des éléments de synthèse relatifs à l'évaluation des performances des événements d'explosion pare-flamme dans le cadre des installations classées.

L'arrêté du 29 septembre 2005 (dit arrêté PCIG) précise qu'il est nécessaire que les études de dangers examinent les performances des mesures de maîtrise des risques et qu'une justification de leur niveau de performance établi soit fournie.

L'article 2 de cet arrêté dispose que « *La méthode d'évaluation de la probabilité peut s'appuyer sur la fréquence des événements initiateurs spécifiques ou génériques et sur les niveaux de confiance des mesures de maîtrise des risques agissant en prévention ou en limitation des effets.* »

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 barrières de sécurité (mesures de maîtrise des risques dans le cadre d'une EDD) doit être explicitée en s'appuyant sur les critères définis aux articles 2 et 4 de l'arrêté précité. Pour cela, l'Ineris a développé des méthodes génériques d'évaluation des barrières techniques (Ω 10 [2]) et humaines (Ω 20 [3]) de sécurité.

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

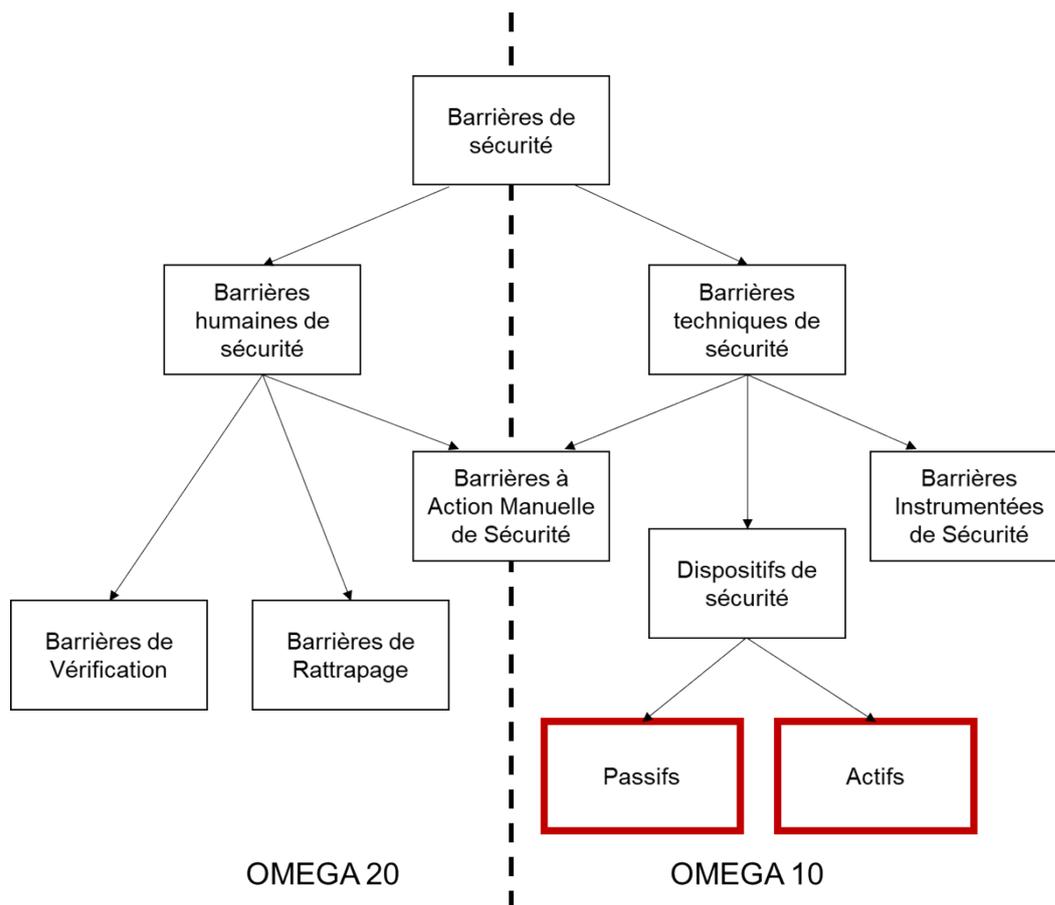


Figure 2 : Typologie des Barrières de Sécurité, Ω 10

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. Dans la catégorie des barrières techniques de sécurité, il peut s'agir de dispositifs de sécurité ou de barrières instrumentées de sécurité (BIS).

Un dispositif de sécurité est en général un élément unitaire, autonome, ayant pour objectif de remplir une fonction de sécurité, dans sa globalité. Les dispositifs de sécurité peuvent être passifs (qui ne mettent en jeu aucun système mécanique ni action humaine pour remplir leur fonction) ou actifs (qui mettent en jeu des dispositifs mécaniques pour remplir leur fonction).

Les événements d'explosion pare-flamme correspondent en général à des dispositifs de sécurité passifs. Néanmoins certaines technologies d'événements pare-flamme reposent sur des éléments filtrants mobiles ou des systèmes à ressort pour la membrane interne. Dans ces cas il s'agira de systèmes actifs parce qu'il s'agit d'éléments unitaires dont le fonctionnement s'appuie sur des dispositifs mécaniques déclenchés par le souffle de l'explosion.

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 pare-flamme, notamment :

- Les normes applicables pour leur conception, dimensionnement et qualification au chapitre 3 ;
- Les principes de fonctionnement général au chapitre 4 ;
- La vérification du respect des critères de performance tels qu'ils sont définis par la méthode Ω 10 en termes d'efficacité, de temps de réponse et de niveau de confiance au chapitre 5.

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

Les événements d'explosion pare-flamme 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 16009 (juillet 2011) - Dispositifs de décharge d'explosion sans flamme. Ce document inclut les exigences relatives à la fabrication, à l'inspection, aux essais, au marquage, à la documentation et à l'emballage. Ce document s'appuie largement sur 3 autres normes concernant plus généralement la décharge d'explosion par un événement :

- Une norme harmonisée qui concerne la conception et l'essai des dispositifs de décharge d'explosion en général : 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.

A l'écriture du présent document, en 2024, 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 2024, est celle de l'année 2023.

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.

Pour le cas des événements d'explosion standard, des indications sont également données pour estimer l'amplitude des effets externes ou autres conséquences sur la structure (ex : les forces de recul). Les événements pare-flamme ayant justement pour but de réduire les effets externes, ces indications ne sont pas transposables. Elles peuvent toutefois indiquer le niveau de danger attendu en l'absence de maillage pare-flamme et permettre une meilleure compréhension du fonctionnement de ces systèmes.

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, parfois de types différents (pare flamme ou non) pour une protection adéquate (par exemple : les élévateurs dont la partie basse peut être en intérieur, proche des opérateurs et donc protégée par événements pare flamme tandis que les parties supérieures, plus éloignées voire en extérieur seront protégées par des événements standard).

4 Fonctionnement d'un événement d'explosion pare-flamme

4.1 Principe général de fonctionnement et types d'événements d'explosion pare-flamme

L'histoire des événements d'explosion pare flamme remonte à 1989, lorsque Alfert et Fuhre ont mis au point le premier dispositif de ce type. Baptisé "Quenching tube" (tube d'extinction), ce système pionnier a été développé en collaboration avec le fabricant Rembe GmbH. Quelques années plus tard, en 2003, Eckhoff a décrit ce dispositif comme un disque d'éclatement relié à un tube, dont les parois étaient conçues pour produire une faible chute de pression tout en offrant une grande efficacité de rétention des particules et un refroidissement efficace des gaz de combustion.

L'événement d'explosion pare-flamme a en pratique une double fonctionnalité : d'une part il doit permettre la décharge de l'explosion et d'autre part il doit être capable d'empêcher la transmission des flammes à l'extérieur.

Plus récemment, en 2006, Holbrow [8] a réalisé un inventaire des dispositifs d'événement d'explosion pare-flamme disponibles sur le marché européen. Compte tenu de la grande diversité des solutions existantes pour les événements d'explosion pare flamme, il est difficile d'élaborer une liste exhaustive des différentes technologies disponibles actuellement pour ces systèmes. Néanmoins, on peut identifier une structure de base commune à la plupart de ces dispositifs.

Typiquement, un événement pare-flamme se compose de trois éléments principaux : une membrane (M), un filtre (F), et une chambre d'expansion des gaz (C). La membrane, souvent un panneau d'explosion standard, un disque de rupture ou une soupape à ressort, assure la fonction de décharge d'explosion. Le filtre, quant à lui, assure le rôle d'extinction des flammes. Il est généralement constitué d'une superposition de différentes mailles métalliques, comprenant des écrans fins pour la rétention des particules (avec des trous d'environ 50 μm de diamètre) et des mailles plus grossières (de l'ordre du millimètre) pour refroidir le flux de gaz chauds et de particules. La chambre d'expansion, enfin, permet une ouverture totale et libre du dispositif d'événement, tout en fournissant une surface suffisante pour l'évacuation des réactifs et produits de combustion à travers le filtre.

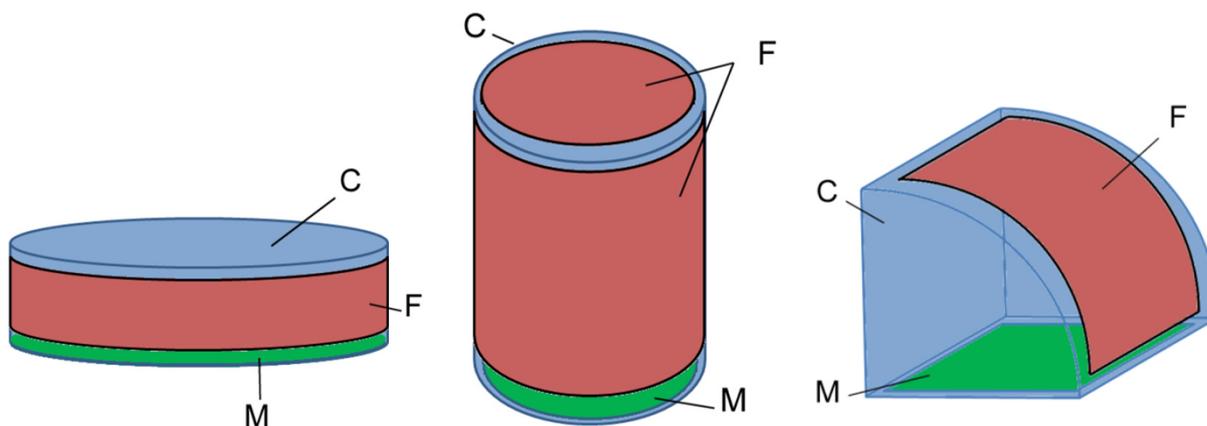


Figure 3 : Trois types d'événements d'explosion pare flamme les plus fréquemment rencontrés : en forme de disque, cylindre ou boîte, ils comprennent une membrane (M), un filtre anti-déflagration (F), montés sur une chambre d'expansion des réactifs et produits de combustion (C)

Parmi les conceptions les plus fréquentes, on distingue trois types principaux d'événements pare flamme :

- Le type disque (DSQ) présente souvent un clapet à ressort circulaire monté contre la paroi supérieure de la chambre, avec un rapport d'aspect inférieur à 1 ;
- Le type cylindrique (CYL) utilise un disque d'éclatement recouvert d'une chambre d'expansion cylindrique dont le rapport d'aspect (L/D) est supérieur à 1, permettant une évacuation radiale et axiale des produits ;

- Enfin, le type boîte (BOX) se caractérise par un panneau d'évent recouvert d'une chambre d'expansion prismatique, avec un filtre occupant généralement le côté le plus large de la chambre.

Lors d'une explosion confinée dans une enceinte équipée d'un évent pare-flamme, le processus se déroule en plusieurs étapes. La membrane s'ouvre d'abord suffisamment tôt pour évacuer les gaz avant qu'ils n'induisent une trop forte hausse de pression. Le mélange réactif est alors poussé par l'explosion dans la chambre, puis envoyé à travers le filtre. À l'extérieur, des fumées chaudes sont tolérées, ainsi que parfois des particules incandescentes, mais aucune flamme ne doit être visible.

4.2 Spécificités technologiques

Un dispositif d'évent pare-flamme est composé de trois éléments principaux : la membrane, la chambre d'expansion et le filtre.

4.2.1 Membrane

La membrane est généralement un évent d'explosion standard ou un disque de rupture, conçu pour s'ouvrir à une pression prédéfinie. Certains systèmes utilisent une soupape à ressort comme membrane. Le cas échéant, il s'agit d'une barrière de sécurité de type « dispositif de sécurité actif ».

4.2.2 Chambre d'expansion

La chambre d'expansion sert principalement de support pour le filtre et offre un espace permettant l'ouverture de la membrane. Comme indiqué plus haut, trois formes principales semblent se démarquer : le disque, le cylindre et la « boîte ». Une chambre plus grande permet d'installer une surface de filtre plus étendue tout en offrant un volume plus important où les réactifs peuvent continuer à brûler. Plus le rapport surface de filtre / surface d'évent est grand, plus l'aptitude à éteindre la flamme est bonne. De ce point de vue l'évent cylindrique a les meilleures performances. Le retour d'expérience indique également que les systèmes se contentant d'un filtre plat sur une chambre parallélépipédique ont de moins bonnes performances que ceux avec des chambres présentant une ouverture plus large et un filtre bombé (dont le rapport surface de filtre / surface d'évent est plus grand).

4.2.3 Filtre

Les filtres utilisés dans les dispositifs d'évent pare-flamme varient considérablement, ce qui entraîne des effets différents. Le principe fondamental reste de faire passer le mélange réactif et la flamme dans des canaux étroits afin de les refroidir. Un second aspect est la rétention des particules.

Le concept sur lequel on dispose des études les plus poussées à ce jour est celui de l'empilement de grilles métalliques les unes sur les autres, incluant une ou plusieurs couches de maillage fin donc la fonction est de retenir les particules (contrairement aux grilles superposées à mailles plus larges dont le but est de refroidir le mélange). La matière des grilles, leurs dimensions, l'agencement et le nombre de ces dernières sont des secrets industriels de chaque fabricant. On se limitera donc à une analyse qualitative de leur rôle.

Les filtres à maillage fin, appelés filtres de rétention de particules, possèdent des orifices relativement petits, de l'ordre de 50 μm , tandis que les grilles plus grossières ont des trous de 0,5 mm ou plus. Bien que les filtres de rétention soient plus susceptibles de se boucher, ils maintiennent la majorité des particules à l'intérieur du dispositif, réduisant ainsi le risque de formation d'une ATEX de poussières à l'extérieur. Cependant, lorsqu'une grande quantité de particules est impliquée, retirer cet écran de rétention (et donc ne garder que des grilles ayant des trous plus grands) peut améliorer l'efficacité du dispositif, mais cela entraîne un risque accru d'éjection de poussières hors du système et de formation d'une ATEX de poussières à l'extérieur.

Une autre technologie de filtre rencontrée dans les événements pare flamme de type disque est la superposition d'anneaux métalliques. Dans ces systèmes, le mélange enflammé, après l'ouverture de la soupape, passe radialement à travers les anneaux métalliques. Ces anneaux, qui peuvent se déplacer sous l'effet de la pression, absorbent une partie de l'énergie mécanique tout en refroidissant le mélange. Toutefois, ces systèmes n'incluent pas de filtre de rétention de particules et, lorsque la pression devient trop élevée, ils peuvent laisser passer des flammes.

4.3 Phénoménologie

D'un point de vue phénoménologique, la fonction de décharge de pression est identique à celle des événements d'explosion standard : il s'agit de produire une ouverture sur l'enceinte qui subit l'explosion, de manière à évacuer les gaz frais et brûlés à l'extérieur et ainsi limiter la hausse de pression dans l'enceinte.

La fiche « Events d'explosion » [1] décrit la phénoménologie de la décharge par événement d'explosion. Pour comprendre le fonctionnement d'un événement pare-flamme, il est nécessaire de pousser plus loin l'analyse. Même dans le cas le plus simple d'une enceinte isolée avec un seul événement, les effets d'une explosion confinée de gaz ou de poussières sont fortement influencés non seulement par la nature des réactifs et les spécificités initiales de leur environnement (géométrie, turbulence), mais aussi par les modifications de l'écoulement du fluide au cours de l'explosion.

Cette complexité souligne l'importance d'une compréhension approfondie des mécanismes physiques en jeu dans les explosions confinées et la nécessité d'une approche rigoureuse dans le dimensionnement des systèmes de protection, en particulier pour les événements pare flamme qui présentent des caractéristiques uniques.

4.3.1 Phénoménologie de la décharge d'explosion

4.3.1.1 Le phénomène physique

Considérons une enceinte isolée et partiellement confinée, mais protégée par un événement d'explosion, dans laquelle un mélange combustible réactifs-air se forme. On suppose que le rapport longueur sur diamètre est inférieur à 5 [4]. La taille, la composition et le niveau interne d'agitation (la « turbulence ») dépendent de la typologie du nuage et des caractéristiques géométriques du confinement. Si une source d'inflammation adéquate est présente à l'intérieur de la zone inflammable du nuage, celui-ci s'enflamme et une flamme se propage de proche en proche à partir du point d'inflammation.

La Figure 4 illustre le développement de la flamme dans le confinement.

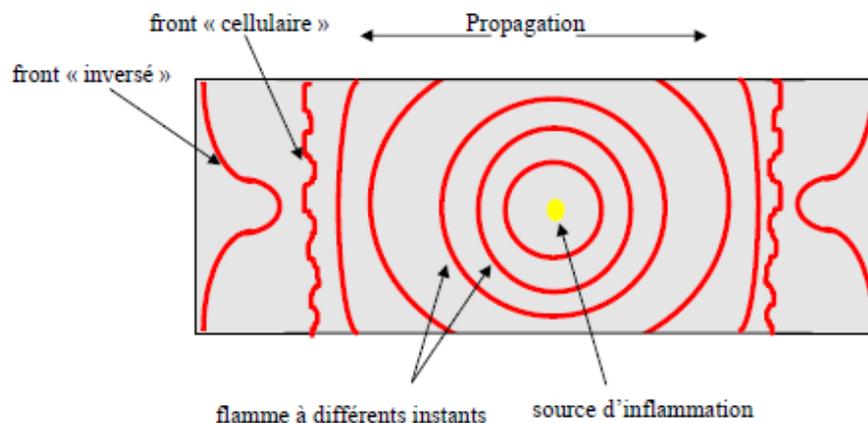


Figure 4 : Évolution du front de flamme en fonction du temps

La flamme se développe sphériquement autour de la source d'inflammation. Sur son passage, elle transforme quasi-instantanément les réactifs froids en produits de combustion très chauds (typiquement de 1500 à 3500 K) ce qui se traduit par une forte expansion volumique des gaz brûlés.

L'augmentation de la pression est directement liée la quantité de gaz produits par la combustion moins les gaz perdus par les différentes ouvertures de l'enceinte : un panneau d'évent dans le cas présent. La courbe d'augmentation de la pression en fonction du temps peut être estimée à l'aide d'un modèle tel que [5] :

$$\frac{1}{P} \frac{dP}{dt} = \gamma \cdot \frac{Q_{produit} - Q_{perdu}}{V} \quad 1$$

où P , V et γ sont la pression d'enceinte, le volume et le rapport de chaleur spécifique de l'espèce gazeuse. $Q_{produit}$ et Q_{perdu} sont respectivement les flux volumétriques de gaz produits par la combustion et perdus au travers de l'évent lorsqu'il est ouvert. Cette équation traduit une transformation adiabatique des gaz : la flamme transforme rapidement, sans laisser de temps pour l'échange de chaleur avec les parois, des réactifs « froids » en produits brûlés 5 à 10 fois plus chauds (car les températures sont exprimées en Kelvins), selon le mélange réactif considéré.

Au début de l'explosion, le terme Q_{perdu} est nul car les événements sont fermés. Par conséquent, la montée en pression est entièrement gouvernée par le flux de gaz produit par la combustion $Q_{produit}$. Il dépend à la fois des matières qui réagissent mais aussi de leur environnement qui va influencer la surface de la flamme ou imposer des gradients de concentration ou de turbulence. La production de gaz par combustion peut être approximée par ce modèle simple : une surface de flamme A_f , consommant les réactifs à une vitesse St dans l'enceinte en transformant le mélange combustible frais en produits brûlés chauds qui se dilatent d'un rapport E :

$$Q_{produit} = St \cdot A_f \cdot (E - 1) \quad 2$$

Le taux d'expansion E est une donnée thermodynamique qui dépend de la chaleur dégagée par la combustion, liée à la composition du mélange combustible. La détermination de A_f et St est plus complexe car ces deux paramètres sont fortement influencés par l'écoulement dans la cuve, notamment son état de turbulence. Ce produit doit néanmoins rester proportionnel au K_{St} de la poussière qui est une constante issue d'une mesure et qui permet de qualifier la vitesse de combustion d'une poussière dans une enceinte.

À l'ouverture de l'évent, une partie des gaz est rejetée dans l'environnement, hors de l'enceinte. Le terme Q_{perdu} n'est plus nul et peut être estimé à partir des lois de Bernoulli.

À l'équilibre entre production et évacuation des gaz, on est au maximum de pression, usuellement appelé P_{red} , ou pression réduite d'explosion. Si ΔP est la pression d'explosion réduite P_{red} , l'égalité entre les débits des gaz produits et perdus, conduit à une simplification de l'équation 1 :

$$A \approx \frac{C_d \cdot V^{2/3}}{k \cdot \gamma} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{P_{red}}} \cdot K_{max} \quad 3$$

Ce modèle permet d'exprimer la surface d'évent A en fonction de la pression réduite d'explosion P_{red} , pour un mélange réactif caractérisé par K_{max} et k , dans une enceinte de volume V . Certaines simplifications ont été faites mais on retrouve bien les grandeurs principales utilisées pour le dimensionnement des événements d'explosion (K_{max} , k ou P_{max} , P_{red} , V).

Pour aller plus loin sur la physique des explosions confinées, on recommande de consulter le rapport Oméga 31 [3] disponible sur le site Ineris¹. Ce document offre une analyse détaillée des phénomènes en jeu et fournit des bases pour appréhender le dimensionnement des systèmes de protection.

4.3.1.2 Application au dimensionnement de surface d'évent sur un procédé industriel

Dans le contexte des événements standard, plusieurs facteurs clés influencent la surface d'évent nécessaire pour protéger efficacement un équipement contre les risques d'explosion de gaz ou de poussières. Ces facteurs sont intimement liés aux caractéristiques physiques de l'explosion et à la géométrie de l'enceinte à protéger.

Premièrement, **la vitesse de réaction** joue un rôle crucial. Exprimée par les paramètres K_{St} pour les poussières ou K_G pour les gaz, une vitesse de réaction élevée nécessite une surface d'évent plus importante. En effet, plus la réaction est rapide, plus la pression augmente rapidement, exigeant une évacuation plus efficace des gaz d'explosion.

La taille de l'enceinte est également déterminante. Un volume important implique une quantité plus grande de mélange explosif, ce qui se traduit par une surface d'évent proportionnellement plus grande.

¹ <https://www.ineris.fr/fr/omega-31-methodes-evaluation-prevention-risques-accidentels-phenomenologie-modelisation-explosions>

De même, la pression maximale d'explosion influence directement le dimensionnement : plus elle est élevée, plus la surface d'événement doit être conséquente pour maintenir la pression interne dans des limites acceptables.

La géométrie de l'enceinte, notamment son rapport de forme L/D (longueur sur diamètre), a aussi un impact significatif. Un rapport L/D élevé, caractéristique des enceintes allongées, nécessite généralement une surface d'événement plus importante. Cette exigence s'explique par la propagation plus complexe de l'onde de pression dans de telles géométries.

Enfin, **la pression admissible dans l'enceinte** (P_{red}) est un paramètre critique. Plus cette pression est basse, plus la surface d'événement doit être grande pour assurer une décompression efficace et rapide, empêchant ainsi la pression interne de dépasser le seuil critique.

A partir de ces paramètres, il est donc possible de déterminer la surface théorique d'événement nécessaire pour protéger efficacement un équipement contre les risques d'explosion de gaz ou de poussières.

Historiquement, plusieurs méthodes se sont succédé, 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.

4.3.1.3 Efficacité des événements d'explosion standard

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 4.6. 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 efficacité 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.

Il est intéressant de noter que la norme EN16009, dans sa formulation actuelle, traite les événements pare flamme de manière similaire aux événements standard, avec certaines restrictions spécifiques, notamment sur la nature des particules. Cette norme renvoie à la norme EN14491 pour le dimensionnement de ces événements. Cependant, cette approche soulève des questions.

Comme nous le verrons au paragraphe 4.5, l'assimilation des événements pare flamme aux événements standard est remise en question. Une analyse plus nuancée et spécifique pour ces dispositifs particuliers apparaît comme nécessaire.

4.3.2 Phénoménologie de l'extinction des flammes

La physique des flammes de prémélange reste encore aujourd'hui mal connue et les modèles de calcul de ces phénomènes reposent très largement sur des corrélations empiriques. Néanmoins les facteurs dominants des évolutions de ces flammes sont bien identifiés et la compréhension globale sur ce sujet permet une certaine maîtrise de ces écoulements. Le rapport Ineris Oméga 31 [3] disponible sur le site Ineris² sur les explosions confinées de gaz, fournit quelques bases sur la thématique des explosions confinées. Dans le présent document on se limite au minimum nécessaire à la compréhension des phénomènes.

La propagation d'une flamme dans un prémélange réactif repose sur un transfert thermique : la flamme chauffe les réactifs frais, leur apportant l'énergie d'activation nécessaire à la combustion. Pour empêcher cette propagation, les événements pare flamme agissent à deux niveaux : ils interrompent le transfert de chaleur en imposant des pertes thermiques importantes, et ils empêchent le passage du combustible à l'extérieur.

Le cœur du dispositif, le filtre, s'appuie sur le refroidissement des réactifs et, dans le cas des explosions de poussières, sur la rétention des particules combustibles. Cette rétention peut jouer un rôle important, car la concentration minimale de poussières nécessaire à la propagation d'une flamme est relativement faible - de l'ordre de 150 g/m³ pour des poussières agroalimentaires comme la farine de blé, et jusqu'à 30 g/m³ pour la farine de bois. Les événements pare flamme utilisent donc souvent des grilles fines (trous de 50-150 µm) pour piéger ces particules, bien que ces maillages puissent s'obstruer rapidement lors d'une explosion.

Le refroidissement du mélange combustible est l'autre mécanisme clé. L'écoulement est forcé à travers un matériau poreux (tubes fins, grilles superposées, billes adjacentes ou mousses solides ouvertes). Ces canaux étroits empêchent la propagation de flammes stables et favorisent un transfert de chaleur important des gaz chauds vers les parois du filtre. Pour assurer performance et résistance, ces matériaux sont généralement métalliques.

L'objectif est double : stopper la propagation de la flamme et empêcher un ré-allumage après le passage des gaz chauds à travers le filtre. Pour cela, il faut refroidir les gaz en dessous de la température d'auto-inflammation (TAI) du mélange réactif. La TAI en nuage, obtenue empiriquement, indique la température minimale de paroi capable d'enflammer le mélange combustible au contact. Elle est minimale lorsque le mélange est proche de la stœchiométrie.

Une autre grandeur cruciale est l'interstice expérimental maximal de sécurité (IEMS ou MESH en anglais). Il correspond au diamètre minimal de passage permettant la transmission de la flamme. Si le diamètre du canal est inférieur à l'IEMS, le refroidissement à la paroi devient trop important pour maintenir la flamme. Comme la TAI, l'IEMS est minimal près des conditions stœchiométriques.

Il est important de noter que durant l'explosion, le chauffage du filtre réduit l'efficacité du refroidissement. Il existe donc un risque d'échec de l'extinction des flammes en cas de dimensionnement incorrect.

4.3.3 Couplage décharge et extinction des flammes : les effets de la chambre et du filtre à la sortie de l'événement d'explosion

Dans le cas d'un dispositif de décharge sans flamme, les produits éjectés à travers l'événement sont dirigés vers une chambre fermée par un filtre. L'expansion du nuage éjecté est alors confinée par les parois et la surface poreuse du filtre, ce qui entraîne nécessairement une première perte d'efficacité par rapport à une décharge libre.

² <https://www.ineris.fr/fr/omega-31-methodes-evaluation-prevention-risques-accidentels-phenomenologie-modelisation-explosions>

Ainsi, il est intéressant de se pencher sur la quantité et l'état des réactifs susceptibles d'entrer dans la chambre puis de passer dans le filtre. En reprenant les modèles évoqués précédemment, considérons une enceinte cubique de côté D , représentant un équipement industriel, et un exemple de mélange réactif avec un taux d'expansion de 7. En supposant qu'une flamme sphérique se déclenche au centre de l'enceinte cubique, il est pertinent d'examiner quelle fraction de réactif est consommée lorsque la flamme atteint les parois de l'enceinte.

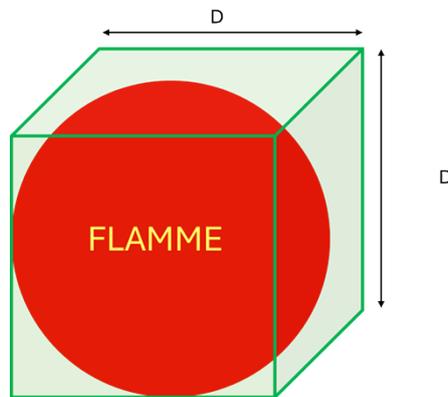


Figure 5 : Flamme sphérique dans une enceinte cubique

Le volume du cube est D^3 , et celui de la sphère inscrite, représentant la flamme, est $\frac{\pi D^3}{6}$. À l'intérieur de la flamme, les gaz brûlés ont une densité ρ_B . La masse de produits brûlés à cet instant est donc $\rho_B \times \frac{\pi D^3}{6}$. La masse initiale de réactifs est donnée par $\rho_U \times D^3$. La fraction de produits brûlés par rapport à la masse initiale est le rapport des deux quantités, soit $\frac{\pi}{6} \cdot \frac{\rho_B}{\rho_U}$. Le rapport $\frac{\rho_B}{\rho_U}$ est l'inverse du taux d'expansion, égal à 7 ici. Cela implique qu'au moment où la flamme touche les murs de l'enceinte, la fraction brûlée correspond à $\frac{\pi}{7 \times 6}$ soit 7,5 % environ de la masse initiale de réactifs.

Lors d'une explosion confinée, la flamme pousse et comprime l'essentiel des réactifs devant elle. La pression atteinte est directement proportionnelle à la quantité de matière brûlée [5]. Pour un taux d'expansion de 7, la pression maximale atteinte est de l'ordre de 8 bar, ce qui signifie que si aucun événement ne s'ouvre, la pression dans l'enceinte devrait être de l'ordre de 600 mbar à cet instant. Si l'enceinte est un parallélépipède de côté D et de longueur L (avec $L > D$), alors il restera encore plus de réactifs non brûlés lorsque la flamme atteindra les parois.

Si un événement s'ouvre effectivement, le mélange pressurisé sera éjecté à travers l'événement, comprenant majoritairement des réactifs. Lorsqu'ils sont rattrapés par la flamme, ils s'enflamment. Dans le cas d'un événement pare flamme, le mélange réactif est poussé dans une chambre d'expansion. Dans cette chambre, le mélange peut être comprimé et continuer à brûler, créant ainsi une contre-pression qui réduira le débit d'évacuation des gaz de l'enceinte protégée. Ce phénomène peut entraîner une seconde perte d'efficacité de la décharge, la première étant due à la résistance au passage de l'air causée par la présence du filtre.

Le point le plus critique ici reste le cas des explosions de poussières, lors desquelles la flamme va donc pousser une grande quantité de matière solide, l'essentiel des particules présentes dans l'enceinte, dans le filtre du dispositif pare-flamme.

4.3.4 Effets périphériques

A l'extérieur, un nuage de fumées chaudes sort au travers des grilles de l'évent pare flamme. Des particules incandescentes peuvent être tolérées dans le cadre de la certification de tels systèmes, mais dans ce cas des limites sont formulées pour l'installation du dispositif, en lien avec le zonage ATEX de l'installation. Comme attendu avec ces systèmes, s'ils sont correctement dimensionnés, il n'y a pas de flammes à l'extérieur en cas d'explosion. Le retour d'expérience montre que la zone de danger liée aux effets de pression externes est également considérablement plus faible qu'avec des événements d'explosion standard.

Suivant la finesse du filtre et la nature des combustibles dans l'enceinte, il est possible que la décharge de ces derniers au travers de l'évent pare-flamme conduise à la formation d'une ATEX à l'extérieur, autour de l'évent pare-flamme.

Lorsque le système est correctement dimensionné, les effets externes thermiques ou de pression peuvent donc être très largement réduits par rapport au cas d'une ouverture simple sur l'enceinte qui subit l'explosion. C'est pourquoi ces systèmes sont principalement conçus pour une utilisation à l'intérieur des bâtiments. Cependant, il est crucial de se rappeler que les fumées de combustion peuvent être toxiques, et des mesures appropriées doivent être mises en place pour garantir la sécurité des travailleurs, telles que des distances de sécurité et une ventilation adéquate.

4.4 Limites critiques de fonctionnement

Dans le cas d'une ATEX de poussières, le mélange contient des particules solides qui peuvent obstruer les pores du filtre. Comme mentionné précédemment, l'explosion confinée pousse et comprime l'essentiel des réactifs devant la flamme. L'obstruction du filtre équivaut à une réduction de la surface de décharge, ce qui diminue l'efficacité de l'évent. Lorsque cette perte d'efficacité devient trop importante, la fonction de décharge de l'explosion échoue, ce qui peut entraîner des surpressions extrêmes dans l'enceinte. Si le filtre est significativement obstrué, la pression continue d'augmenter, potentiellement jusqu'à une valeur proche de la pression maximale d'explosion des réactifs (P_{max}).

En pratique, dans ce type d'événement, nous avons observé des ruptures totales et des éjections à plusieurs dizaines de mètres du système, avec des surpressions de l'ordre de 2 à 3 bars. Ces dispositifs, pesant entre une cinquantaine et plusieurs centaines de kilogrammes, ont été éjectés à des vitesses de 200 à 500 m/s, accompagnées d'effets externes de flamme et de pression correspondant à une explosion de pression élevée. Une telle situation est inacceptable pour un procédé industriel. Seul un dimensionnement correct peut éviter l'échec de la fonction de décharge du dispositif d'évent sans flamme.

Même en prenant toutes les précautions pour assurer une décharge des gaz et une pression d'explosion contrôlées, le succès de la fonction pare-flamme n'est pas garanti. La température de flamme lors d'une explosion dépend de la nature des réactifs, variant typiquement entre 1500 et 3500 K, et est directement liée à la pression maximale d'explosion dans un espace confiné, qui varie généralement de 5 à 12 bars. Deux paramètres sont cruciaux : la température et la durée de l'échange thermique.

Certaines substances, comme les particules métalliques, peuvent atteindre des températures de flamme particulièrement élevées, dépassant 3000 K. Cela nécessite un maillage suffisamment épais pour le filtre afin de pouvoir refroidir la flamme tout en résistant à des températures extrêmes. De plus, les particules chaudes se déposent sur les grilles des filtres pendant l'explosion, formant des points chauds capables d'endommager sévèrement le système. Les poussières métalliques, telles que l'aluminium, sont particulièrement difficiles à décharger à travers un évent pare-flamme. Les gaz échangent principalement de la chaleur par convection avec le filtre, tandis que les poussières y superposent un transfert par conduction.

La durée d'exposition aux produits brûlés, chauds, d'un système pare-flamme augmente avec le volume de l'enceinte. C'est parce que le dispositif s'échauffe lors de la décharge, qu'il existe pour une taille d'évent pare flamme et une ATEX donnée, une limite en volume à partir de laquelle l'évent pare-flamme ne peut plus refroidir efficacement le mélange et éteindre la flamme. Il existe donc un volume maximal que le système peut protéger. Ce volume est nommé $V_{F,max}$ dans la norme EN16009. Il s'agit d'une limite de fonctionnement du système.

4.5 Conséquences sur le dimensionnement

Pour fonctionner correctement, un dispositif d'évent pare flamme doit à la fois permettre la décharge de l'explosion et empêcher la transmission de la flamme à l'extérieur.

Concernant la fonction de décharge, la norme EN16009 se réfère aux formules classiques de dimensionnement des événements. Cependant, plusieurs études ont montré que cette approche est insuffisante pour les ATEX de poussières lorsque la quantité de poussière dépasse un certain seuil. Grégoire (2021) [9] a détaillé ces limitations.

Ses recherches indiquent que les événements pare flamme peuvent, dans certains cas, présenter une efficacité similaire à celle des événements standard, mais uniquement sous certaines conditions. Il est nécessaire que la quantité de poussières pouvant traverser le filtre soit minimale, ce qui implique une concentration limitée, une longueur de flamme relativement courte, et un volume modéré par rapport à la surface d'évent disponible. Dans le cas contraire, une partie des particules peut obstruer le filtre et réduire la surface de décharge.

Si ces conditions ne sont pas respectées, des particules peuvent obstruer le filtre, réduisant ainsi la surface de décharge. En outre, la nature des particules (morphologie, granulométrie, mode de combustion) influence également l'efficacité du filtre : les fibres, les poussières plus grosses que la taille caractéristique des mailles du filtre ou celles qui fondent avant de brûler peuvent entraîner un blocage plus ou moins important du filtre. Par conséquent, le certificat des dispositifs d'évent pare flamme précise des limites sur la nature des particules, en plus des informations sur le K_{St} ou P_{max} , comme dans le cas d'un événement standard.

Il a été démontré ([8], [9]) que des particules moins réactives, conduisant à pressions réduites d'explosion (P_{red}) plus basses avec des événements standard, peuvent, lorsque des dispositifs d'évents sans flamme sont mis en œuvre, conduire à des effets plus sévères. Cela est dû au fait qu'une grande quantité de particules peu réactives peut provoquer un blocage rapide du filtre, ce qui est contraire à la formule de dimensionnement des événements d'explosion, qui stipule qu'une réduction de K_{St} , toutes choses égales par ailleurs, devrait réduire la pression d'explosion.

Pour les ATEX de gaz, l'expérience est plus limitée, car ces dispositifs sont principalement utilisés pour protéger les structures contre les explosions de poussières. En général, les explosions secondaires sont plus fréquentes avec les gaz, et un événement pare flamme introduit un volume partiellement confiné à la sortie de l'évent. Cela peut réduire l'efficacité si une explosion secondaire se produit dans la chambre du dispositif.

En somme, la physique impliquée dans le fonctionnement de ces systèmes est complexe. Bien que les paramètres dominants de la décharge d'explosion et de l'extinction des flammes soient bien identifiés, le dimensionnement correct des événements pare-flamme repose encore sur des corrélations empiriques. Grégoire [9] a proposé un modèle de dimensionnement pour les explosions à travers un type d'évent pare-flamme, mais le manque de données publiées empêche d'affirmer dans quelle mesure ces résultats sont extrapolables à d'autres technologies d'évents pare flamme.

Un autre point critique est l'absence de modèle théorique pour prédire la capacité d'un dispositif d'évent pare flamme à isoler efficacement les flammes. On s'appuie toujours sur des essais dans les conditions les plus contraignantes pour le système, avec une section A sur un volume maximal d'enceinte V_{Fmax} pour cette aire A dans laquelle le dispositif a fonctionné correctement. Ces résultats sont ensuite extrapolés à des conditions moins contraignantes.

Les extrapolations à des plus grands volumes sont prohibées du fait des incertitudes sur le lien entre la pression réduite d'explosion P_{red} , la durée de l'explosion et l'élévation de température dans le filtre du dispositif d'évent pare-flamme.

Enfin, les règles et modèles établis concernent le cas d'un seul dispositif d'évent pare flamme pour une enceinte. En pratique, il peut être nécessaire d'utiliser plusieurs de ces équipements dans une même installation, voire un mélange d'évents et d'évents pare flamme, comme c'est le cas pour certains élévateurs. Ces situations complexes doivent être examinées au cas par cas.

4.6 Illustration avec des systèmes réels

Pour illustrer certains des points abordés précédemment, nous pouvons nous référer à des essais réalisés à l'Ineris sur des systèmes pare-flamme. Ces essais, menés entre 2013 et 2020, portaient sur des dispositifs d'événements pare flamme produits par différents fabricants, mais basés sur un même design général : le type « boîte ». Certains dispositifs testés étaient équipés de filtres de rétention de particules, tandis que d'autres en étaient dépourvus.

Des informations plus détaillées sur ces essais sont disponibles dans la publication de Grégoire [9], d'où sont tirées les illustrations présentées.

4.6.1 Situation de référence : l'événement d'explosion standard

Les événements d'explosion reposent sur l'éjection de gaz en combustion hors d'une enceinte. De fait, des effets externes de pression et thermiques sont attendus devant l'événement. Les effets de pression sont dus à 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. Cet effet est particulièrement présent avec les explosions de gaz.

Les effets thermiques sont principalement limités 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 6, qui présente des images issues d'un essai d'événement standard soumis à une explosion de poussières. Dans cet essai la longueur de flamme est de 15 m.



Figure 6 : 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).

4.6.2 Essai d'un dispositif d'événement pare flamme

Lorsqu'un événement pare-flamme est correctement dimensionné, il n'y a plus d'effets thermiques significatifs hors de l'enceinte, en dehors des fumées chaudes. Néanmoins le passage des produits par le filtre implique une forte perte de quantité de mouvement si bien que le nuage de fumées s'éloigne peu du dispositif d'événement pare-flamme. La pression externe est également considérablement réduite, d'un facteur 10 environ, selon les données d'essai sur ce type de systèmes.

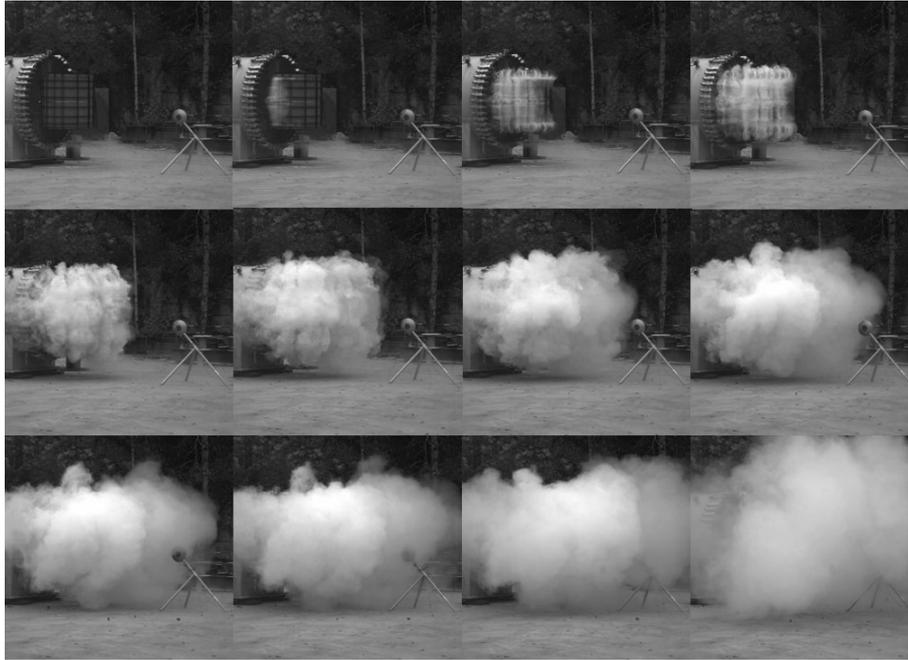


Figure 7 : Images de la décharge d'une explosion de poussières d'amidon de maïs par un événement d'explosion pare-flamme. La cuve est de volume 10 m^3 et l'événement de dimensions $0,586 \times 0,92 \text{ m}$.

La comparaison des signaux de pression enregistrés pour deux essais dans les mêmes conditions, l'un avec un événement standard et le second avec un événement pare-flamme permet d'illustrer certains des phénomènes décrits précédemment :

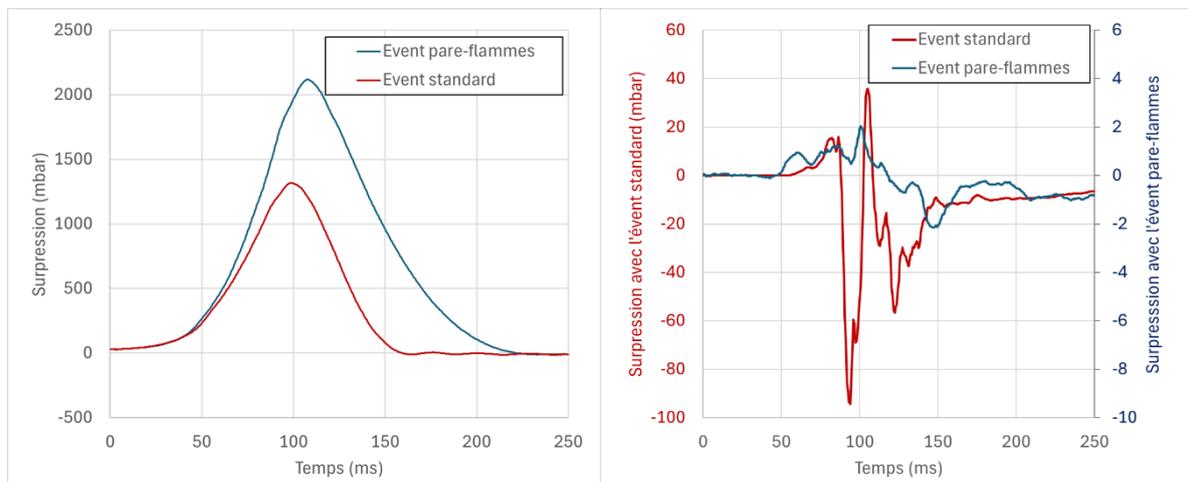


Figure 8 : Comparaison des signaux de pression internes (à gauche) et externes (à droite, capteurs à 3 m de l'événement) mesurés lors des essais d'un événement standard et d'un événement pare-flamme avec une explosion de 1 kg/m^3 d'amidon de maïs dans une cuve d'essais d'explosion de 1 m^3 , événements de dimensions $170 \times 470 \text{ mm}$

On constate bien que la mise en place du dispositif pare-flamme conduit à une surpression plus élevée dans l'enceinte, signe d'une efficacité moindre du système pour la décharge des gaz. En extérieur toutefois un facteur de l'ordre de 10 est visible sur le signal de surpression à 3 m des événements.

4.6.3 Sensibilité à la concentration en poussières

Lorsqu'une plus grande quantité de poussières est mise en œuvre, tout autre paramètre restant identique, on peut constater un blocage plus important du filtre du dispositif d'événement pare flamme, comme c'est le cas dans l'exemple de la Figure 9 :

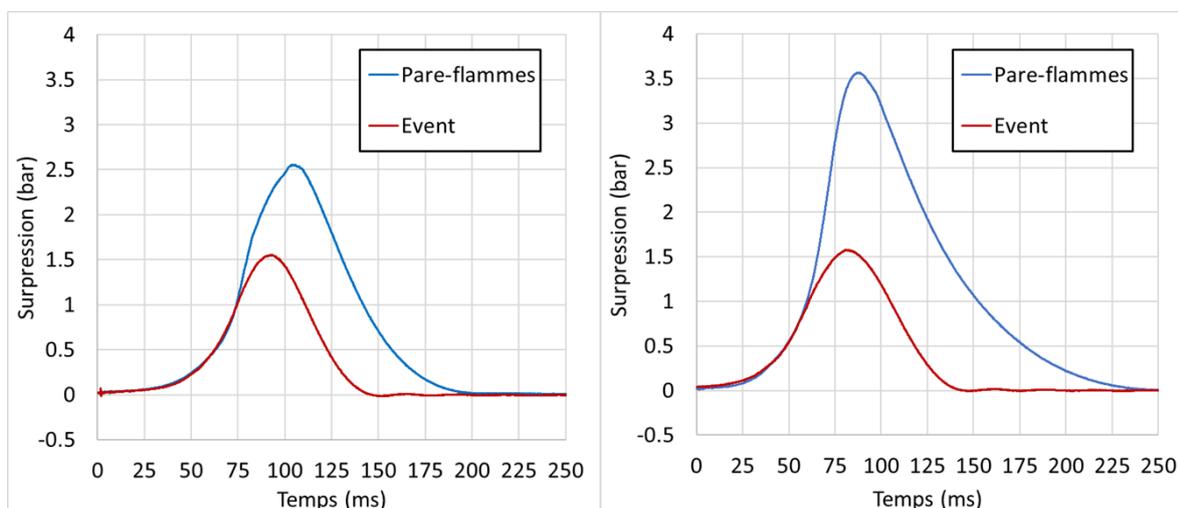


Figure 9 : Comparaison des signaux de pression internes mesurés lors d'essais d'un événement standard et d'un événement pare flamme avec une explosion de poussières de bois de concentrations 300 g/m^3 à gauche et 500 g/m^3 à droite. Cuve d'essais d'explosion de 1 m^3 , événements de dimensions $170 \times 470 \text{ mm}$.

On constate que pour le cas de l'événement standard le changement de concentration a eu peu d'effet. En effet pour cette poussière, dans cette gamme de concentrations, il y a peu de variation des paramètres de réactivité K_{St} et P_{max} . Avec le dispositif d'événement pare flamme, on met au contraire en évidence un effet considérable de la concentration, lié au colmatage du filtre.

A titre d'illustration, la Figure 10 présente un exemple de dépôt retrouvé à l'intérieur d'un dispositif d'événement pare-flamme. Il s'agit cette fois d'un dépôt de poussières d'amidon de maïs, carbonisé en apparence (sous cette croûte et en particulier au niveau du filtre de rétention de particules, on retrouve une majeure partie de particules non consommées).



Figure 10 : Dépôt de poussières d'amidon de maïs observé sur la partie intérieure du filtre après un essai d'événement pare flamme

4.6.4 Sensibilité à la nature des poussières

Suivant la nature des poussières, leur morphologie, dimension ou comportement dans des gaz chauds, on constate des effets de blocage plus ou moins sévères. On donne ici (Figure 13) l'exemple d'une comparaison entre une explosion de poussières de farine de blé et une explosion d'amidon de maïs :

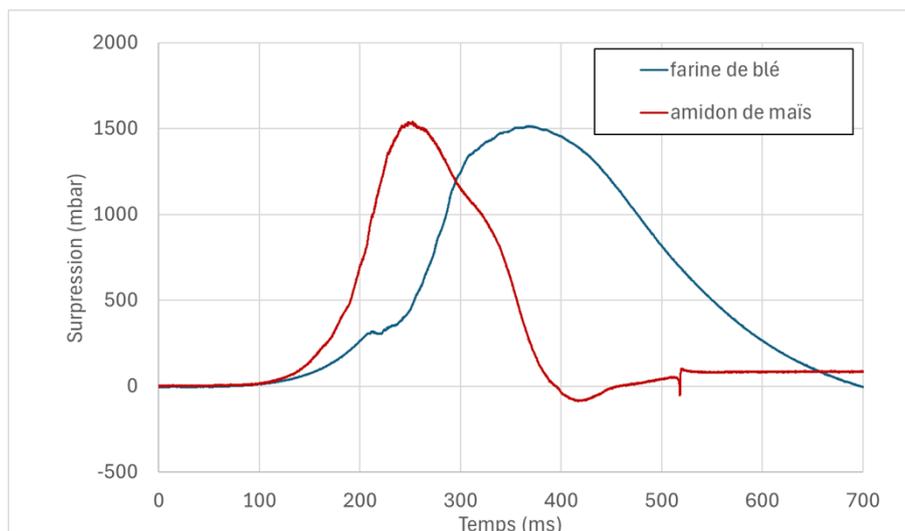


Figure 11 : Comparaison des signaux de pression internes mesurés lors d'essais d'un événement pare flamme avec une explosion de farine de blé et une explosion d'amidon de maïs, à 1000 g/m³ dans les deux cas. Cuve de 10 m³, événements de 586 x 920 mm.

Les deux poussières conduisent à la même surpression, ce qui est étonnant car le K_{St} de la farine de blé est voisin de 100 bar.m/s tandis que celui de l'amidon de maïs s'approche de 200 bar.m/s. **Toutes choses égales par ailleurs, selon les formules de dimensionnement des événements contre les explosions de poussières EN14491 ou NFPA68 (voir paragraphe 4.3.1) on devrait avoir un facteur de l'ordre de 4 entre les deux essais si effectivement l'événement sans flamme se comportait comme un événement standard.** En pratique l'observation de ces deux poussières au microscope (Figure 12) fournit une explication :

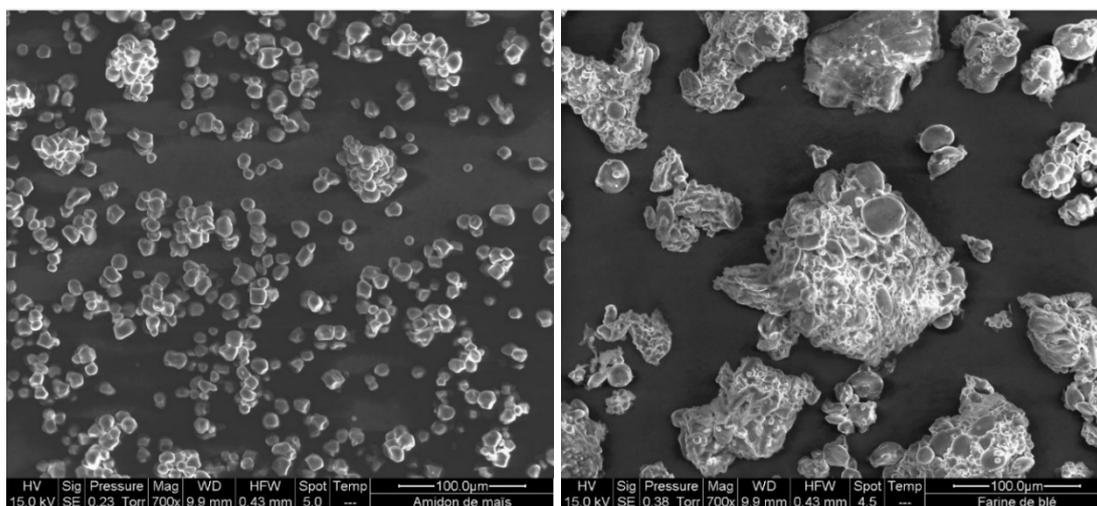


Figure 12 : Echantillons de poussières d'amidon de maïs (à gauche) et de farine de blé (à droite), observés au microscope électronique à balayage (grossissement 700x).

La farine de blé forme de nombreux agglomérats de diamètre voisin de 100 µm tandis que l'amidon de maïs se retrouve en amas de 15 à 50 µm. Il est intéressant de noter que le diamètre hydraulique des trous de l'écran de rétention de particules utilisé pour ces deux essais était de 80 µm.

4.6.5 Effets du filtre de rétention de particules

Ces résultats nous ont amené à examiner de plus près l'effet de cet écran de rétention de particules. Pour cela 3 tests ont été réalisés : un essai témoin avec un événement standard, un essai avec un dispositif d'événement pare flamme complet, incluant un filtre de rétention de particules, et un dernier essai identique mais sans cet écran.

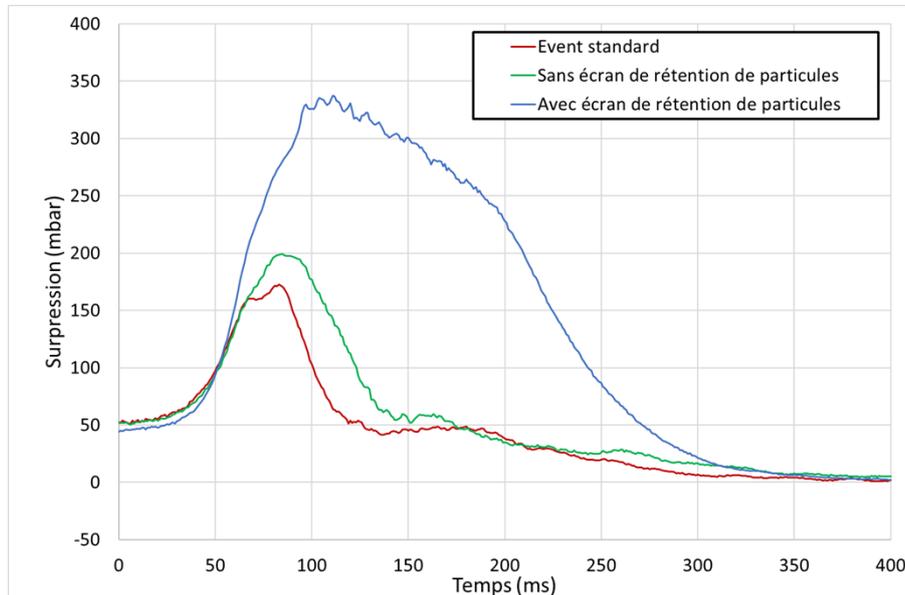


Figure 13 : Comparaison des signaux de pression interne mesurés lors d'essais d'un événement standard, d'un pare flamme complet, incluant un écran de rétention de particules et d'un autre identique mais sans l'écran de rétention de particules. Explosions de 500 g/m³ d'amidon de maïs, dans une cuve de 10 m³, événements de 586 x 920 mm

L'effet de l'écran est très clair dans ces essais. Cet aspect est important car il existe effectivement des dispositifs d'événements pare-flamme qui sont prévus pour fonctionner uniquement sur la base d'un refroidissement du mélange en combustion, sans essayer de retenir les réactifs à l'intérieur de l'enceinte. Néanmoins si ne pas essayer de retenir les particules, permet d'obtenir une meilleure efficacité de la décharge, cela ajoute un risque de produire une ATEX de poussières devant les grilles du filtre. Il est possible d'estimer l'étendue approximative de l'ATEX de poussières hors d'un événement pare-flamme avec ce modèle qui suppose une expansion hémisphérique du nuage autour du dispositif :

$$R_E = \sqrt[3]{\frac{3}{2\pi} \cdot \frac{c \cdot V}{CME}}$$

Avec :

- R_E , le rayon de l'ATEX externe, en supposant une hémisphère entourant le dispositif
- CME la concentration minimale explosive pour la poussière considérée, en g/m³
- c la concentration en particules dans l'enceinte protégée, en g/m³
- V le volume de l'enceinte protégée, en m³

Ce modèle est conservatif car il suppose l'absence totale de retenue des particules dans le filtre pare-flamme et néglige la consommation de réactifs dans l'enceinte protégée.

4.6.6 Effet de la limite en volume

Enfin, il est possible d'atteindre des conditions qui sont acceptables du point de vue de la décharge des gaz, avec une P_{red} dans l'enceinte qui reste sous le seuil de résistance de l'enceinte protégée, mais avec un échec de la fonction pare-flamme. En effet, comme expliqué précédemment, lors de la décharge, le système, en particulier le filtre s'échauffe. La durée de la décharge va être principalement liée à la vitesse de réaction, au volume et à la taille de l'évent pare flamme tandis que la température atteinte est liée à la pression et dépend notamment de la nature des particules. Des images d'un essai avec un éventage correct de l'explosion mais un échec de la fonction pare-flamme sont présentées dans la Figure 14 :



Figure 14 : Images capturées par une caméra HD standard lors de l'essai d'un dispositif pare-flamme de dimensions 350 x 650 mm avec 300 g/m³ d'amidon de maïs dans une cuve de 10 m³

Pour cet essai on a mesuré une efficacité de l'ordre de 60 % pour la décharge des gaz de l'explosion, ce qui reste représentatif de ce type de système. Toutefois, la caméra rapide met en évidence quelques flammes à l'extérieur et la caméra HD « lente » dont des images sont présentées dans la Figure 14, indique clairement un rougissement du filtre. Les mesures de température dans le filtre indiquent que la température a atteint au moins 900 °C dans les grilles. La même mesure dans un essai de configuration identique mais avec un dispositif pare-flamme deux fois plus grand (586 x 920 mm) conduit à des valeurs de l'ordre de 250 °C.

5 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.

5.1 Indépendance

Une barrière de sécurité doit être indépendante du scénario d'accident. Pour cela, il faut s'assurer :

- Qu'une défaillance d'un événement d'explosion pare flamme ne peut pas être la cause du scénario.
 - Le scénario redouté est celui d'une explosion. La défaillance d'un événement d'explosion pare-flamme ne peut pas être à l'origine d'une explosion.
- Que la performance de l'événement d'explosion pare-flamme n'est pas dégradée par l'occurrence des événements initiateurs.
 - L'événement d'explosion pare flamme voit sa performance altérée par l'explosion, par exemple lorsque son filtre est colmaté par des particules pendant l'explosion. La rétention de particules fait toutefois partie de son mode de fonctionnement normal. Si le système est correctement dimensionné, alors cet aspect a déjà été pris en compte et le système peut bien assurer son rôle de barrière. Le filtre pare-flamme doit être changé après avoir subi une explosion.

5.2 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 [2] 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.

5.3 Dimensionnement de l'événement pare-flamme

Comme discuté dans la partie 4.5 traitant de la phénoménologie, il existe des conditions pour lesquelles un dispositif d'événement pare flamme peut se comporter tout à fait comme un événement standard, en termes de décharge des gaz de l'explosion. Dans ce cas l'efficacité de ce système par rapport à un événement standard est réduite en raison de la perte de charge induite par le filtre, mais au final les mêmes approches que celles mises en œuvre pour les événements d'explosion standards peuvent être suivies (voir paragraphe 4.3.1.3). Dans ce cas, la détermination de la surface d'événement nécessaire repose sur la connaissance de la géométrie de l'enceinte (volume, rapport longueur/diamètre), des paramètres de réactivité de l'ATEX (K_G ou K_{St} , et P_{max}) de la pression maximale admissible (P_{red}), et de la pression statique d'ouverture de l'événement choisi (P_{stat}). Cela n'est possible qu'à condition de respecter un certain nombre de contraintes sur la géométrie de l'enceinte et le mélange réactif, de manière à s'assurer que le fonctionnement du filtre n'est pas perturbé.

Dans tout autre cas, l'événement pare flamme va être équivalent à une surface plus ou moins réduite suivant les conditions d'explosion. Grégoire [9] a proposé un modèle de calcul de l'efficacité, valable pour certains types d'événements pare flamme avec des explosions de poussières, et reposant sur la nature des particules, leur concentration et les dimensions de l'enceinte et de l'événement. Le modèle permet de calculer un coefficient d'efficacité relative pour chaque situation modélisée, qui vient corriger la surface d'événement à installer afin de prendre en compte le blocage du filtre par des particules.

Au-delà de l'efficacité de la décharge d'explosion, pour le dimensionnement correct d'un événement pare flamme, il est également fondamental de vérifier que les limites du certificat pour l'extinction des flammes ne sont pas franchies. Bien que couplées les problématiques de l'éventage et de l'extinction des flammes reposent sur des phénomènes physiques différents. Le dimensionnement correct de la partie décharge d'explosion ne garantit pas le succès de la fonction arrête-flammes.

5.4 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 secondes 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 dépend principalement de la pression d'ouverture de l'événement, liée à sa P_{stat} et à son inertie. Le passage des gaz dans le filtre se fait presque en même temps : les vitesses des gaz étant de l'ordre de plusieurs centaines de m/s pour une dimension de la chambre d'expansion de quelques cm à au plus 2 m.

5.5 Niveau de confiance

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

- Règles d'installation non respectées ;
- Obstruction ou endommagement du filtre par des facteurs externes (par exemple la corrosion) ;
- 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 ...) ;
- Maintenance insuffisante (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 pare flamme 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.

Pour les systèmes actifs 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 les systèmes passifs, il faudrait s'assurer que l'événement pare-flamme est dimensionné et placé pour prendre en compte tous les scénarios, qu'il n'y a pas de moyens d'isoler l'événement, que le système est dimensionné pour les pires cas y compris pour les cas fortes concentrations en poussières, 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.

5.6 Evolution des performances dans le temps

Le maintien des performances doit être assuré par la mise en œuvre de procédures et tests périodiques permettant de suivre et de valider les évolutions. La norme EN16009 indique que les informations pour l'utilisation de ces équipements doit inclure des recommandations sur l'inspection régulière du dispositif pour les aspects critiques affectant la fonctionnalité, tels qu'une fuite du dispositif de décharge d'explosion, un colmatage de l'élément d'extinction de flammes.

5.6.1 Choix et installation de l'évent pare-flamme

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'évent pare-flamme 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...);
- Les événements pare flamme 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 pare flamme 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'évent pare flamme ;
- Les forces de recul doivent être prises en compte lors du choix de l'emplacement et de la répartition des événements pare flamme. Les normes sur le dimensionnement des événements d'explosion, pour les gaz comme pour les poussières proposent des formules empiriques conservatives permettant d'estimer ces effets ;
- Les événements doivent pouvoir fonctionner sans être perturbés par un facteur extérieur 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 les grilles du filtre qui pourrait ralentir la décharge des gaz, sauf bien sûr s'il s'agit d'un accessoire tel qu'une couverture spécifiquement prévue à cet effet et correctement dimensionné. Il ne doit pas y avoir non plus de personnel dans les zones de danger autour de l'évent pare flamme ;
- Les événements doivent être correctement signalés de manière à empêcher les personnes de traverser la zone de danger ou se blesser en se cognant dedans.

5.6.2 Maintenance

Un événement d'explosion pare flamme est soumis aussi bien aux conditions internes du procédé, du côté de sa membrane, qu'aux conditions externes pour la chambre et le filtre. Il est soumis aux contraintes spécifiques du processus d'un côté et à des conditions variables de l'autre. Il est en particulier fondamental que le filtre reste intègre pour assurer sa fonction de sécurité et que la chambre soit fermée (si par exemple elle intègre un regard pour la maintenance).

De plus en plus de systèmes intègrent un regard ou un moyen de vérifier l'état de la membrane à l'intérieur du dispositif d'évent pare flamme. Lorsque cette membrane consiste en un événement standard, la technologie 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) ;
- Les procédés mettant en œuvre des substances pouvant coller la membrane ou obstruer le filtre par réaction avec l'air ou par condensation/cokéfaction.

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...).

Certains dispositifs d'événements pare flamme sont présentés comme réutilisables. Pour ces systèmes on sera particulièrement vigilant après une explosion sur les possibilités d'encrassement du filtre et d'endommagement de la membrane, dès lors qu'il ne s'agit pas d'un événement standard. Le fournisseur doit communiquer des recommandations pour le reconditionnement de son système qui doivent être suivies.

Le respect des instructions présentes dans le certificat est indispensable pour pouvoir valoriser le dispositif d'événement pare flamme en tant que barrière de sécurité.

5.6.3 Gestion des modifications

Toute modification du système d'exploitation, des paramètres associés ou du matériel doit faire partie d'un processus spécifique. La modification d'un système de protection ne peut être entreprise que dans le cadre d'un processus de gestion de modifications basé sur une analyse d'impact et réalisée par du personnel formé et compétent. Dans le cadre de la Directive 2014/34/UE, une modification du dispositif requiert une mise à jour du certificat CE de type (avec ou sans essai, selon la modification) par un organisme notifié.

En fonction de la phase du cycle de vie (conception, fabrication, qualification, exploitation et maintenance), la responsabilité du suivi de ces modifications peut être transférée du concepteur à l'utilisateur. L'objectif est de s'assurer que les modifications sont correctement revues et approuvées de manière à s'assurer que l'intégrité de sécurité prescrite est maintenue.

6 Références

- [1] Institut national de l'environnement industriel et des risques, Events 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, Disponible sur le site <https://www.ineris.fr>.
- [2] Ineris. « Evaluation de la performance des barrières techniques de sécurité - OMEGA 10 » (2018). Disponible sur le site <https://www.ineris.fr>.
- [3] Ineris. « Démarche d'évaluation des Barrières Humaines de Sécurité - OMEGA 20 » (2009). Disponible sur le site <https://www.ineris.fr>.
- [4] Proust, C., 1996, Dust explosions in pipes: a review. Journal of loss prevention in the process industries 9, 267–277.
- [5] Lewis B., Von Elbe G., 1987, Combustion, flames and explosions of gases: 3rd edition, Academic Press, London, ISBN 0-12-446751-2
- [6] Eckhoff R.K., 2003. Dust explosions in the process industries, 3. ed. ed. Gulf Professional Publ, Amsterdam.
- [7] Alfert, F., Fuhre, K., 1989. Flame and Dust Free Venting of Dust Explosions by Means of a Quenching Pipe, CMI Report No. 89 258201, Chr. Michelsen Institute(Norway).
- [8] Holbrow, P., 2006. Explosion Protection Using Flameless Venting – a Review. Health and Safety Laboratory Report No. EC/05/50 October 2006 – Explosion Safety Unit HSL – Harpur Hill Buxton Derbyshire.
- [9] Grégoire, Y., Leprette, E. and Proust, C. (2021) 'Flameless venting of dust explosion: Testing and modeling', Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 73, p. 104596. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104596>.
- [10] Ineris. « Phénoménologie et modélisation des explosions de gaz confinées - OMEGA 31 » (2022). Disponible sur le site <https://www.ineris.fr>.

