



(ID Modèle = 454913)

Ineris - 212043 - 2772100 - v2.0

28/02/2024

Vannes à clapet d'isolation d'explosion

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

INERIS

maîtriser le risque
pour un développement durable

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 équivalent 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; RODRIGUES MARTA

Approbation : Document approuvé le 28/02/2024 par PIQUETTE BERNARD

Table des matières

1	Fonction de sécurité assurée par une vanne à clapet d'isolation d'explosion.....	5
2	Objet de la fiche.....	7
3	Principales normes, directives et dispositions applicables aux vannes à clapet d'isolation d'explosion.....	9
4	Fonctionnement d'une vanne à clapet d'isolation d'explosion.....	10
4.1	Phénoménologie.....	10
4.1.1	Application d'une vanne à clapet d'isolation d'explosion pour un filtre.....	11
4.2	Illustration avec un système réel.....	14
4.3	Technologies et types de vannes à clapet d'isolation d'explosion.....	18
4.4	Les limites principales d'installation d'une vanne à clapet d'isolation d'explosion.....	19
4.5	Effets périphériques.....	20
4.6	Cas limite.....	21
5	Critères d'évaluation des performances.....	22
5.1	Indépendance.....	22
5.2	Efficacité.....	22
5.2.1	Positionnement des vannes à clapet d'isolation d'explosion.....	22
5.2.2	Dimensionnement et configuration des canalisations.....	23
5.3	Temps de réponse.....	23
5.4	Niveau de confiance.....	23
5.5	Evolution des performances dans le temps.....	24
5.5.1	Choix et installation d'une vanne à clapet d'isolation d'explosion.....	24
5.5.2	Tests périodiques et maintenance.....	24
5.5.3	Gestion des modifications.....	24
6	Références.....	25

Résumé

Ce document présente les informations relatives aux clapets anti-retour d'explosion qui représentent aujourd'hui la solution la plus répandue dans l'industrie pour l'isolation des canalisations entre des enceintes connectées, vis-à-vis d'explosions confinées dans ces mêmes enceintes. Ces systèmes de mitigation d'explosion sont essentiellement utilisés afin de fermer une canalisation normalement ouverte, avant l'arrivée d'une flamme et d'empêcher sa propagation aux enceintes connectées.

Les différentes technologies de clapets anti-retour d'explosion sont d'abord présentées en expliquant leur principe de fonctionnement, leurs avantages et leurs limites d'utilisation ainsi que les 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, Vannes à clapet d'isolation d'explosion, Document de synthèse relatif à une Barrière Technique de Sécurité (B.T.S.), Verneuil-en-Halatte : Ineris - 212043 - v2.0, 28/02/2024

1 Fonction de sécurité assurée par une vanne à clapet d'isolation d'explosion

Une vanne à clapet d'isolation d'explosion, parfois également nommée clapet anti-retour d'explosion, est un dispositif d'isolation d'explosion de poussières. Le principe de ces dispositifs est d'éviter qu'une explosion démarrante dans un équipement, par exemple un filtre, ne se propage au reste de l'installation ou à d'autres équipements via le réseau de tuyauterie.

Une explosion qui se propage dans une tuyauterie voit sa vitesse et sa pression augmenter fortement ce qui la rend très rapidement incontrôlable. Une vanne à clapet d'isolation d'explosion installée sur une canalisation connectée à une enceinte permet de fermer la canalisation avant l'arrivée de la flamme en cas d'explosion dans l'enceinte.

La fonction de sécurité d'une vanne à clapet d'isolation d'explosion consiste à empêcher la propagation de l'explosion dans une canalisation au-delà de sa position, et à rester fermée une fois cette fonction accomplie.



Figure 1 : Exemples de vannes à clapet d'isolation d'explosion

Très schématiquement, le fonctionnement d'une vanne à clapet d'isolation d'explosion repose sur la fermeture d'un (ou plusieurs) volet(s) interne(s), déclenchée directement ou indirectement (via une chaîne de commande, depuis un capteur) par l'explosion, accompagnée, ou non de mécanismes tiers (par exemple un ressort).

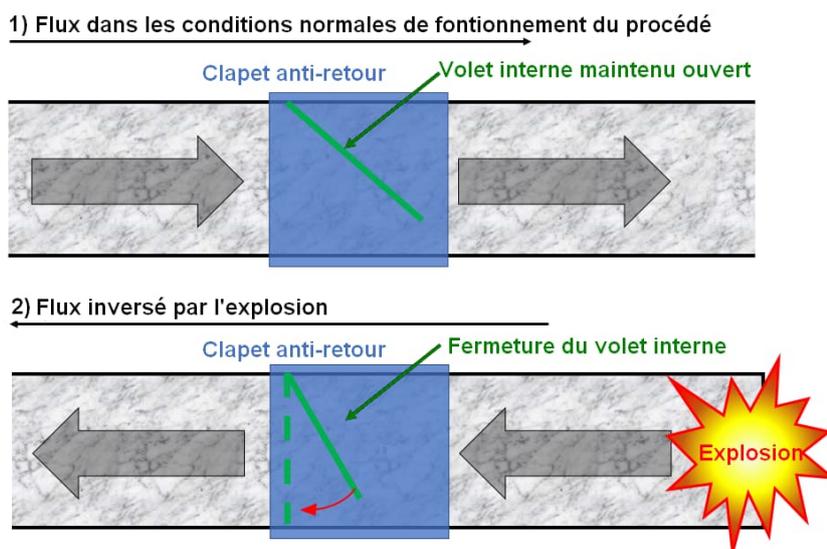


Figure 2 : Schéma de fonctionnement d'une vanne à clapet d'isolation d'explosion"

Les vannes à clapet d'isolation d'explosion peuvent être actives ou passives selon leur mode d'activation. Cette classification ne fait pas référence à la typologie en tant que barrière de sécurité (voir §2) mais à la technologie mise en œuvre par le clapet :

- Pour les vannes à clapet d'isolation d'explosion passives, les plus courantes dans l'industrie, la fonction de sécurité est initiée par le souffle de l'explosion dans la canalisation. Elles sont décrites comme passives car elles ne requièrent pas l'intervention d'un dispositif externe pour leur activation.
- Pour les vannes à clapet d'isolation d'explosion actives, la fonction de sécurité est initiée par une commande externe : typiquement une détection instrumentée de pression ou d'étincelle dans l'équipement en amont, qui déclenche un système mécanique, parfois pyrotechnique entraînant la fermeture du volet. **Les vannes à clapet d'isolation d'explosion actives ne font pas l'objet de cette fiche.**

Le présent document est focalisé sur les vannes à clapet d'isolation d'explosion passives pour les raisons suivantes :

- Tout d'abord, et c'est la raison la plus importante, les systèmes de vannes à clapet d'isolation d'explosion actifs sont très peu répandus dans l'industrie, au contraire de ceux qualifiés de passifs. Le gain en termes de coûts, simplicité de mise en œuvre et maintenance de ces derniers est à l'origine de cette différence.
- Ensuite, les vannes à clapet d'isolation d'explosion actives sont souvent des vannes à clapet d'isolation d'explosion passives équipées d'une chaîne de déclenchement automatisée. Ainsi une large partie des observations valables pour les vannes à clapet d'isolation d'explosion passives reste valable pour la version active de ces systèmes. Les différences principales apparaissent dans la chaîne de détection et d'activation du système.
- Enfin du point de vue normatif ces systèmes sont traités différemment : pour les vannes à clapet d'isolation d'explosion passives, il existe une norme spécifique EN16447, tandis que les vannes actives sont décrites par la norme EN15089 qui s'applique à tous les autres systèmes d'isolation, qu'ils soient actifs ou passifs.

Les vannes à clapet d'isolation d'explosion peuvent assurer un rôle secondaire dans les procédés industriels pour empêcher d'éventuelles inversions du sens de l'écoulement dans une canalisation de transport. Il s'agit d'une fonction de conduite et non d'une fonction de sécurité. Cet aspect n'est donc pas abordé dans la présente fiche.

2 Objet de la fiche

Cette fiche présente des éléments de synthèse relatifs à l'évaluation des performances des vannes à clapet d'isolation d'explosion 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 soit fournie.

L'article 2 de cet arrêté stipule 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 stipule 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) et humaines (Ω 20) de sécurité.

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

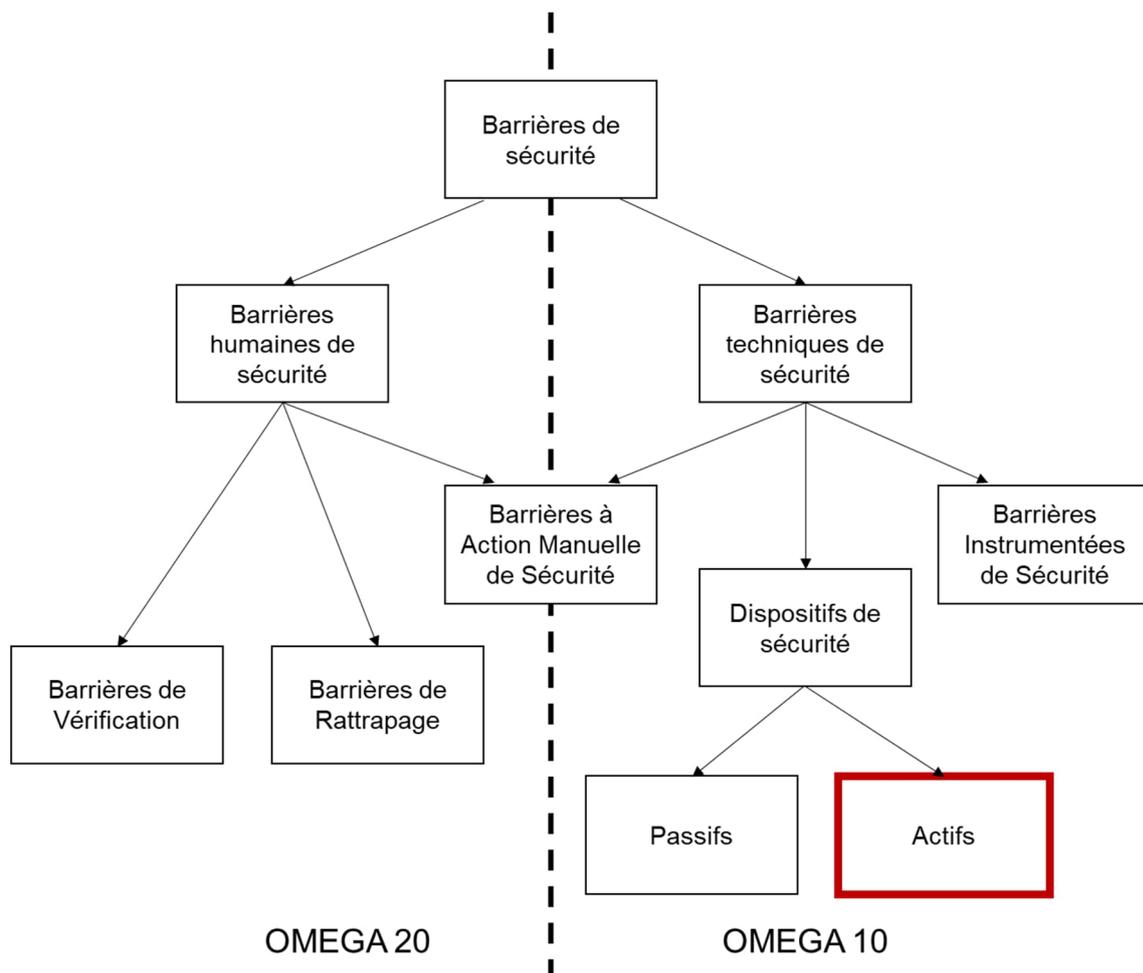


Figure 3 : Typologie des Barrières de Sécurité, Ω 10

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 barrières instrumentées de sécurité (BIS) sont constituées par une chaîne de traitement comprenant une prise d'information (capteur, détecteur...), un système de traitement (automate, calculateur, relais...), une action (actionneur avec ou sans intervention d'un opérateur) et des moyens de communication pour réaliser une fonction de sécurité.

Les vannes à clapet d'isolation d'explosion à activation passive correspondent bien à des dispositifs de sécurité 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.

Le présent document donne les éléments essentiels sur les clapets anti-retour d'explosion, 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 vannes à clapet d'isolation d'explosion

Les vannes à clapet d'isolation 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 de clapets anti-retour. Ainsi, il existe en Europe :

- Une norme harmonisée dédiée spécifiquement aux vannes à clapet d'isolation d'explosion : NF EN 16447 Vanne et clapet d'isolation d'explosion (2014).
- Une norme harmonisée dédiée aux systèmes d'isolation d'explosion, dont font partie ces clapets anti-retour : NF EN 15089 Systèmes d'isolement d'explosion (2009). Néanmoins ce document propose une approche très générale sur les systèmes d'isolation d'explosion et est techniquement insuffisant pour le cas des clapets anti-retour d'explosion. Il fait par ailleurs référence au document précédent (NF EN 16447) pour ce cas spécifique.

Aux Etats-Unis, on citera le guide NFPA 69 (2024) : Standard on Explosion Prevention Systems, qui inclut une relativement courte description (sur 2 pages) des systèmes d'isolation, résume leur rôle, leur fonctionnement et les limites générales. Contrairement à la norme Européenne NF EN 16447 (2014), ce guide ne fournit pas de préconisations détaillées sur les essais auxquels les vannes à clapet d'isolation d'explosion devraient être soumis en vue d'une possible certification de ces derniers comme systèmes d'isolation d'explosion.

A l'écriture du présent document, en 2023, la norme NF EN 16447 (2014) sur les vannes à clapet d'isolation d'explosion est également en cours de révision. Cette version de 2014 présente des insuffisances majeures pouvant conduire à la certification de systèmes de protection inefficaces dans des conditions pourtant autorisées par la norme. On retiendra par exemple qu'elle préconise des configurations d'essais mal encadrées qui laissent de nombreuses ambiguïtés sur les performances des systèmes testés, via :

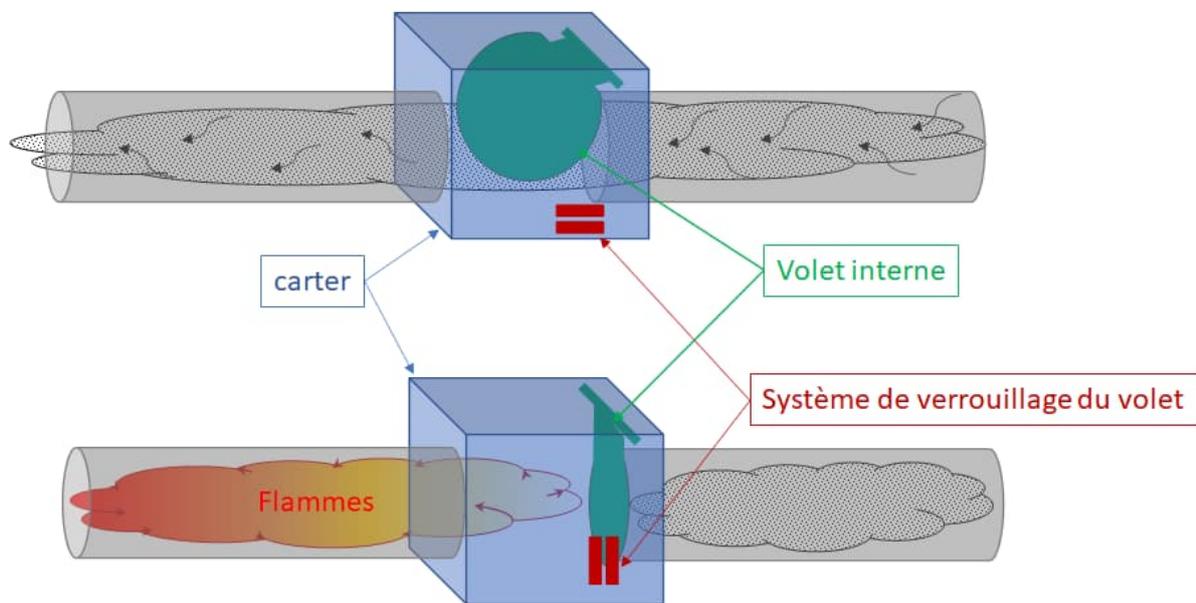
- L'absence d'une obligation d'avoir une canalisation en aval du clapet pour les essais. Or, cette canalisation, nécessairement présente sur les procédés industriels réels, joue un rôle fondamental sur le fonctionnement du clapet. Du fait de l'interruption soudaine de l'écoulement à la fermeture du clapet, elle peut induire une forte succion sur le volet interne du clapet, puis des oscillations de pression non synchronisées avec celles induites par l'explosion en amont. Le différentiel de pression après la fermeture du clapet, est susceptible de conduire à une rupture du système de verrouillage de ce dernier, s'il n'a pas été prévu pour cette situation. Le cas échéant cela conduit à une réouverture du volet et un échec de l'isolation. Ce type d'évènement est d'autant plus marqué que le clapet est grand.
- L'absence de nécessité de tester l'effet de la présence de coudes dès lors qu'une longueur de tube droit de 5 diamètres de canalisation est placée derrière le clapet, du côté non soumis à l'explosion. Il a été constaté expérimentalement que les coudes peuvent avoir un effet sur la fermeture du clapet, y compris lorsque celui-ci est suivi d'une canalisation.

4 Fonctionnement d'une vanne à clapet d'isolation d'explosion

4.1 Phénoménologie

La situation de référence dans un procédé industriel est celle d'une enceinte totalement ou partiellement confinée, équipée d'évents ou de systèmes de suppression d'explosion, connectée à d'autres équipements via un réseau de canalisations, et dans lequel une atmosphère explosive (ATEX) de poussières est présente ou peut se former. Pour le cas des clapets anti-retour, cette ATEX ne peut être qu'un mélange de particules en suspension dans l'air. Les ATEX d'une autre nature, telles que les gaz combustibles-oxydants ou les mélanges hybrides¹, ne sont pas couvertes. La vanne à clapet d'isolation d'explosion est typiquement composée d'un carter, en général de dimensions supérieures au diamètre de la canalisation qu'elle doit protéger, qui contient un volet interne, maintenu ouvert en fonctionnement normal et refermé avant l'arrivée de la flamme, puis verrouillé par un système dédié (Figure 4).

Fonctionnement normal, volet interne maintenu ouvert par l'écoulement



En cas d'explosion volet interne fermé et arrêt des flammes

Figure 4 : Schéma d'une vanne à clapet d'isolation d'explosion et de son fonctionnement

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

4.1.1 Application d'une vanne à clapet d'isolation d'explosion pour un filtre

La Figure 5 illustre un exemple d'application pour un filtre. Le scénario redouté est celui d'une inflammation en un point quelconque de l'enceinte, suivie d'une combustion suffisamment rapide pour pouvoir qualifier l'évènement d'explosion plutôt que d'incendie.

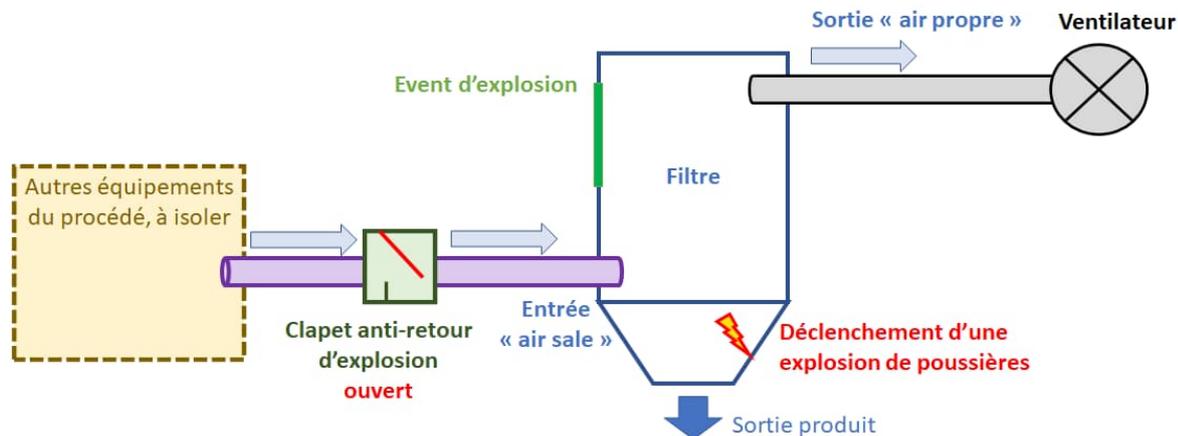


Figure 5 : Exemple d'application d'une vanne à clapet d'isolation d'explosion – 1) à l'instant de déclenchement de l'explosion

Dans l'exemple utilisé ici, le transport des particules dans le procédé est assuré par un ventilateur aspirant le flux d'air. Dans la norme EN16447 (2014), il s'agit d'une configuration dénommée : « situation de flux en aspiration » ou « pull-flow » dans la version anglo-saxonne. Si le ventilateur se trouve en amont du filtre et donc poussant le fluide vers le filtre, on parle de « situation de flux en pression » ou « push-flow » dans la version anglo-saxonne. Au stade de la description phénoménologique envisagée ici, ces deux situations sont équivalentes.

De manière très simplifiée, la flamme se développe depuis le point d'inflammation. Elle 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. Dans cet exemple on considère une ATEX dans des conditions optimales de remplissage, de distribution dans le volume et de réactivité (vers 500-1000 g/m³ pour les poussières dans l'air).

Dans cet exemple, l'enceinte est connectée à une canalisation sur laquelle est placée une vanne à clapet d'isolation d'explosion, et protégée par un événement d'explosion. En pratique, il peut également s'agir d'un système de suppression d'explosion. Le principe des événements d'explosion² est de permettre à une partie des gaz de se détendre dans un volume plus grand, externe, et limiter la hausse de pression. Il s'agit très schématiquement de portes qui s'ouvrent sur l'enceinte à une pression donnée, inférieure à la pression maximale atteinte dans l'enceinte par l'explosion, elle-même inférieure à la pression admissible dans l'enceinte³. Les suppresseurs d'explosions peuvent être vus comme des extincteurs suffisamment rapides pour éteindre l'explosion dans l'enceinte avant que la pression ne dépasse le seuil de résistance de cette dernière. Quelques ordres de grandeur permettent de mieux situer la problématique :

- La pression maximale d'explosion est de l'ordre de 7 à 12 bar pour les ATEX de poussière. Sa valeur est directement liée à la température des gaz de combustion et moins à la vitesse de la réaction. Ainsi même des poussières considérées comme peu réactives vont développer des surpressions d'explosion de plusieurs bars.
- En comparaison la résistance des équipements industriels est liée à leur nature, leurs dimensions et aux matériaux de construction. Typiquement un broyeur est un organe relativement résistant qui peut être dimensionné pour résister à quelques bar (0.5 à 3 bar en général) mais ce n'est pas le cas d'un filtre, souvent constitué de parois fines, tenant difficilement au-delà de quelques centaines de mbar.
- Les événements d'explosion sont le plus souvent calibrés pour s'ouvrir vers 50, 100 ou 200 mbar de surpression, et la pression réduite de l'explosion dans l'enceinte, pour un système bien dimensionné est proche mais toujours au-delà de cette valeur. Avec un suppresseur d'explosion on atteindra également des surpressions de l'ordre de la centaine ou quelques centaines de mbar.
- Enfin pour transporter les poussières dans les canalisations d'un procédé, on considère que des différences de pression de l'ordre de 5 à 10 mbar suffisent pour atteindre des vitesses de flux de l'ordre de 30 m/s, souvent retenues dans ce type de procédé.

On comprend alors immédiatement que l'explosion dans l'enceinte conduira aisément à une inversion de l'écoulement dans la canalisation de transport : c'est un nuage de poussières combustibles, parcouru par une flamme qui est alors propulsé dans toutes les canalisations connectées à l'enceinte à l'origine de l'explosion⁴ (peu importe le système de protection présent sur cette dernière, événement ou suppresseur d'explosion).

En pratique, on arrive rapidement à la situation d'une enceinte pressurisée, connectée à un tube débouchant, tant que le clapet est ouvert, sur une zone ouverte (un autre équipement du procédé). Un ordre de grandeur de la vitesse des gaz dans la canalisation peut être obtenu avec un modèle tel que l'équation de Bernoulli, la vitesse est proportionnelle à la racine de la différence de pression entre les enceintes :

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}} \quad (1)$$

Où ρ est la masse volumique du fluide. Par exemple pour un écart de pression de 100 mbar, dans l'air, on atteint une vitesse de l'ordre de 130 m/s.

L'enjeu, et le but, des systèmes d'isolation que sont les vannes à clapet d'isolation d'explosion, est alors de fermer la canalisation avant le passage de la flamme. La fermeture étanche de la canalisation protège également les équipements en amont⁵ contre une partie des effets de pression de l'explosion.

² Consulter la fiche « Events d'explosion » pour plus d'information

<https://www.ineris.fr/fr/events-explosion-document-synthese-relatif-barriere-technique-securite-bts>

³ 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 système de mitigation d'explosion.

⁴ Implicitement cela signifie qu'il faudrait isoler également les canalisations du côté air propre pour les filtres, or ce n'est pas réalisé systématiquement dans les procédés industriels.

⁵ Vis-à-vis du sens normal de l'écoulement.

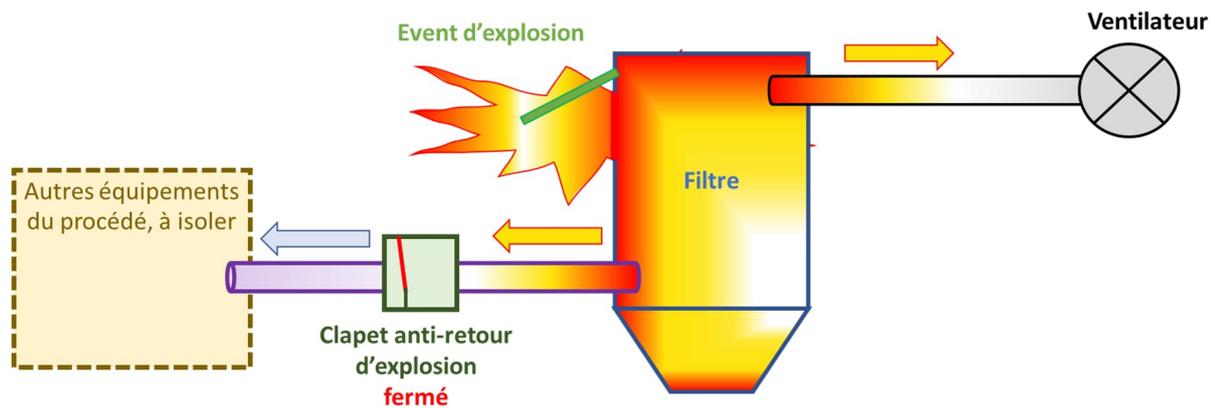


Figure 6 : Exemple d'application d'une vanne à clapet d'isolation d'explosion – 2) fermeture du clapet anti-retour avant l'arrivée de la flamme, et évacuation des gaz brûlés par l'évent

Toutefois la fonction de la vanne à clapet d'isolation d'explosion ne s'arrête pas à l'état schématisé en Figure 6. En effet, à l'instant de fermeture la colonne de gaz en mouvement dans la canalisation isolée, est bloquée par le clapet fermé. Les deux côtés du volet interne du clapet sont exposés à des effets de pression qui peuvent s'additionner comme s'opposer :

- Du côté protégé, non exposé à la flamme, il y a, en cas de succès de l'isolation, un nuage de gaz frais (donc dense) se déplaçant relativement vite (typiquement de 10 à 300 m/s) vers les autres équipements du procédé. Ce nuage en mouvement passe soudainement d'une situation où il est poussé par la flamme par effet piston, à une situation de nuage quittant un tube à fond fermé. Il se crée par effet inertiel une succion au niveau du fond fermé, donc dans le clapet à proximité du volet. Cela résulte en une dépression, tandis que l'onde de compression initiale finit par quitter le tube en arrivant dans l'équipement connecté. Avec un tube en dépression, l'étape suivante est très logiquement, le retour d'une onde de compression vers le clapet.
- Du côté exposé à la flamme, l'inertie de la colonne de gaz frais et brûlés s'ajoute à l'effet acoustique de l'onde de pression qui se réfléchit sur le volet fermé. La pression dans le clapet, du côté exposé à la flamme peut alors augmenter fortement – les travaux de Grégoire (2019) font état d'un facteur 2 à 4 par rapport à la pression maximale atteinte dans l'enceinte, dans de nombreuses configurations d'essai. Cette compression au niveau du clapet entraîne une inversion de l'écoulement dans cette portion de canalisation. Le retour de gaz chauds et comprimés dans l'équipement qui subit l'explosion est susceptible d'y augmenter la surpression via deux mécanismes : l'ajout de gaz dans l'enceinte et une intensification de la combustion dans l'enceinte.

Au passage, on retient que si l'onde de compression revient au clapet alors que l'écoulement dans la zone non protégée se fait vers l'enceinte, il existe un risque de réouverture du clapet (par exemple en cas de rupture du système de verrouillage).

Ces phénomènes sont illustrés dans le schéma de la Figure 7.

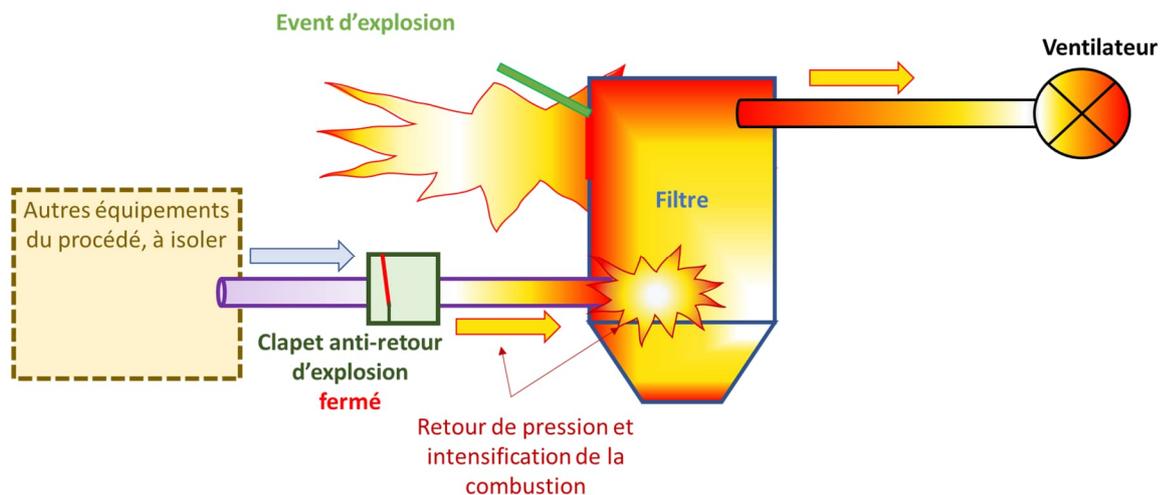


Figure 7 : Exemple d'application d'une vanne à clapet d'isolation d'explosion – 3) fonctionnement du clapet anti-retour et évacuation des gaz brûlés par l'évent.

A plus long terme, alors que l'explosion s'éteint progressivement dans l'enceinte, il reste des oscillations acoustiques autour du clapet : d'un côté du volet il y a des gaz frais et denses, de l'autre des gaz chauds mais peu denses. La vitesse du son dans le milieu, proportionnelle à la racine carrée de la température, détermine la fréquence des oscillations, et, avec la longueur des canalisations, peut varier du simple au triple. Il n'est pas possible de donner une règle générale sur l'occurrence du phénomène mais il reste tout à fait probable de retrouver des phases susceptibles de conduire à une réouverture du clapet, avant l'extinction complète des flammes, alors que l'événement initial d'explosion semble terminé. Dans ce cas, un échec de l'isolation peut être constaté, avec pour conséquence de nouvelles explosions dans les équipements connectés. Sippel (2016) et Grégoire (2024) ont mis en évidence ce phénomène dans leurs travaux.

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

Ce type de situation peut apparaître avec des mélanges très réactifs (tels que des poussières métalliques), et en général dans des conditions d'amorçage très fortes de l'explosion (par exemple une inflammation par une autre explosion).

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

4.2 Illustration avec un système réel

Afin d'illustrer les points précédents, on prend pour exemple un essai réalisé à l'Ineris. On considère le cas d'une vanne à clapet d'isolation d'explosion positionnée sur une canalisation de diamètre 160 mm, à 5 m d'une cuve de 1 m³ dans laquelle une explosion de poussières de bois a été déclenchée. La cuve est également équipée d'une paroi frangible afin de limiter les effets de pression internes à moins de 400 mbar en l'absence de clapet. Une portion de tube droit de 2 m de long est présente à la sortie du clapet. Les tubes sont en PMMA, donc transparents ce qui permet de visualiser la propagation de la flamme dans ces derniers. Une image acquise pendant l'essai est présentée en Figure 8.



Figure 8 : Image de la caméra HD capturée pendant un test à l'Ineris de vanne à clapet d'isolation d'explosion. Clapet à 5 m d'une cuve de 1 m³, protégée par évent et dans laquelle un nuage de poussières de bois est enflammé. Le clapet est flouté pour des raisons de confidentialité.

Le clapet testé dans cet exemple est un système réel, certifié suivant la norme EN16447, qui dispose d'un système de retenue permettant de maintenir le clapet ouvert tant que la vitesse du flux d'air dans la canalisation est inférieure à 40 m/s. Lorsque ce seuil est dépassé, le volet interne est libéré, il est alors soumis à son propre poids et à l'écoulement dans la canalisation.

La Figure 9 présente une séquence d'images produites lors de cet essai par une caméra rapide cadencée à 10 000 images par seconde. Pour des raisons pratiques, on ne présente ici que certaines images, espacées de 10 ms, permettant de visualiser l'effet de la fermeture du clapet sur la propagation de la flamme dans le tube transparent.

On observe sur la Figure 9 que la flamme apparaît dans le tube dès la seconde image et atteint le clapet à la quatrième image de la séquence, soit 20 ms plus tard. Cela correspond à une vitesse moyenne de 200 m/s (chacun des tubes transparents est long de 2 m). Le clapet se ferme progressivement sur la même période, de 65 à 85 ms après l'inflammation.

- A la fermeture du clapet, il existe une contre-pression devant celui-ci, du côté exposé à l'explosion, qui est plus forte que la pression dans la cuve. L'écoulement s'inverse et la flamme repart vers la cuve.
- Du côté protégé, la flamme n'est pas passée, et on observe d'abord un assombrissement derrière le clapet. Le fond du tube a été coloré en noir pour favoriser le contraste en cas de passage des flammes. Juste après la fermeture du clapet, le fond du tube est visible car le nuage s'éloigne du clapet, la concentration en poussières s'affaiblit et on « génère du vide ». Quelques instants plus tard, le nuage revient avec une onde de compression provenant de l'atmosphère présente au bout du tube.

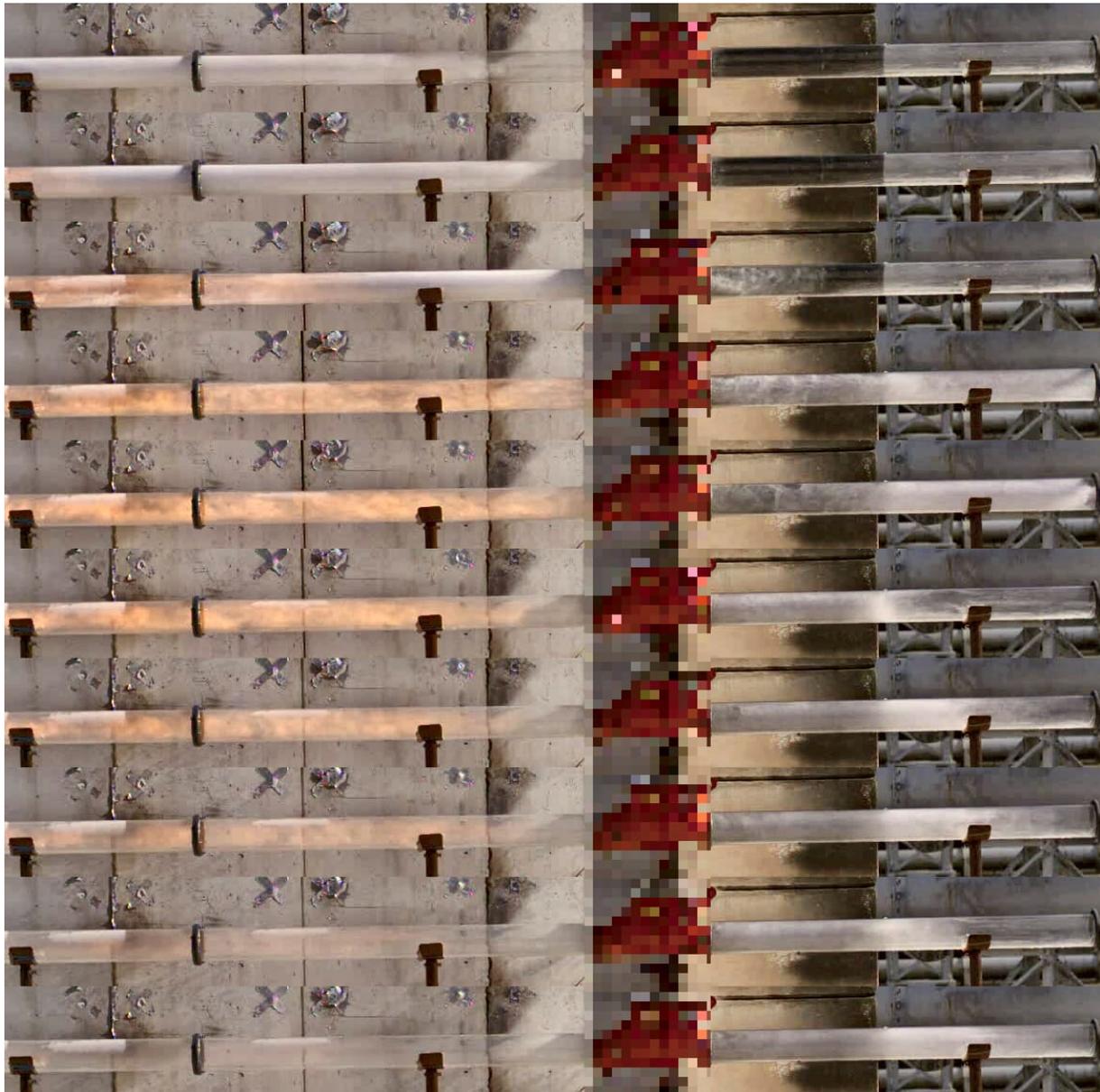


Figure 9 : Images de la caméra rapide cadencée à 10000 images par seconde, capturées lors de d'un test à l'Ineris de vanne à clapet d'isolation d'explosion. Le clapet est à 5 m d'une cuve de 1 m³ (à gauche, non visible sur les images), protégée par évent et dans laquelle un nuage de poussières de bois est enflammé. Il y a ici 10 ms entre les images affichées et la première image a été prise 50 ms après l'inflammation. Le clapet se ferme progressivement entre 65 ms et 85 ms, il est flouté pour des raisons de confidentialité.

*à gauche sur l'image : le côté non protégé
à droite sur l'image : le côté protégé*

Lors de l'essai la pression est mesurée dans la cuve ainsi que de chaque côté du clapet (Figure 10).

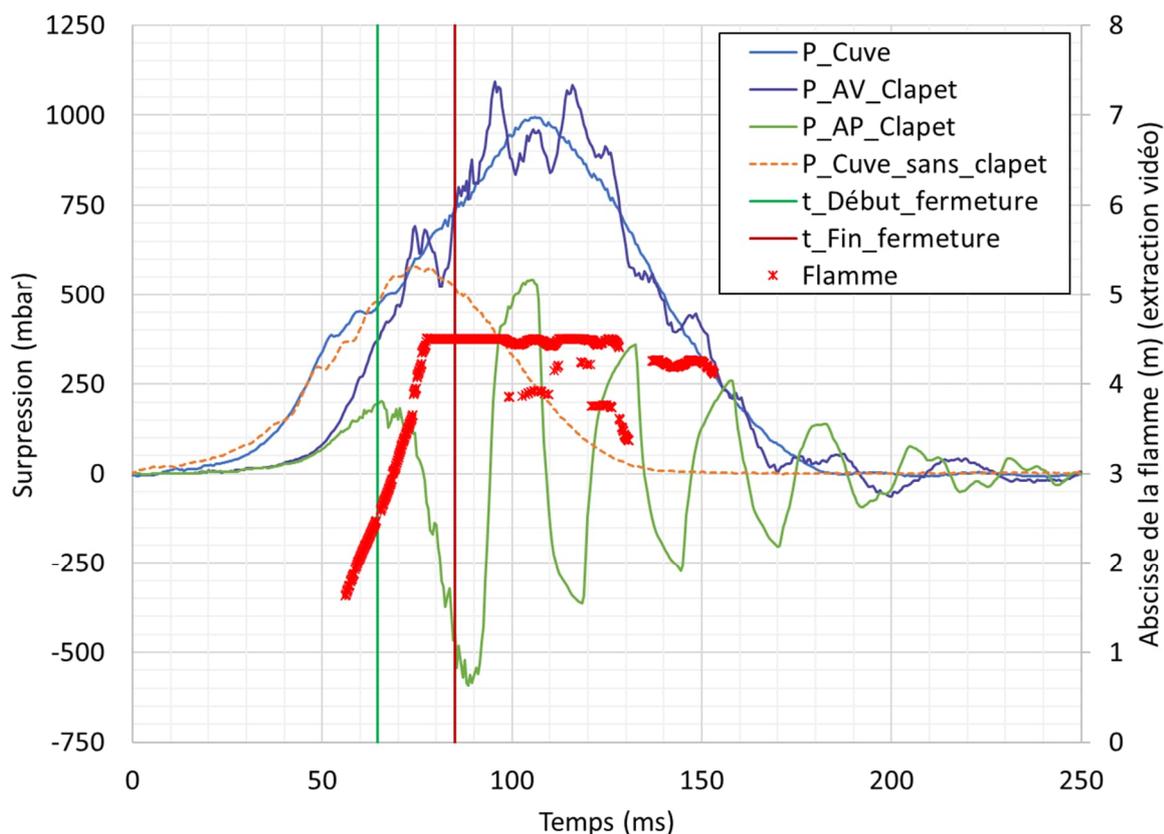


Figure 10 : Mesures de pression et de trajectoires de flamme lors de l'essai de la vanne à clapet d'isolation d'explosion

Ces courbes illustrent plusieurs évolutions importantes présentées dans le paragraphe précédent :

- D'abord, au déclenchement de l'explosion dans la cuve à $t = 0$, c'est la pression dans la cuve qui augmente progressivement (P_Cuve).
- Vers $t = 80$ ms après déclenchement de l'explosion, c'est la pression proche du clapet qui croît (P_AV_Clapet). Cet écart est dû au temps nécessaire à l'onde acoustique pour arriver jusqu'au clapet (à 5 m de la cuve).
- Ensuite la mise en mouvement des gaz finit par déclencher la fermeture du clapet, initialement ouvert. A ce moment les pressions mesurées de part et d'autre du clapet suivent la même évolution.
- A l'approche de la fermeture, on constate au niveau du clapet une rupture dans les pentes des signaux de pression. Du côté exposé à l'explosion (P_AV_Clapet), une forte augmentation, due à la réflexion acoustique de la pression sur le volet et l'arrêt de la colonne de gaz. Du côté protégé (P_AP_Clapet), une dépression due à un effet de succion du gaz s'éloignant du volet fermé. Au total, le volet interne du clapet est exposé à une différence de pression maximale de près de 1,4 bar, entre l'avant et l'arrière du clapet.
- Le front de flamme s'immobilise à l'instant de fermeture. Dans cet exemple, le clapet, placé à 4,5 m est parvenu à isoler la flamme. La trajectoire du front de flamme, mesurée par traitement d'image sur la vidéo rapide, atteint un palier à 4,5 m car le clapet n'est pas transparent. En réalité la flamme est bien entrée dans le clapet et est restée bloquée devant le volet 30 cm plus loin. Du côté protégé, aucune flamme ou étincelle n'a été détectée.
- Du fait de la pression plus élevée au niveau du clapet du côté exposé à la flamme, l'écoulement s'inverse et revient vers la cuve. On constate un retour de pression qui peut être accompagné d'une intensification de la combustion dans la cuve. A titre indicatif, la Figure 10, présente également la courbe de pression obtenue lors de l'essai de référence, sans clapet sur la canalisation (P_Cuve_sans_clapet). On constate bien ici un effet significatif du clapet sur l'explosion dans la cuve.

- Du côté protégé, la dépression est rapidement compensée par une onde de compression arrivant du bout du tube, qui se réfléchit sur le volet puis entraîne une nouvelle dépression.
- A plus long terme, il y a d'un côté du clapet des gaz peu denses mais chauds, dans lesquels la vitesse du son est plus importante que dans l'air et de l'autre des gaz froids assimilables à de l'air, qui oscillent. Les oscillations se font à des fréquences différentes et il n'est pas rare d'observer des situations où il y a plus de pression du côté protégé que du côté exposé à l'explosion. La force de pression exercée sur une surface étant égale au produit de ces deux termes, il est possible, en particulier pour les plus grands clapets d'obtenir dans cette situation des efforts significatifs capables de rompre les systèmes de verrouillage des clapets et de rouvrir ces derniers (il existe dans ce cas un risque de laisser passer les flammes).

Par exemple, une différence de 50 mbar sur un clapet de DN800 est équivalente à 2500 N, soit une masse de 250 kg posée sur le mécanisme de verrouillage. Cela peut poser problème car lorsque le volet interne est fermé, il repose sur un joint sur toute sa périphérie. A l'opposé, le système de verrouillage a un effet plus localisé car il consiste le plus souvent en une ou plusieurs butées anti-retour qu'il reste possible de déverrouiller, parfois sans outils. Des efforts importants concentrés sur quelques points, plutôt que repartis uniformément, sont plus susceptibles d'endommager le clapet.

4.3 Technologies et types de vannes à clapet d'isolation d'explosion

Compte tenu de la grande diversité des solutions existantes pour les vannes à clapet d'isolation d'explosion, il est difficile d'élaborer une liste exhaustive des différentes technologies disponibles actuellement pour ces systèmes.

On retiendra que l'architecture générale de ces systèmes se compose :

- D'un carter de dimensions en général comparables au diamètre de la canalisation. Plusieurs raisons peuvent expliquer ce choix technologique : il s'agit d'abord de limiter au maximum les pertes de charges lorsque le procédé industriel est en fonctionnement. L'objectif pour ce système est d'induire un minimum de perturbations au procédé à protéger mais aussi d'effectivement limiter les effets des explosions. Une section de passage plus faible, induit une accélération locale de l'écoulement et donc des flammes plus rapides, tandis qu'un large espace de détente serait propice à l'émergence d'explosions secondaires dans le corps du clapet.
- D'une ou plusieurs membranes permettant d'assurer la fermeture de la canalisation. Il s'agit en général d'un volet métallique, qui vient obturer la sortie de la vanne en cas d'explosion. Pour être efficace cette membrane doit se fermer le plus rapidement possible (les raisons pour ce point sont discutées dans le paragraphe suivant). Cela a pour conséquences le choix de volets se fermant sur des longueurs angulaires aussi courtes que possible (< 60° en général) ou l'utilisation de plusieurs volets côte à côte, avec le moins de frottements possible (les axes de rotation sont sur des roulements à billes plutôt que des paliers lisses), et une inertie limitée (pour une mise en mouvement rapide). Cette membrane vient généralement s'appliquer sur un joint qui peut être de différentes natures, suivant l'application visée pour la vanne à clapet d'isolation d'explosion.
- D'un système de verrouillage, qui a pour but de maintenir le volet fermé un fois qu'il s'est déclenché. Comme illustré précédemment, l'évènement n'est pas terminé dès lors que le volet est fermé car l'isolation brusque de la canalisation entraîne des oscillations de pression importantes pour une durée longue par rapport aux temps caractéristiques de l'explosion. Ces oscillations sont susceptibles de conduire à la réouverture d'un volet mal conçu avec transmission des flammes, ce qui explique la nécessité d'un dispositif de verrouillage fermé des vannes à clapet d'isolation d'explosion. Le système de verrouillage peut être situé dans le clapet ou en dehors et peut s'appliquer directement au volet ou à d'autres parties mobiles telles que l'axe de rotation ou un contrepoids ou vérin externe.

En dehors de ces trois éléments fondamentaux, plusieurs équipements peuvent compléter la vanne à clapet d'isolation d'explosion. Il s'agit dans la plupart des cas :

- De systèmes d'aide à la fermeture tels qu'un ressort.
- De dispositifs de retenue mécanique, tels qu'un contrepoids, permettant d'utiliser le clapet même lorsque l'écoulement du procédé et celui de l'explosion suivent la même direction.
- D'autres systèmes de protection tels qu'un évent d'explosion, permettant de limiter la surpression devant le volet. Dans ce cas par exemple, la vanne à clapet d'isolation d'explosion pourra probablement mieux résister aux effets de l'explosion et pourra être installée plus loin sur la canalisation, mais elle ne pourra pas être placée en zone ATEX, et pourra être à l'origine d'effets de flamme et pression externes.
- De trappes d'accès pour le nettoyage et la maintenance du système.

4.4 Les limites principales d'installation d'une vanne à clapet d'isolation d'explosion

Les événements décrits dans le paragraphe précédent sont représentatifs de la situation industrielle. Ils permettent de donner quelques règles générales sur l'installation d'une vanne à clapet d'isolation d'explosion. Il y a plusieurs points critiques et plusieurs questions doivent être posées.

Premièrement, afin de pouvoir remplir correctement sa fonction, une vanne à clapet d'isolation d'explosion, doit avant tout avoir le temps de se refermer, et se verrouiller avant l'arrivée de la flamme. En effet, le clapet est un système mécanique qui met un certain temps à se fermer et se verrouiller. Ce temps doit rester plus court que le temps mis par la flamme pour atteindre le volet. Cette première condition de bon fonctionnement permet de définir une distance minimale d'installation, nommée L_{min} .

Deuxièmement, le clapet doit être capable de résister à l'explosion et rester verrouillé pour assurer la fonction d'isolation. Il est reconnu que des flammes se propageant en canalisations peuvent s'accélérer au fur et à mesure de la propagation. Cette possible accélération, s'accompagne d'une augmentation de la pression d'explosion⁶. Par ailleurs, une colonne de gaz poussée dans la canalisation par une explosion non terminée dans la cuve aura d'autant plus d'inertie qu'elle sera longue. Ainsi il est possible qu'un clapet positionné à une trop grande distance de l'équipement qui subit l'explosion ne puisse pas résister aux effets de pression induits par l'explosion. Cette seconde condition de bon fonctionnement permet de définir une distance maximale d'installation, nommée L_{max} .

Ces deux distances L_{min} et L_{max} correspondent à des **limites physiques du système** reposant sur deux aspects non couplés. De fait il est possible de concevoir un clapet pour lequel, sous certaines conditions d'explosion (volume de l'équipement, réactivité du nuage, etc...), on a $L_{max} < L_{min}$ donc qui ne fonctionne pas. De plus amples informations sur le fonctionnement des vannes à clapet d'isolation d'explosion et la détermination de ces distances L_{min} et L_{max} peuvent être trouvées dans les travaux de Grégoire (2023).

On retiendra qu'une vanne à clapet d'isolation d'explosion sera plus polyvalente si la distance L_{min} est minimale et la distance L_{max} , nécessairement supérieure à L_{min} , est maximale. Cela est directement lié à deux paramètres critiques qui sont la durée de fermeture du clapet, qui doit être minimale et sa résistance, qui doit être maximale. Il a été démontré (Grégoire, 2023) que pour se fermer rapidement et limiter L_{min} , le clapet :

- doit avoir une course angulaire, de son ouverture maximale jusqu'à sa fermeture, minimale (typiquement inférieure à 60°) ;
- doit pouvoir tourner autour de son axe avec un minimum de frottements ;
- doit avoir une inertie minimale, qui garantit une mise en mouvement rapide. L'accélération du volet interne des vannes à clapet d'isolement en situation accidentelle est ensuite largement dominée par les forces de pression appliquées sur ce dernier. Des dispositifs additionnels tels que des ressorts peuvent également aider à accélérer la fermeture du clapet.

Pour une augmentation de la résistance du clapet, et donc de la longueur L_{max} , il faut au contraire avoir des matériaux souvent plus lourds (par exemple de l'acier plutôt que de l'aluminium) et/ou de plus grandes épaisseurs. Cela revient à augmenter l'inertie du système mobile, ce qui n'est pas favorable à une réduction de la longueur L_{min} . Il est également possible de jouer sur la pression atteinte au niveau du clapet, par exemple en l'équipant d'un évent d'explosion (mais dans ce cas il y aura des conséquences sur le zonage ATEX du clapet et son environnement immédiat).

Les limites d'installation d'une vanne à clapet d'isolation d'explosion doivent être spécifiées dans le certificat associé à ce dernier. Toutefois plusieurs valeurs, voir un modèle de calcul, de L_{min} et L_{max} , peuvent être fournis pour couvrir un ensemble de configurations différentes. Dans tous les cas, pour un système certifié, les limites principales du système ont nécessairement été vérifiées par un organisme notifié et sur la base de données expérimentales.

Enfin lorsque le clapet est fermé, il doit rester étanche à l'explosion, c'est-à-dire que le clapet fermé ne doit pas permettre le passage des flammes au-delà de sa position. Cette assertion qui paraît évidente cache en réalité une autre limite du clapet sur la nature du mélange combustible. En effet, un clapet peut être performant vis-à-vis d'une explosion de farine de blé et complètement inopérant face à de la poussière de soufre. La raison est que certaines poussières sont plus sensibles que d'autres au risque d'inflammation. Elles peuvent s'enflammer avec des énergies d'inflammation de quelques millijoules (contre parfois plusieurs centaines pour d'autres), des températures minimales d'auto-inflammation de l'ordre de 300-400°C et passer au travers d'interstices de quelques millimètres. **L'étanchéité d'une vanne à clapet d'isolation d'explosion est définie vis-à-vis d'un risque particulier, pour une gamme d'applications spécifiées dans son certificat.**

⁶ Cette accélération des flammes en canalisation est la principale raison pour laquelle l'installation de systèmes d'isolation est quasi-systématiquement recommandée dans les procédés industriels mettant en œuvre des ATEX de poussières.

4.5 Effets périphériques

Les vannes à clapet d'isolation d'explosion sont susceptibles d'affecter le procédé industriel sur lequel ils sont installés de plusieurs manières.

D'une part, en fonctionnement normal du procédé, ils perturbent l'écoulement et vont vraisemblablement induire des hétérogénéités de turbulence, et pertes de charge. Dans un écoulement d'air chargé en poussières il peut se créer des points d'arrêt et de dépôt des poussières. En sédimentant, ces poussières sont susceptibles d'altérer le bon fonctionnement du volet en cas d'explosion. Si le clapet placé à sa distance minimale d'installation L_{min} devient plus lent en raison de son encrassement, on comprend aisément qu'il ne sera plus en capacité de se fermer avant l'arrivée de la flamme, en cas d'explosion. Pour cette raison des contrôles du dispositif seront recommandés d'autant plus fréquemment que le taux d'encrassement est important.

D'autre part, en régime accidentel, une vanne à clapet d'isolation d'explosion correctement dimensionnée parviendra à se refermer avant l'arrivée de la flamme et permettra l'isolation de l'explosion. Néanmoins des effets de pression significatifs restent possibles dans les équipements connectés :

- Au-delà de la position du clapet, du côté protégé, une onde de dépression va se propager dans le reste de l'installation. Cette onde est une perturbation locale de l'écoulement dont l'amplitude est liée à la vitesse des gaz dans la canalisation au moment de la fermeture du volet et la durée est liée aux dimensions de l'installation. En débouchant dans l'équipement en bout de canalisation, c'est une onde de compression d'amplitude et durée équivalentes qui reviendra vers le clapet. La canalisation en aval du clapet doit être dimensionnée pour résister à ces effets. Dans la plupart des cas, les canalisations cylindriques sont des structures relativement résistantes aux effets de pression internes, si bien que cet aspect particulier pose peu de problèmes. Ce n'est en revanche pas forcément le cas pour les équipements placés sur ces canalisations, tels que les fenêtres ou hublots qui peuvent être prévus par exemple pour résister à une surpression mais pas une dépression, ou vice versa.
- Du côté de la canalisation exposée à la flamme, on observe la situation opposée et avec des amplitudes plus fortes : à la fermeture du volet l'arrêt brusque de la colonne de gaz provoque une hausse de pression qui se cumule aux effets de pression dus à l'explosion. L'équipement où se produit l'explosion étant protégé par évent ou par un système de suppression d'explosion, et la canalisation étant fermée, il y aura nécessairement une nouvelle inversion de l'écoulement, avec retour d'une onde de compression vers l'équipement qui subit l'explosion. En raison de cet ajout de gaz dans l'enceinte, qui peut en plus renforcer la combustion, des hausses secondaires de pression parfois significatives sont possibles. Une illustration en a été fournie dans la Figure 10 : sans clapet la surpression dans la cuve ne dépassait pas 600 mbar. Avec le clapet, une surpression de 1 bar a été atteinte. Il s'agit d'un phénomène critique, qu'il est nécessaire de prendre en compte pour la sécurité de l'installation. Pour le limiter, il faudrait idéalement que le retour de pression se fasse alors que la pression dans l'équipement qui subit l'explosion a déjà significativement diminué après avoir atteint la pression réduite maximale d'explosion P_{red} de référence en l'absence de clapet. Implicitement, cela signifie donc qu'il faudrait éloigner le clapet de l'enceinte à isoler. Toutefois une plus grande longueur de canalisation est également propice à l'accélération des flammes et donc des hausses de pression, suivant un autre mécanisme. Il n'est donc pas possible de donner des règles générales et des calculs au cas par cas sont nécessaires.
- Des effets thermiques et de pression externes sont également possibles pour certaines technologies de clapets anti-retour. En effet certains sont équipés d'un évent d'explosion pour limiter la surpression au niveau du clapet lors de sa fermeture. Dans ce cas, le clapet peut se comporter comme une enceinte protégée par évent, et des effets thermiques (dus à la flamme) et de pression sont possibles dans le voisinage du clapet. Pour plus de détails sur ces aspects, on peut se reporter à la fiche barrière relative aux événements d'explosion⁷.

⁷ <https://www.ineris.fr/fr/evénements-explosion-document-synthese-relatif-barriere-technique-securite-bts>

4.6 Cas limite

Le fonctionnement des vannes à clapet d'isolation d'explosion, simple en apparence cache en réalité de complexes interactions entre un fluide réactif et une structure mobile. De fait, la description de ces systèmes, tout comme les documents normatifs les décrivant, font encore l'objet de recherches. Par exemple la nécessité de tester ces systèmes avec une portion de canalisation après le clapet est une contrainte récente, tout comme le verrouillage de ces clapets imposé aux Etats-Unis seulement depuis 2014, date correspondant à une mise à jour du guide NFPA69.

Par ailleurs, il est possible qu'une explosion lente, produisant peu de pression, puisse passer au travers d'un clapet sans le déclencher. Une telle explosion peut survenir pour les ATEX les moins réactives, lorsque la concentration en combustible dans l'air est loin de l'optimum ou avec une surface d'évent très grande. La norme EN16447 préconise la mise en œuvre d'essais impliquant ce type d'explosion faible lors des essais de certification des vannes à clapet d'isolement d'explosion.

Dans certains cas on trouve des limites dans les certificats sur la température d'auto-inflammation (TAI) ou l'énergie minimale d'inflammation (EMI) de la poussière. En réalité, le paramètre important serait plutôt l'IEMS de la poussière : l'Interstice Expérimental Maximal de Sécurité. L'IEMS est l'ouverture maximale d'une fente permettant un échange entre deux espaces, mais ne permettant pas la propagation d'une flamme. C'est donc logiquement ce paramètre qui devrait avoir une importance pour la capacité d'isolation. Il existe des formules pour calculer l'IEMS à partir de l'EMI et de la TAI mais ce n'est pas pour autant une grandeur normalisée.

5 Critères d'évaluation des performances

En règle générale, l'évaluation de la performance des clapets anti-retour repose sur la bonne sélection en fonction de l'application (choix technologique, matériaux et dimensionnement), l'adaptation de l'installation aux règles et techniques et la mise en place d'un programme de tests et maintenance adapté.

Il faut noter que le fonctionnement d'une vanne à clapet d'isolation d'explosion est défini vis-à-vis d'un risque particulier, pour une gamme d'applications spécifiées dans son certificat. Le respect des instructions présentes dans le certificat est indispensable pour pouvoir valoriser la vanne à clapet d'isolation d'explosion en tant que barrière de sécurité.

5.1 Indépendance

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

- Qu'une défaillance de la vanne à clapet d'isolation d'explosion ne peut pas être la cause du scénario.
 - Le scénario redouté est celui d'une explosion. La défaillance d'une vanne à clapet d'isolation d'explosion ne peut pas être à l'origine d'une explosion.
- Que la performance de la vanne à clapet d'isolation d'explosion n'est pas dégradée par l'occurrence des événements initiateurs.
 - Après la fermeture du clapet, il est possible d'observer des situations où il y a plus de pression du côté protégé que du côté exposé à l'explosion ce qui pourrait entraîner des efforts significatifs capables de rompre les systèmes de verrouillage des clapets et de les rouvrir. Si la vanne à clapet d'isolation d'explosion et son système de verrouillage sont correctement dimensionnés, l'explosion ne devrait pas dégrader son fonctionnement.

5.2 Efficacité

L'efficacité en tant que barrière de sécurité correspond à l'aptitude de la vanne à clapet d'isolation d'explosion à remplir la fonction de sécurité pour laquelle elle a été définie, dans son contexte d'utilisation et pendant une durée donnée de fonctionnement.

L'efficacité est évaluée pour un scénario d'accident précis. Elle est donc principalement liée au choix de clapet, son positionnement et son installation suivant les préconisations du certificat associé.

5.2.1 Positionnement des vannes à clapet d'isolation d'explosion

La distance minimale (L_{min}) et maximale (L_{max}) d'installation sont définies selon les deux conditions principales de bon fonctionnement, tel qu'expliqué dans le chapitre 4.4 : la vanne à clapet d'isolation d'explosion doit avoir le temps de se refermer et se verrouiller avant l'arrivée des flammes, et elle doit être capable de résister à l'explosion puis rester verrouillée pour assurer la fonction d'isolation.

D'autre part, la configuration du procédé a un effet sur les valeurs de L_{min} ou L_{max} , ainsi :

- L_{min} sera augmentée :
 - Avec des équipements de volumes plus petits. Plus le volume est petit, plus la pression augmente vite et donc plus les gaz seront mis en mouvement rapidement dans la canalisation.
 - Avec des poussières plus réactives, c'est-à-dire brûlant plus rapidement et permettant d'atteindre des surpressions maximales d'explosion plus élevées. Assez logiquement, si on atteint plus vite des pressions plus hautes et donc des vitesses de gaz plus grandes dans la canalisation, alors on devra éloigner le clapet.
 - Lorsque la pression réduite d'explosion P_{red} est plus élevée. La mise en œuvre d'un événement d'explosion ou un suppresseur permet, lorsque cette solution est correctement dimensionnée, de limiter la surpression d'explosion atteinte dans l'équipement protégé à une pression réduite d'explosion notée P_{red} . Des valeurs plus basses de P_{red} conduisent à des vitesses maximales de flammes moindres dans la canalisation. Ainsi un suppresseur agissant très tôt, un événement plus grand ou s'ouvrant plus tôt peuvent conduire à des valeurs de L_{min} plus faibles.
- L_{max} sera diminuée :
 - Avec des poussières plus réactives (K_{st} et P_{max} plus élevés), car ces poussières sont aussi plus favorables à l'accélération des flammes dans les tubes, et plus susceptibles de conduire à de forte augmentation de la surpression.
 - Lorsque la pression réduite d'explosion P_{red} est plus élevée, car dans ce cas on part d'un point de pression plus élevé, augmentant ainsi l'effet inertiel de la colonne de gaz avant le clapet.

Pour ces raisons les certificats des vannes à clapet d'isolation d'explosion spécifient également des limites sur un volume minimum d'explosion, une valeur maximale de K_{st} , P_{max} et P_{red} . Des modèles de fonctionnement de clapet ne respectant ces tendances fondamentales doivent alerter.

5.2.2 Dimensionnement et configuration des canalisations

Chaque vanne à clapet d'isolation d'explosion est prévue pour fonctionner avec un diamètre ou une gamme réduite de diamètres de canalisation. En effet il est assez intuitif qu'on ne placera pas un clapet de DN500 sur une canalisation de DN100 ou de DN1000. Dans les deux cas on risque de ne pas parvenir à fermer le clapet à temps : soit parce que l'explosion ne pousse pas assez fort sur le clapet pour le fermer rapidement, soit parce que l'écoulement a été accéléré par un fort rétrécissement de section. Chaque clapet est prévu pour une installation spécifique et il faut s'y conformer.

La présence de singularités, par exemple des coudes, sur les canalisations y modifie l'écoulement : un coude introduit des pertes de charge, un ralentissement local de l'écoulement mais il y génère également des effets particuliers de turbulence et modifie les profils de la surface de flamme et du chargement en pression sur le volet. Ces phénomènes sont susceptibles de modifier la distance L_{min} de deux façons non exclusives l'une de l'autre : soit parce que la vitesse de la flamme a changé, soit parce que la force de pression n'est plus distribuée de la même manière sur le volet du clapet (ce qui affecte son temps de fermeture). Cela signifie également que l'orientation du coude a aussi une importance.

L'inclinaison de la canalisation (θ_i) a un impact sur la vitesse de fermeture du clapet donc sa distance minimale d'installation.

Le certificat attaché à la vanne à clapet d'isolation d'explosion doit mentionner la possibilité ou non de mettre en œuvre le système avec des coudes ou sous une inclinaison θ_i particulière, et les distances minimales et maximales d'installation associées.

5.3 Temps de réponse

Comme discuté dans le paragraphe 4, la vitesse de l'écoulement, et donc de la flamme dans la canalisation est largement dépendante de la pression d'explosion dans l'enceinte à isoler. Néanmoins, une analyse simple permet de montrer que des vitesses de l'ordre de quelques centaines de m/s seront rapidement atteintes, si bien que pour des équipements de l'ordre de 1 à 10 m³ en volume, la flamme atteindra de 1 à 10 mètres en quelques dizaines voire une centaine de millisecondes. C'est l'ordre de grandeur des temps de fermetures et des distances d'installation qui est attendu pour ces systèmes.

5.4 Niveau de confiance

Les principales causes de mauvais fonctionnement des vannes à clapet d'isolation d'explosion correspondent à :

- Règles d'installation non respectées.
- Obstruction partielle de la canalisation.
- Mauvais dimensionnement de la vanne à clapet d'isolation d'explosion vis-à-vis de la canalisation.
- Dépôt ou accumulation de toute substance sur les parois internes du dispositif, mais également externes si une partie de l'élément mobile peut être bloquée depuis l'extérieur.
- Présence d'encrassement, corrosion, abrasion, perte de lubrifiant.

En l'absence d'analyse spécifique, un NC = 1 devra être affecté à la fonction de sécurité réalisée par les vannes à clapet d'isolation d'explosion, si les exigences d'efficacité et de temps de réponse sont remplies et si une politique de tests et de maintenance adaptée est mise en place.

Pour atteindre un niveau de confiance de 2, une étude détaillée de fiabilité pourrait être réalisée portant notamment sur une identification exhaustive des possibles causes et modes de défaillance des vannes à clapet d'isolation d'explosion, la quantification du taux de défaillance, la détermination de la périodicité de tests et maintenance, le calcul de la probabilité de défaillance à la sollicitation 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.

Il est également possible de justifier un niveau de confiance de 2 à partir d'une évaluation basée sur un retour d'expérience quantifié pour des vannes à clapet d'isolation d'explosion similaires et dans des conditions d'utilisation équivalentes à l'application considérée (notion de « validé par l'usage » définie dans le référentiel Ω 10).

5.5 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.

5.5.1 Choix et installation d'une vanne à clapet d'isolation d'explosion

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, en accord avec les limites inscrites dans le certificat, par des personnes compétentes et suivant des procédures et moyens adaptés. En particulier, on sera attentif aux points suivants :

- Une vanne à clapet d'isolation d'explosion doit pouvoir résister à la pression et à la température de fonctionnement, au régime pulsatoire, aux cycles de pression, et à son environnement externe.
- Les vannes à clapet d'isolation d'explosion doivent être conçues pour conserver les performances spécifiées dans leur environnement et dans les conditions du procédé.
- Les matériaux utilisés pour les pièces des clapets anti-retour doivent être choisis en fonction de leur bonne adaptation aux conditions chimiques et physiques auxquelles ils seront soumis en service. On pense en particulier aux joints dans le clapet qui doivent permettre une fermeture étanche aux flammes.
- Les enceintes isolées et les canalisations les connectant ne doivent pas être endommagées par le bon fonctionnement de la vanne à clapet d'isolation d'explosion.
- Les effets périphériques suite à la fermeture des vannes à clapet d'isolation d'explosion (paragraphe 4.5) doivent être intégrés convenablement dans l'étude de sécurité liée au procédé.

5.5.2 Tests périodiques et maintenance

Une vanne à clapet d'isolation d'explosion est soumise aux conditions internes du procédé mais parfois aussi aux conditions externes et variables. Ses parties mobiles, qui permettent son bon fonctionnement sont parfois accessibles de l'extérieur, en plus de l'intérieur.

La performance d'une vanne à clapet d'isolation d'explosion repose beaucoup sur le bon état de ses éléments mobiles. Un encrassement, la corrosion, l'abrasion, une perte de lubrifiant ou une sollicitation trop fréquente sont des problèmes qui peuvent rendre ces systèmes inopérants.

Des tests périodiques sont essentiels pour assurer son bon fonctionnement et garantir la sécurité des installations industrielles. Toutes les observations et les résultats de mesure doivent être documentés. Ces tests doivent inclure au moins :

- Des vérifications de temps de fermeture, de verrouillage et de tenue mécanique,
- Le remplacement des pièces d'usure (notamment les joints),
- Des nettoyages périodiques du système, d'autant plus fréquemment que des écarts à la situation de référence sont constatés.

La périodicité de la maintenance des vannes à clapet d'isolation d'explosion est fixée par le fabricant, en fonction notamment des contraintes du procédé et de l'environnement (atmosphère corrosive, abrasive, concentration en poussières, dépôts, température, etc...). Dans la plupart des cas, les inspections périodiques peuvent se faire en ligne, grâce à une trappe d'accès présente dans les vannes à clapet d'isolation d'explosion.

Si le fournisseur propose une périodicité maximale, elle peut être utilisée et doit être confirmée avec un calcul spécifique de fiabilité pour s'assurer que le NC est maintenu sur l'ensemble de la période.

5.5.3 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).

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] 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] Ineris. « Events d'explosion - Document de synthèse relatif à une Barrière Technique de Sécurité (B.T.S.) », (2023), Disponible sur le site <https://www.ineris.fr>.
- [5] NF EN 15089 (2009), Systèmes d'isolement d'explosion.
- [6] NF EN 16447 (2014), Vanne et clapet d'isolation d'explosion.
- [7] Grégoire Y, Leprette E., Proust C. (2019), Function testing of passive explosion isolation flap valves, Proceedings of the Ninth International Seminar on Fire and Explosion Hazards (ISFEH9, Saint-Petersburg, Russia.
- [8] Grégoire Y., Leprette E., Proust C., Exploring the Dynamics of Passive Isolation Flap Valves in Dust Explosion Mitigation: A Model-Based Approach and its implications. Process Safety and Environmental Protection, 2024,ISSN 0957-5820, <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.02.003>
- [9] Sippel M., Schepp P., Hesener U. (2016), New Findings for the Application of Systems for Explosion Isolation with Explosion Venting Chemical Engineering Transactions Vol. 48, DOI:10.3303/CET1648089.

