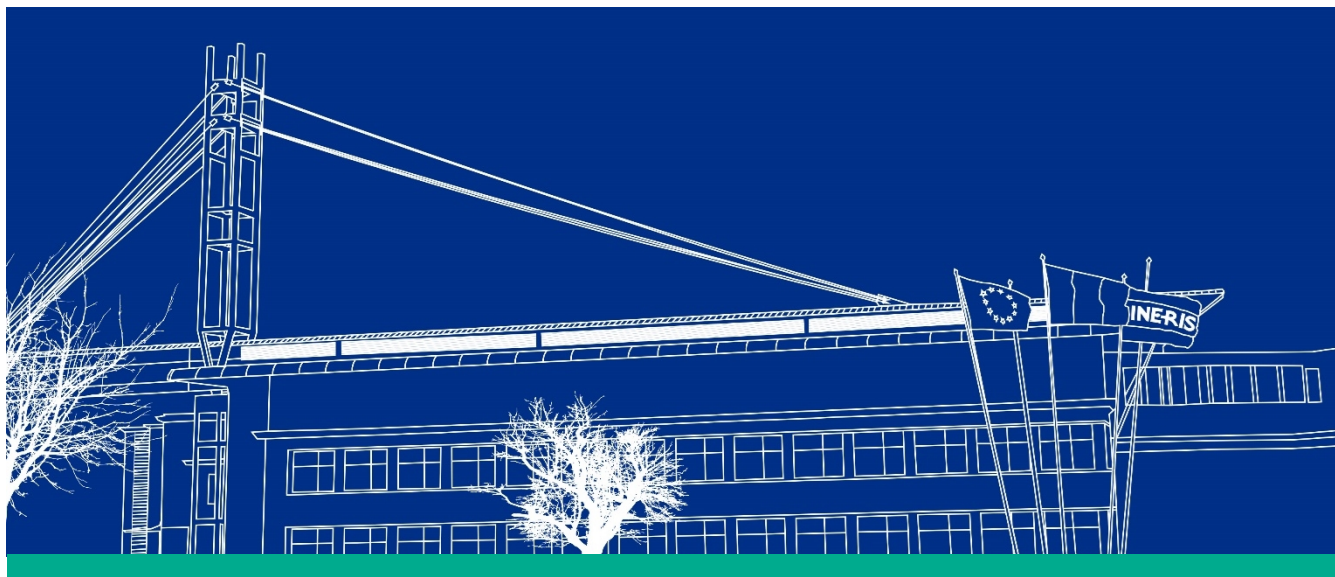




(ID Modèle = 454913)

Ineris - 230609 - 2825327 - v2.0

22/09/2025

Systèmes de suppression d'explosion

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

PRÉAMBULE

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

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

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

Au vu de ses missions qui lui incombent, l'Ineris, n'est pas décideur. Les avis, recommandations, préconisations ou 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

Vérification : LEPRETTE EMMANUEL; JOUBERT LAURIS; TARRISSE ALBIN

Approbation : BOUET REMY - le 22/09/2025

Table des matières

1	Fonction de sécurité assurée par un système de suppression d'explosion	5
2	Objet de la fiche.....	7
3	Fonctionnement d'un système de suppression d'explosion	9
3.1	Aspects historiques et grands principes de la suppression d'explosion	9
3.2	Principales normes, directives et dispositions applicables	9
3.3	Architecture du système	10
3.3.1	Détection.....	10
3.3.2	Traitement.....	10
3.3.3	Action.....	11
3.3.4	Alimentation de secours	11
3.4	Fonctionnement d'un dispositif réel	12
3.5	Détection d'explosion et déclenchement du système de suppression d'explosion	14
3.6	Mécanismes d'extinction d'une flamme de gaz ou de poussières	14
3.6.1	Spécificités de l'extinction des explosions avec des poudres inertes	15
3.6.2	Spécificités de l'extinction des explosions avec des gouttelettes d'eau	16
3.7	Accidentologie et modes de défaillance	16
4	Critères d'évaluation des performances	18
4.1	Indépendance	18
4.2	Efficacité	18
4.2.1	Dimensionnement d'un système de suppression d'explosion	18
4.2.2	Choix et installation d'un système de suppression d'explosion	20
4.2.3	Cas limites	21
4.3	Temps de réponse.....	22
4.4	Niveau de confiance	22
4.5	Évolution des performances dans le temps.....	23
4.5.1	Tests périodiques et maintenance.....	23
4.5.2	Gestion des modifications.....	24
5	Références	25

Résumé

La sécurité des installations industrielles repose sur l'utilisation de barrières de sécurité, valorisées comme des mesures de maîtrise des risques dans une Étude de Dangers (EDD). Dans ce contexte, un système de suppression d'explosion est un dispositif de sécurité placé sur une enceinte d'un procédé industriel, dont le rôle est d'éteindre rapidement la flamme dès qu'une explosion est détectée dans l'enceinte protégée.

Ce type de système de mitigation repose sur une détection active de l'explosion, par des capteurs (par exemple de pression ou de flamme) et l'injection suffisamment rapide d'un agent extincteur. L'agent extincteur, qui peut être une poudre inerte ou un liquide extincteur, comme de l'eau, doit être distribué dans l'enceinte protégée pour inhiber la propagation de la flamme et éteindre cette dernière.

Cette fiche présente les principes de fonctionnement des systèmes de suppression d'explosion ainsi que les éléments nécessaires pour vérifier le respect des critères de performance définis par la méthode Ω 10 de l'Ineris conformément aux articles 2 et 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, Systèmes de suppression d'explosion - Document de synthèse relatif à une Barrière Technique de Sécurité (B.T.S), Verneuil-en-Halatte : Ineris - 230609 - v2.0, 22/09/2025.

Mots-clés :

Fiche Barrière, Barrière technique de sécurité, Système Instrumenté de Sécurité, MMR, MMRI, Explosion

1 Fonction de sécurité assurée par un système de suppression d'explosion

Un système de suppression d'explosion est un dispositif de sécurité placé sur une enceinte d'un procédé industriel telle qu'un filtre ou un broyeur, dont le rôle est d'éteindre rapidement la flamme dès qu'une explosion est détectée dans l'enceinte protégée. Le but est de stopper la progression de l'explosion et limiter ses effets.

Ce type de système de protection repose sur une détection active de l'explosion, par des capteurs (par exemple de pression ou de flamme) et l'injection suffisamment rapide d'un agent extincteur. L'agent extincteur, qui peut être une poudre inerte ou un liquide extincteur, comme de l'eau, doit être distribué dans l'enceinte protégée pour inhiber la propagation de la flamme et éteindre cette dernière.

Dans une enceinte fermée où se développe une explosion de poussières, la vitesse de montée en pression est proportionnelle à la réactivité de la poussière combustible mais aussi à l'inverse du volume de l'enceinte. Les temps caractéristiques de l'explosion vont typiquement de la dizaine à plusieurs centaines de ms. Une action rapide est donc nécessaire.

La fonction de sécurité d'un système de suppression d'explosion consiste à éteindre la flamme dans l'enceinte, et à empêcher tout réallumage du mélange. En pratique un système de suppression d'explosion est composé de plusieurs éléments, incluant :

- Un ou plusieurs capteurs (pour détecter l'explosion) ;
- Une centrale électronique de pilotage, appelée dans les normes dispositif de contrôle-commande (DCC) ;
- Un ou plusieurs supresseurs d'explosion (ensemble mécanique qui permet d'injecter rapidement dans l'équipement un agent extincteur de flamme).

Remarque : on distingue le système de suppression d'explosion des supresseurs d'explosion, ces derniers sont l'un des composants du premier.

Il est important de noter que dans le cas de ces installations, la perte d'énergie peut conduire à la perte de la fonction de sécurité si aucune alimentation de secours n'est présente. On parle donc de dispositifs de sécurité à émission. C'est pourquoi il faut assurer la détection de la perte d'intégrité du circuit d'alimentation et l'utilisation d'une alimentation auxiliaire. Dans ces conditions, le dispositif pourra être retenu comme une barrière de sécurité dans le contexte de la maîtrise des risques d'accidents majeurs (si les autres critères de performance des MMR sont satisfaits).



Figure 1 : Exemples de supresseurs d'explosion

Dans un procédé industriel réel, les différentes enceintes sont souvent connectées par un réseau de canalisations. Dans cette situation, il faut protéger les enceintes et isoler les canalisations. Lorsque le choix est fait d'installer des dispositifs de suppression d'explosion pour la protection des enceintes, il n'est pas rare que les mêmes systèmes soient utilisés pour l'isolation des canalisations.

Certains systèmes de suppression d'explosion peuvent en effet assurer un autre rôle dans les procédés industriels, lorsqu'ils sont placés sur des canalisations, seuls, ou en complément d'autres équipements, par exemple, des vannes à fermeture rapide. Leur objectif est alors de générer une barrière chimique de manière à empêcher la propagation de la flamme au-delà de leur position sur la conduite. Dans ce cas ils ne sont plus utilisés comme systèmes de suppression d'explosion mais comme systèmes d'isolation d'explosion, dont le fonctionnement est décrit par la norme NF EN 15089 « Systèmes d'isolement d'explosion » [5].

La distinction est importante car si le système peut être le même pour les deux fonctions de suppression et d'isolation, son rôle est différent, ce qui entraîne des conséquences notamment sur leur dimensionnement. De manière simpliste, avec un système de suppression on souhaite mélanger des composants inertes au mélange réactif en combustion pour refroidir la flamme et l'éteindre, tandis que dans le cas de l'isolation, on génère un bouchon non réactif dans lequel la flamme ne peut se propager : elle est stoppée localement si le bouchon reste en place, mais pas éteinte globalement. **Cette fiche se concentre sur les systèmes de suppression d'explosion, décrits normativement par la norme NF EN 14373 [4].**

2 Objet de la fiche

Cette fiche présente des éléments de synthèse relatifs à l'évaluation des performances des systèmes de suppression 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 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) [1] et humaines (Ω 20) [2] de sécurité.

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

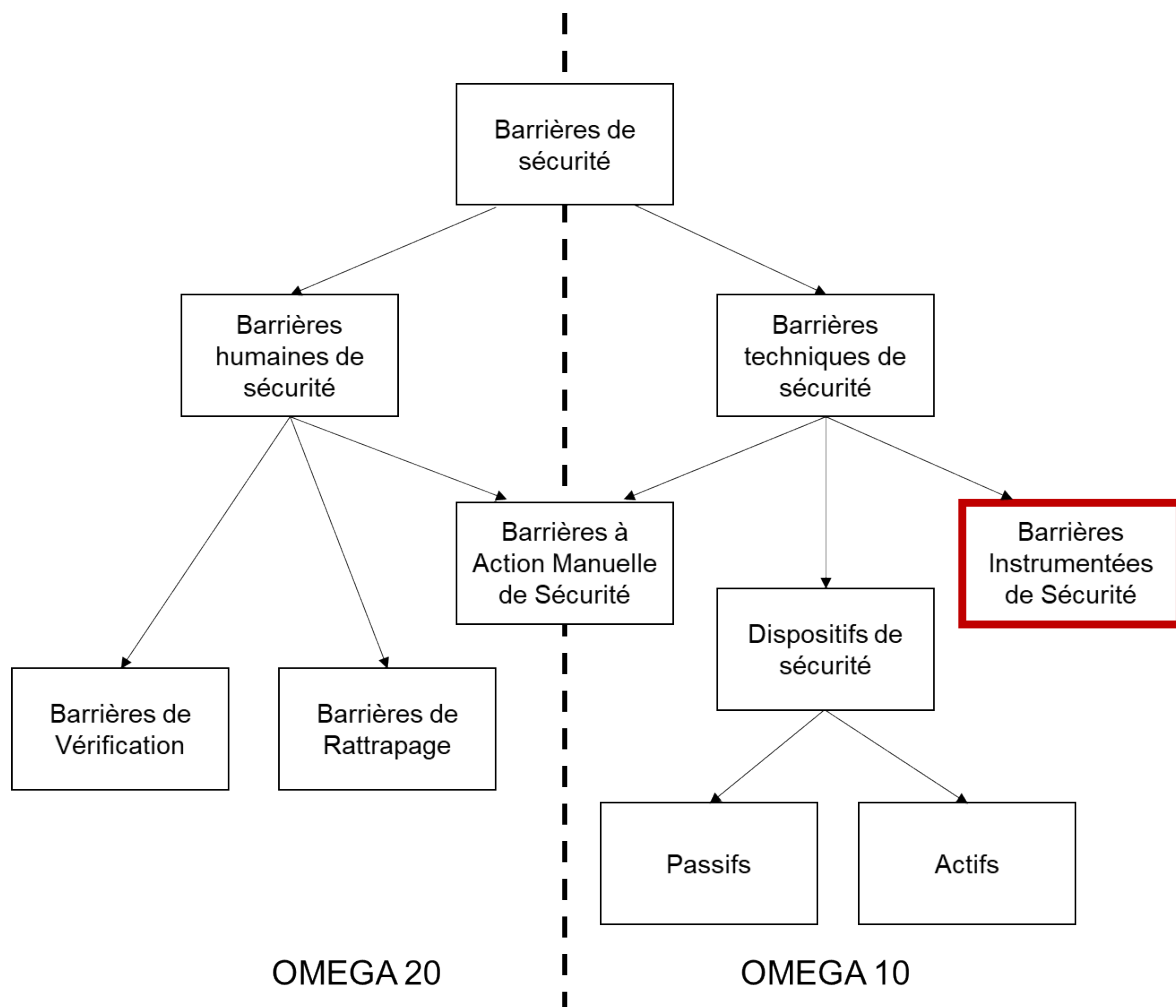


Figure 2 : Typologie des Barrières de Sécurité, Ω 10 [1]

Dans l'approche de l' Ω 10, on définit les barrières de sécurité comme l'ensemble des éléments techniques et humains nécessaires à la réalisation d'une fonction de sécurité. 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 systèmes de suppression d'explosion sont des Barrières Instrumentées de Sécurité (BIS). L'évaluation des performances globales d'une BIS doit porter sur l'ensemble des éléments nécessaires à la réalisation de la fonction de sécurité. Le fonctionnement d'un système de suppression d'explosion peut être étendu à plusieurs modes d'exploitation et à plusieurs équipements : différentes technologies pour la détection de paramètres physiques, dispositifs de contrôle-commande, injection de l'agent extincteur, alarmes...

Les principaux référentiels applicables dans ce contexte sont :

- La méthode Ω 10 [1] qui donne les éléments généraux pour l'évaluation des performances des barrières techniques de sécurité et des éléments qui les composent ;
- La note de doctrine MMRI [8] qui fixe des exigences sur la conception et l'exploitation des mesures de maîtrise des risques instrumentées de conduite (MMRIC) et de sécurité (MMRIS) ;
- La norme NF EN 14373 [4], dédiée spécifiquement aux systèmes de suppression d'explosion.

Le présent document donne les éléments essentiels sur les systèmes de suppression d'explosion, notamment :

- Les principes de fonctionnement général et les normes applicables pour leur conception, dimensionnement et qualification au chapitre 3 ;
- 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 ainsi que la maîtrise en exploitation au chapitre 4.

3 Fonctionnement d'un système de suppression d'explosion

3.1 Aspects historiques et grands principes de la suppression d'explosion

L'histoire des supprimeurs d'explosion débute avec les travaux de Taffanel, juste après la catastrophe de courrières de 1906. Après l'accident, Taffanel a étudié pendant 7 ans l'explosion de poussière de charbon dans des galeries d'essai à Liévin. Ses travaux se sont conclus, en s'appuyant, notamment sur des pratiques anglaises antérieures, par la mise au point des taffanelles, des arrêts barrages permettant de lutter contre les coups de poussière. Il s'agit en pratique de bacs en équilibre instable, remplis d'eau ou de poussière de roche (du sable).

Dans les années suivantes, l'idée d'utiliser de la poussière de roche pour prévenir les explosions de poussière de charbon dans les mines souterraines s'est également répandue aux États-Unis. Les recherches de l'US Bureau of Mines (Cashdollar, 2010) incluaient des essais en laboratoire, ainsi qu'un grand nombre de tests grandeur nature dans des mines expérimentales. Elles ont abouti à la conclusion que la poussière de roche calcaire agit principalement en absorbant la chaleur de la déflagration. De plus, une petite fraction de cette poussière subit une transformation en oxyde de calcium via une réaction endothermique, renforçant légèrement son efficacité comme puit de chaleur.

Les travaux d'Amyotte (1991, 1992, 2005) et Dastidar (1997) sur les interactions entre les déflagrations de poussières et les poudres de roche inertes ont permis la mise au point d'une théorie pour déterminer la concentration minimale en poussière inerte pour éteindre la flamme en se basant sur un concept de température limite de flamme (ΔT_{lim}). Fait intéressant, le modèle se focalise sur l'aspect absorption de chaleur et néglige toute interaction chimique entre la flamme et l'agent extincteur. En conséquence, l'efficacité de l'extinction avec des supprimeurs à poudre, et donc leur dimensionnement, est fortement dépendante du mélange d'une grande quantité de poudre inerte au milieu en combustion, et moins sensible à la nature chimique de la poudre inerte mise en œuvre.

Souvent l'agent extincteur est une poudre ou de l'eau. On trouve également des produits s'appuyant en plus sur un inertage chimique, par exemple avec du bicarbonate de sodium, qui consiste le plus souvent à capturer les radicaux libres émis lors de la combustion, de manière à ralentir puis stopper la réaction.

Aujourd'hui, les systèmes de suppression d'explosion reposent sur une surveillance constante du procédé. Ils sont donc bien plus coûteux, à l'achat, installation et maintenance, qu'un système passif tel qu'un événement d'explosion. Ils offrent l'avantage de ne pas générer d'effets externes et d'empêcher un éventuel ré-allumage d'une explosion (par exemple une flamme qui reviendrait d'un autre équipement connecté). Cela peut répondre à un besoin spécifique dans un procédé, par exemple la protection d'une enceinte située dans un bâtiment.

Par contre, il faut prendre en compte que suivant les technologies mises en œuvre, l'agent extincteur peut être corrosif, toxique, ou incompatible avec les produits traités par le procédé. Après le déclenchement d'un tel système, le reconditionnement du procédé peut demander un nettoyage complexe.

3.2 Principales normes, directives et dispositions applicables

Les systèmes de suppression d'explosion sont des dispositifs de protection contre l'explosion qui doivent être certifiés conformes à la Directive ATEX 2014/34/UE. Cette certification requiert impérativement la réalisation d'essais d'explosion sur un certain nombre de systèmes dans des configurations d'essais spécifiques. Ainsi, il existe en Europe une norme harmonisée dédiée spécifiquement à ces dispositifs : NF EN 14373 +A1 « Systèmes de suppression d'explosion » (2025) [4].

Aux États-Unis, on citera le guide NFPA 69 « Standard on Explosion Prevention Systems » (2024) [6], qui inclut une courte description des systèmes de suppression d'explosion. Ce document résume leur rôle, leur fonctionnement, quelques limites générales, ayant trait notamment à la sécurité autour de ces systèmes, par exemple, le risque pour le personnel de maintenance intervenant dans le procédé industriel protégé, en cas de déclenchement intempestif. Contrairement à la norme Européenne NF EN 14373, ce guide ne fournit pas de préconisations sur les essais auxquels les systèmes de suppression d'explosion devraient être soumis en vue de leur certification, ni d'information sur leur dimensionnement.

3.3 Architecture du système

La norme NF EN 14373 qui décrit ces systèmes met en évidence six composants majeurs pour le fonctionnement des systèmes de suppression d'explosion : un détecteur d'explosion (capteur), une chaîne électronique de pilotage (dispositif de contrôle commande - DCC), une alimentation de secours, un agent extincteur, une buse de dispersion et le suppresseur lui-même (le réservoir contenant l'agent extincteur avec toutes les composantes permettant de déclencher son injection).

Dans la norme NF EN 14373, le fonctionnement général de ces systèmes est décrit comme suit :

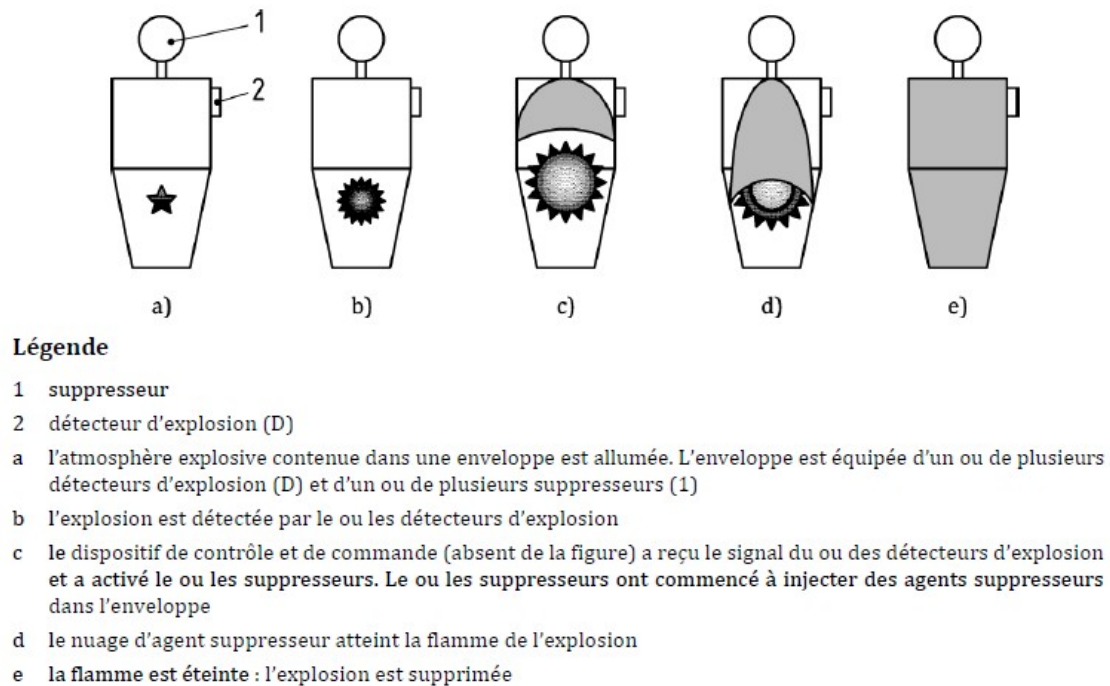


Figure 3 : Phases de la suppression d'explosion dans une enveloppe (extrait de la norme NF EN 14373¹)

En s'appuyant sur la définition de l' Ω 10 [1], un système de suppression d'explosion peut être considéré comme une barrière instrumentée de sécurité, constituée essentiellement de sous-systèmes de détection, de traitement, d'actionneurs et d'une alimentation de secours.

3.3.1 Détection

Le fonctionnement de la barrière repose sur la détection de la présence de flamme, du dépassement d'un seuil de pression ou de la vitesse de montée en pression. Le but de ce sous-système est la détection de l'explosion dès ses premiers instants, et l'activation du système de décharge de l'agent extincteur. La détection peut reposer sur un seul paramètre, mais il est également possible de combiner plusieurs types de capteurs : capteurs de flamme, de pression, ou de variation rapide de pression, principalement.

3.3.2 Traitement

Ces détecteurs nécessitent ensuite d'être reliés à des actionneurs via un système de traitement (DCC - dispositif de contrôle commande). La chaîne de traitement inclut l'ensemble des composants électroniques permettant de commander le système, signaler son déclenchement, le désarmer et s'assurer de son fonctionnement, même en cas de panne d'alimentation externe. Des logiciels et algorithmes embarqués peuvent être intégrés afin d'analyser les données issues des capteurs.

¹ Cette figure issue de la norme NF EN 14373 présente une erreur : le détecteur d'explosion est référencé en légende par (D) et dans le schéma par (2).

3.3.3 Action

Le système de décharge à haute vitesse a pour objectif de distribuer l'agent extincteur dans l'enceinte protégée dans un délai suffisamment court pour avoir une suppression efficace de l'explosion. Une suppression inefficace serait une suppression inexistante ou survenant trop tard, après destruction de l'enceinte. On parle souvent pour ces systèmes de disperseur HRD - High Rate Disperser. Souvent il s'agit d'un gaz sous pression, en général de l'azote, inerte, derrière une membrane qui sera ouverte par l'actionneur, ou bien d'un générateur de gaz.

Dans ce sous-système, il faut inclure également tout le système mécanique relatif à la dispersion de l'agent extincteur, dont la buse de dispersion qui permet d'en optimiser la distribution dans le volume protégé. L'agent extincteur, dont le rôle premier est de refroidir le mélange explosif pour éteindre et empêcher la propagation des flammes, est le plus souvent une poudre inerte tassée, telle que du bicarbonate de soude. Il existe aussi des suppresseurs à eau chaude ou froide. La fonction de sécurité entraîne également la mise en sécurité du local par une alarme visuelle et/ou sonore.

Un système de suppression d'explosion peut comporter un ou plusieurs suppresseurs, qui peuvent être identiques ou de capacités différentes, en fonction des caractéristiques de l'installation. Il est possible d'avoir plusieurs suppresseurs sur une même enceinte, ou bien un réseau de suppresseurs répartis sur un ensemble d'enceintes.

Il faut prendre en compte également que, suivant les technologies mises en œuvre, l'agent extincteur peut être corrosif, toxique, ou présenter d'autres risques. Après le déclenchement d'un tel système, le reconditionnement du procédé peut demander un nettoyage complexe.

3.3.4 Alimentation de secours

Vu qu'il s'agit d'un dispositif de sécurité à émission, l'alimentation devra être considérée comme un sous-système de la barrière. L'alimentation doit être surveillée et secourue pour que le système de suppression d'explosion puisse être considéré comme barrière ou MMR, conformément à l'article 56 « Utilités » de l'Arrêté du 4 octobre 2010 relatif à la prévention des risques accidentels au sein des installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation. La norme NF EN 14373 établit que l'alimentation de secours doit être spécifiée et prévue de manière à garantir une protection inchangée et ininterrompue contre l'explosion pendant au moins 4 heures, immédiatement après une panne de secteur.

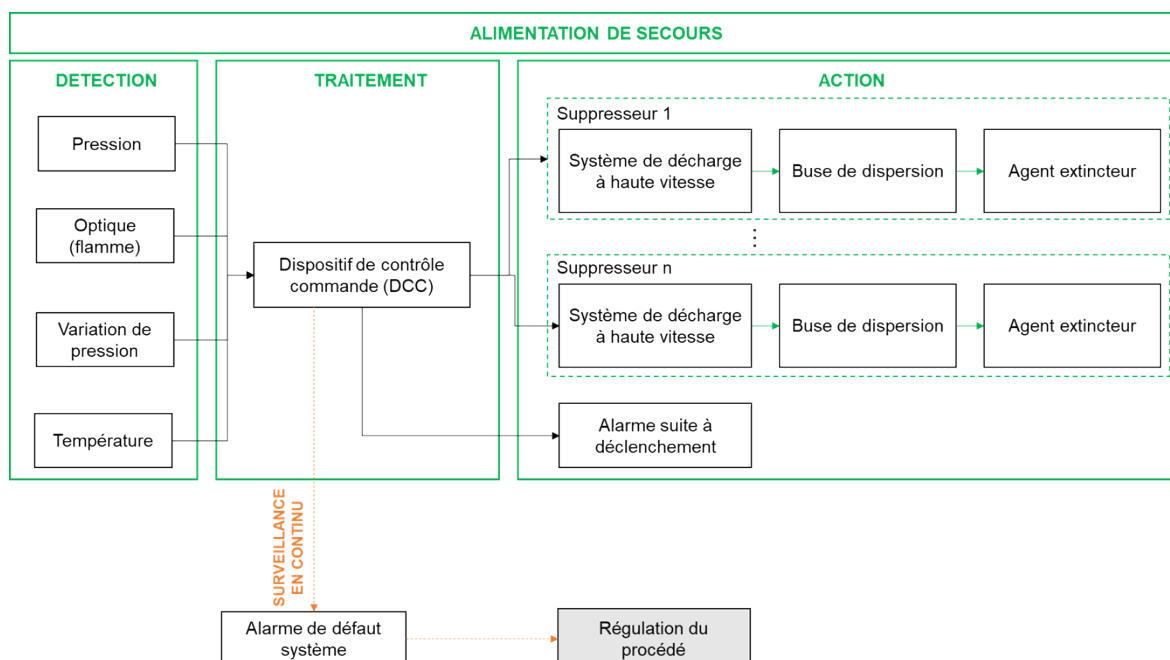


Figure 4 : Décomposition de la barrière « système de suppression d'explosion »

3.4 Fonctionnement d'un dispositif réel

On prend pour exemple un système réel, testé à l'Ineris. Dans notre cas d'étude, l'extincteur (de type HRD ou « conteneur ») se compose d'un réservoir d'azote sous pression (près de 25 L sous 55 bar), contenant environ 16 kg d'agent extincteur, du bicarbonate de soude, directement relié à une vanne à grand diamètre de passage (environ DN80). Le système est placé sur une cuve d'essai de 10 m³ dans laquelle on réalise une explosion de poussière d'amidon de maïs à la concentration de 700 g/m³ ($K_{ST} = 190 \text{ bar.m/s}$, $P_{\max} = 8.3 \text{ bar}$). Habituellement ce type de système est prévu pour se déclencher le plus tôt possible, alors que la pression d'explosion dans la cuve est de l'ordre de la dizaine de mbar. Dans notre exemple, le test a été conduit en vue de rechercher les limites du système et la pression de détection est de 90 mbar (au lieu par exemple de 20-30 mbar dans une application industrielle classique).



Figure 5 : Cuve d'explosion de 10 m³ de l'Ineris

La Figure 6 présente quelques signaux enregistrés lors de l'essai :

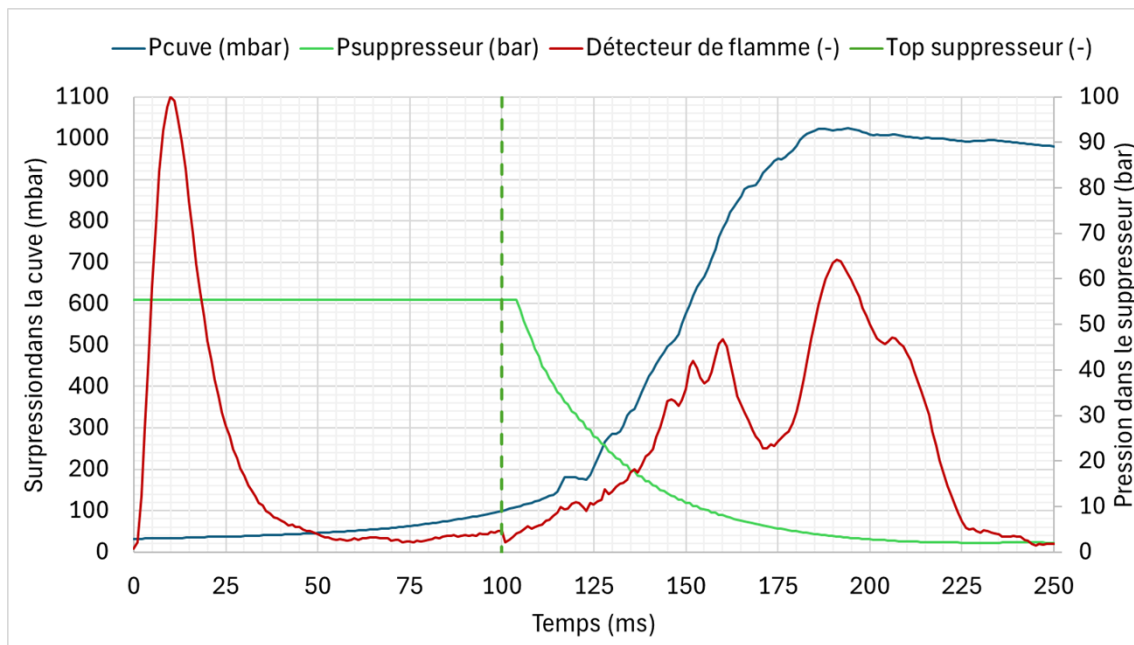


Figure 6 : Signaux enregistrés lors de l'essai de suppression d'explosion

Les événements enregistrés dans la Figure 6 peuvent être décrits comme suit :

1. L'allumage est effectué à $t = 0$ (l'injection de poussière a lieu bien avant mais elle n'est pas visible sur ce graphique).
2. La flamme se propage dans l'enceinte (courbe rouge dans la Figure 6), on voit d'abord l'effet de la mise à feu des inflammateurs (de $t = 0$ à $t = 50$ ms), très rayonnante, suivie d'une augmentation (après 75 ms) de la luminosité, monotone jusqu'à $t = 150$ ms environ.
3. Dans le même temps, la pression dans la cuve (en bleu) augmente progressivement et atteint 90 mbar, le seuil de détection, à $t = 95$ ms.
4. À $t = 100$ ms, l'explosion est détectée par le dispositif de contrôle commande (courbe verte en pointillés), il y a 5 ms de délai électrique de détection de l'explosion.
5. Il s'écoule encore 4 ms avant qu'on ne constate une chute de pression du réservoir d'azote (courbe verte continue), correspondant à l'injection de l'agent extincteur dans la cuve. Il s'agit d'un délai mécanique de fonctionnement du système. Il lui faut ensuite environ 75 ms pour se vider à 90 %.
6. À partir de $t = 110$ ms, l'augmentation de pression s'accélère et on constate quelques irrégularités. L'injection de l'agent dans le mélange explosif perturbe ce dernier.
7. Le signal de flamme n'est plus monotone. Il s'agit d'un capteur de luminosité, placé dans un nuage de particules opaques où se déplace une flamme. Il indique bien la présence d'une flamme mais il est difficile de corréler ces évolutions à des modifications de la flamme, sinon son extinction à $t = 225$ mbar.
8. La pression dans l'enceinte atteint, vers $t = 180$ ms, sa valeur maximale de l'ordre de 1 bar, contre 8,33 bar mesurés lors du test de référence. L'explosion a donc été efficacement supprimée.

Étant donné que le volume du réservoir d'azote du dispositif de suppression est d'environ 25 L et qu'il est chargé à 55 bars, l'augmentation de pression dans une enceinte fermée de 1 m³ due à ce dispositif est estimée à au moins 170 mbar. Le signal de pression enregistré dans la cuve dans cet exemple est comparé avec celui de l'essai de référence sans le supprimeur :

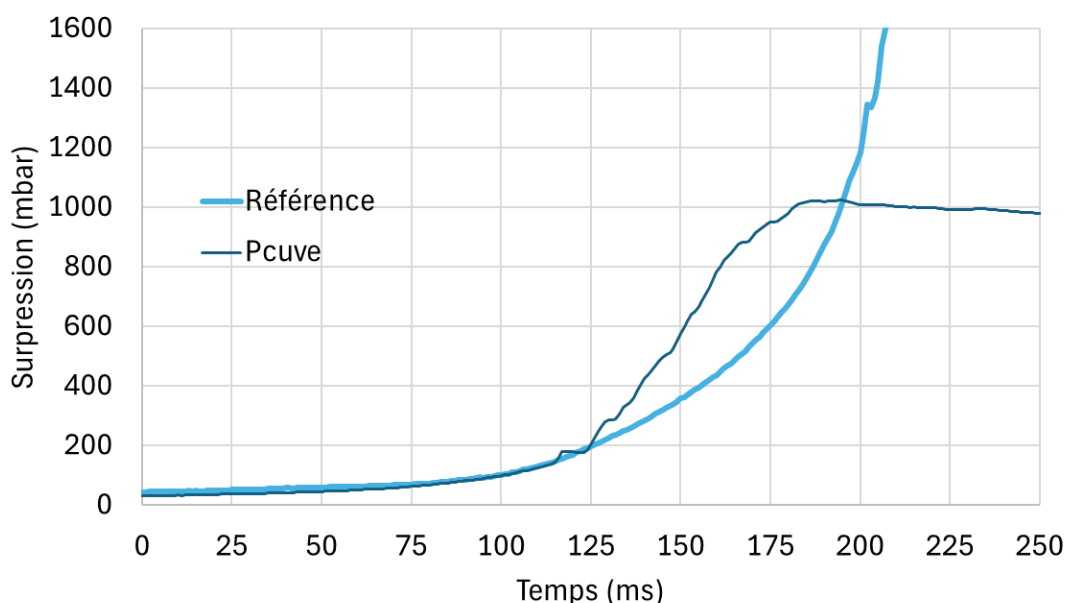


Figure 7 : Signaux enregistrés lors de l'essai de suppression d'explosion et l'essai de référence

On constate que l'injection de l'agent extincteur conduit d'abord à une augmentation de la surpression, avant l'extinction de la flamme, puis est moins rapide que dans le cas de la cuve fermée sans supprimeur. Cette hausse peut avoir deux origines : une augmentation de la turbulence de l'écoulement dans les premiers instants qui peut conduire à un accroissement de la surface de flamme (cet effet peut avoir un impact significatif en particulier lors d'une explosion de gaz), et l'ajout d'une grande quantité de gaz inerte N₂ par le dispositif de suppression d'explosion.

3.5 Détection d'explosion et déclenchement du système de suppression d'explosion

Le principe de base des systèmes de suppression d'explosion est d'injecter très vite, dès le début de l'explosion une grande quantité d'un agent extincteur de flamme. L'absence d'activation ou une activation tardive du système de décharge réduit considérablement l'efficacité de l'extinction. Par ailleurs, en raison de la dynamique rapide et de la nature variable de l'agent extincteur (eau surchauffée, CO₂ liquide, gaz N₂ sous pression...), un déclenchement intempestif pourrait mettre en danger des opérateurs ou détruire le produit traité dans le procédé, entraînant une perte de production et des coûts potentiellement significatifs pour l'industriel. La chaîne de commande de ces systèmes est donc un composant critique de sécurité.

Dans la norme NF EN 14373, il est spécifié que le système doit inclure un détecteur d'explosion et un dispositif de contrôle commande (DCC) capable de :

- Traiter les signaux de détection (détection de la présence de flamme ou du dépassement d'un seuil de pression ou de vitesse de montée en pression).
- Déclencher les supprimeurs (plusieurs supprimeurs peuvent être connectés à un DCC).
- Déclencher des verrouillages et des alarmes en fonction de l'état transmis en continu par le dispositif (fonctionnel, en panne, indisponible, ...).
- Inclure un système de désarmement pour éviter tout déclenchement intempestif pendant une intervention des opérateurs sur l'enceinte protégée.
- Activer la mise en sécurité automatique du procédé protégé en cas d'activation (intempestive ou non), de défaillance ou de panne. Le DCC doit pouvoir émettre un ordre de mise en sécurité, tel qu'un arrêt d'urgence, la fermeture d'une vanne ou l'arrêt d'un système de chauffage. Ce dernier point implique également d'avoir une alimentation de secours, pour maintenir une protection inchangée et ininterrompue contre l'explosion pendant au moins 4 heures, selon les exigences de la norme NF EN 14373.

Il est possible, et souvent recommandé, de combiner plusieurs capteurs : de flamme, de pression ou de variation de pression principalement, à un DCC, lui-même connectable à plusieurs types de supprimeur, identiques ou non (par exemple de capacités différentes), pour former le système de suppression d'explosion. Néanmoins lorsqu'elles existent, ces options doivent avoir démontré leur efficacité et être inscrites explicitement dans le certificat du système de suppression d'explosion.

3.6 Mécanismes d'extinction d'une flamme de gaz ou de poussières

Une explosion est la conséquence de la propagation d'une onde de combustion (flamme) dans un mélange inflammable et qui transforme, sur son passage, les réactifs en produits de combustion. Cette onde est une zone réactive d'épaisseur extrêmement faible à travers laquelle se produit la réaction.

Dans la situation qui nous intéresse, la vitesse de flamme est inférieure à la vitesse du son. Il s'agit d'une "déflagration". Si on considère que la flamme se propage dans un mélange combustible homogène et de composition uniforme ("flamme de prémélange gazeux"). La flamme est alors une interface mince qui sépare les réactifs des produits de combustion et se déplace à une vitesse de combustion turbulente qui dépend des réactifs (par la vitesse fondamentale de flamme S_u et le taux d'expansion E des produits brûlés) mais également de son environnement : la concentration, l'état d'agitation, la turbulence du mélange, la géométrie de l'enceinte, ...

La vitesse de propagation de la flamme dans les réactifs, S_u (vitesse de combustion laminaire), dépend de manière exponentielle de la température de la flamme T_f , elle-même fonction de la composition du mélange. Ainsi lorsque T_f diminue, la vitesse de combustion diminue fortement. Tout phénomène susceptible de diminuer la température maximale de la flamme, comme les pertes thermiques, provoque une diminution de la vitesse de combustion et peut conduire éventuellement à l'extinction de la flamme.

Selon Williams (1985), l'extinction des flammes est très généralement induite par les pertes de chaleur qui affectent la zone de préchauffage de la flamme ou les gaz brûlés situés immédiatement en aval de la flamme. Les analyses théoriques reposent sur le postulat que de petits écarts sur T_f par rapport à la situation adiabatique suffisent pour provoquer l'extinction de la flamme tant leur incidence sur le taux de combustion est grande. À cela on ajoute un effet de dilution lors de l'injection de l'agent extincteur et, dans certains cas, une action chimique par l'ajout d'élément dont le but est de capturer les radicaux libres émis lors de la combustion.

Pour le cas des poussières, les travaux fondamentaux conduits au cours de ces vingt dernières années à l'Ineris notamment indiquent qu'une flamme de poussières n'est plus capable de se propager lorsque la température de la combustion n'est plus suffisante pour permettre le changement d'état des particules (fusion, pyrolyse, vaporisation) en aval de la zone de combustion vive de la flamme. Contrairement aux gaz, ce comportement semble propre aux explosions de poussières.

La réaction de combustion est de manière générale plus facile avec les mélanges homogènes, notamment des gaz, qu'avec les mélanges dispersés de poussières. En effet, lors d'une explosion, les produits en combustion diffusent de la chaleur vers les réactifs, permettant ainsi d'initier la réaction dans ceux-ci et de propager la flamme.

Pour que la réaction soit rapide, c'est-à-dire pour observer une explosion, il faut que l'oxydant (l'oxygène de l'air) soit mélangé efficacement avec le combustible. Cela implique largement des réactions en phase gazeuse plutôt que des réactions de surface solide-gaz sur les particules combustibles. Ainsi, l'explosion de poussière requière le plus souvent une étape supplémentaire, par rapport au cas des gaz combustibles, de diffusion d'espèces combustibles gazeuses par échauffement ou pyrolyse des particules en amont de la flamme. Une conséquence est que l'extinction des nuages de gaz combustibles est globalement plus difficile que celle des nuages de poussières combustibles. Néanmoins au final, dans les deux cas, il s'agit d'absorber de la chaleur dans le voisinage du front de réaction pour empêcher la propagation de la flamme. Il s'agit de refroidir le mélange jusqu'à une température critique, ce qui peut être accompli de plusieurs manières :

- Appauvrissement de la richesse en combustible du nuage jusqu'à la « concentration minimale d'explosivité ».
- Appauvrissement en oxygène du nuage jusqu'à la « teneur limite d'oxygène ».
- Introduction dans le nuage de particules inertes jusqu'à l'extinction. Ce dernier point inclut les techniques de suppression des explosions. En pratique les systèmes de suppression d'explosion à poudre incluent un dispositif qui permet de disperser l'agent extincteur, il s'agit souvent d'un gaz inerte comme du diazote N_2 sous pression. L'injection de ce gaz propulseur dilue également le mélange explosif.
- Si on s'intéresse à des extincteurs à eau, il y a quelques différences sur les mécanismes fondamentaux mais l'objectif reste d'absorber de la chaleur près du front de combustion. On revient sur ce point au paragraphe 3.6.2 ci-après.

3.6.1 Spécificités de l'extinction des explosions avec des poudres inertes

Les travaux menés à l'Ineris ont démontré qu'il est indispensable que les particules inertes puissent absorber la chaleur dégagée par la combustion dans un délai comparable au temps de combustion de la flamme.

En pratique, pour les flammes de gaz, notre retour d'expérience et les travaux théoriques de Joulin (1980) sur le sujet, indiquent une forte influence de la granulométrie des particules inertes et de la nature du gaz combustible sur l'efficacité de l'extinction. Des essais réalisés à l'Ineris sur des explosions de mélange hydrogène-air à 16 % ont montré que des concentrations de l'ordre de 1, 5 ou 25 kg/m³ en particules inertes de bicarbonate de soude de diamètres moyens respectifs de 10, 20 ou 60 µm seraient nécessaires pour ralentir la combustion sans pour autant l'éteindre. La nature du gaz combustible est également un paramètre important : le modèle indique par exemple qu'avec du gaz méthane à la stœchiométrie dans l'air, une concentration de 1 à 2 kg/m³ en particules de bicarbonate de 60 µm est suffisante pour éteindre la flamme.

Pour les flammes de poussières, pour obtenir une extinction efficace de la flamme, il faut que les particules inertes aient une granulométrie équivalente ou inférieure à celle des particules combustibles. Dans cette situation, pour des particules hydrocarbonées, il est généralement admis qu'une explosion devient impossible lorsque le taux de particules inertes dans un mélange parfait combustible-inerte atteint 70 à 80 % en masse. Ce taux d'inerte limite est propre à chaque mélange particulaire. Pour qu'une flamme soit éteinte par un agent extincteur inerte, la quantité de cet agent dispersée doit excéder ce taux limite. Ce critère constitue une condition nécessaire, mais non suffisante, pour atteindre l'extinction. Il est important de noter que ce taux limite n'est pas directement lié à la violence de l'explosion, généralement représentée par le coefficient KSt, mais il est lié à la température de la flamme, donc à la pression maximale d'explosion P_{max}. Autrement dit, dans des conditions équivalentes, il faut vraisemblablement plus d'inertes pour stopper une flamme de poussières métalliques brûlant à haute température, qu'une flamme de particules de l'industrie agroalimentaire telle que de la farine de blé.

3.6.2 Spécificités de l'extinction des explosions avec des gouttelettes d'eau

L'eau est un excellent échangeur thermique, aisément disponible et non toxique, ce qui en fait un bon candidat pour l'extinction des flammes, dès lors qu'il n'y a pas d'incompatibilité chimique avec les réactifs présents. Pour cette raison, les supresseurs à eau pressurisés sont souvent utilisés dans l'industrie agroalimentaire (tours d'atomisation). En revanche on évitera par exemple d'utiliser de l'eau pour éteindre une explosion de poussières métalliques, situation dans laquelle du gaz hydrogène, explosif, peut être produit.

En cas d'explosion, il reste nécessaire de mélanger rapidement l'agent extincteur au milieu en combustion. Cela implique de disperser l'eau sous forme d'un nuage de gouttelettes ou sous forme de vapeur. Vis-à-vis des extincteurs à poudre, il y a quelques différences sur les mécanismes fondamentaux mais les conclusions resteront similaires : les gouttelettes d'eau peuvent absorber de l'énergie lorsqu'elles sont fragmentées par les ondes de pression, chauffées par la flamme et lorsqu'elles changent d'état, la vaporisation étant un phénomène endothermique. Il y aura dans ce cas aussi un diamètre optimum pour les gouttelettes d'eau.

Du point de vue des technologies pour les supresseurs à eau, il existe 2 grandes catégories : les supresseurs à eau froide et les supresseurs à eau surchauffée.

Avec un supresseur à eau froide, il est nécessaire d'avoir un fluide porteur inerte pour permettre la dispersion rapide des gouttelettes d'eau dans le volume à protéger. Typiquement, il s'agit de CO₂ liquide ou gaz N₂, sous pression. Au déclenchement du supresseur, s'il s'agit de CO₂ liquide (typiquement sous une pression de l'ordre de 40 bar à température ambiante), il va flasher, et permettre une injection rapide de l'eau dans le volume protégé. Avec du gaz N₂ sous pression, c'est la détente du gaz qui met en mouvement le liquide.

Dans un système de suppression d'explosion à eau surchauffée, l'eau est chauffée en permanence par une résistance chauffante thermostatée et en effet, la température de l'eau est contrôlée en permanence. L'ouverture du supresseur entraîne une vaporisation rapide d'une partie de l'eau et la formation d'un nuage de gouttelettes dans l'enceinte protégée.

3.7 Accidentologie et modes de défaillance

La base de données ARIA (Analyse, Recherche et Information sur les Accidents) répertorie les incidents, accidents ou presque accidents qui ont porté, ou auraient pu porter atteinte à la santé ou la sécurité publiques ou à l'environnement. Au moment de la publication de cette fiche, à la connaissance de l'Ineris, aucun événement impliquant des supresseurs d'explosion n'a été recensé dans la base ARIA.

Néanmoins, on peut trouver des publications de diverses sources, internationales, mentionnant des accidents liés à des défaillances de ces systèmes. Par exemple Dowell (1999) a documenté un cas de déclenchement intempestif d'un système de suppression d'explosion. Il s'agissait d'un système reposant sur une détection de pression. Suite à une dérive, de l'eau est entrée dans le procédé protégé (un broyeur de poudres plastiques) et a déclenché les détecteurs du supresseur. L'injection rapide de gaz dans l'enceinte déjà pressurisée par l'eau et mal dimensionnée (le rapport fait état d'un excès d'agent extincteur d'explosion vis-à-vis du besoin réel) a conduit à son éclatement.

Comme indiqué précédemment, un déclenchement intempestif représente un danger. En plus, un déclenchement en l'absence d'explosion ne correspond pas à une mise en sécurité, mais au contraire à une perte de la fonction de sécurité, vu qu'il s'agit d'un dispositif « one shot », c'est-à-dire qu'il ne peut remplir sa fonction qu'une seule fois. Une fois activé, le système est considéré comme hors service et doit impérativement être reconditionné avant de pouvoir être à nouveau opérationnel.

Kaelin (2005) a documenté un accident sur une trémie dans une installation traitant des poussières combustibles au cours duquel une installation vraisemblablement inadéquate du système de suppression a conduit à l'échec de la suppression : juste devant la sortie du supresseur, un obstacle obturait près de 50 % de la surface de décharge, empêchant l'agent extincteur de sortir avec un débit suffisant et de se mélanger efficacement avec les réactifs.

Enfin, selon un rapport de l'OSHA de 2023², un défaut de maintenance du système de suppression d'explosion d'un élévateur à godets a été un facteur majeur dans l'explosion survenue le 21 avril 2023 à l'usine Ovest d'Archer-Daniels-Midland Company, qui a entraîné l'hospitalisation de trois employés souffrant de brûlures et d'autres blessures, ainsi que des dommages considérables à l'élévateur à grains. Les enquêteurs de l'Administration de la sécurité et de la santé au travail du Département du Travail des États-Unis, intervenus suite à l'explosion de poussières combustibles d'amidon de maïs, ont déterminé que le système de suppression d'explosion sur la jambe de l'élévateur à godets intérieur était non fonctionnel et en mauvais état. Les enquêteurs ont découvert que l'installation de transformation de céréales n'avait pas effectué d'inspections ni de tests des systèmes de suppression d'explosion depuis fin 2016.

D'après les essais réalisés à l'Ineris, plusieurs facteurs peuvent conduire à un échec de la suppression d'explosion, tels que :

- Un dimensionnement incorrect (quantités ou débits d'injection de l'agent extincteur insuffisants).
- Le non-respect des règles d'installation (mauvais positionnement des détecteurs ou des supprimeurs).
- Une obstruction partielle dans l'enceinte protégée, empêchant la bonne distribution de l'agent extincteur.
- Un dépôt ou accumulation de toute substance sur les parois internes de l'enceinte protégée, qui altérerait la chaîne de détection ou bloquerait la sortie des supprimeurs.
- Une modification des réactifs traités dans le procédé.
- La présence d'encrassement, corrosion, abrasion, perte de lubrifiant dans les organes mobiles des supprimeurs.

À partir du retour d'expérience et des essais réalisés, on constate que la majorité des défaillances identifiées sont des défaillances systématiques. Les défaillances systématiques, par opposition aux défaillances aléatoires dues uniquement au matériel, sont des défaillances liées à la conception, à la spécification, au processus de fabrication, aux procédures d'exploitation et maintenance ou à la documentation.

Il convient toutefois de souligner que les défaillances aléatoires restent possibles, en particulier sur les composants électroniques, bien que celles-ci soient généralement détectables. L'enjeu principal demeure la mise en œuvre d'un programme de tests rigoureux, afin de garantir le niveau de protection spécifié (voir paragraphe 4.5.1).

La norme NF EN 14373 définit des exigences de fiabilité du système, qui doit être garantie par la surveillance des éléments suivants au minimum :

- Circuits de câblage pour la continuité, les défauts de masse et les circuits ouverts.
- Alimentation secteur.
- Alimentation électrique de secours.
- Circuit de verrouillage de sécurité du système.
- Circuit de verrouillage de désactivation du système.
- Dispositifs électriques de déclenchement.
- Dispositifs de détection.
- Le bon état des supprimeurs d'explosion à décharge rapide.

Ces éléments doivent être surveillés en permanence, et le DCC doit, selon la norme NF EN 14373, être en mesure de déclencher un ordre de mise en sécurité du procédé protégé en cas de détection d'une défaillance ou d'une panne.

Conformément aux exigences de la norme NF EN 14373 ; la présence d'une alimentation de secours est nécessaire afin d'assurer une continuité de protection pendant une durée minimale de 4 heures.

² <https://www.osha.gov/news/newsreleases/region5/10182023>

4 Critères d'évaluation des performances

En règle générale, l'évaluation de la performance des systèmes de suppression d'explosion 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'un système de suppression 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 le système de suppression d'explosion en tant que barrière de sécurité.

4.1 Indépendance

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

- Qu'une défaillance du système de suppression d'explosion ne peut pas être la cause du scénario.
 - Le scénario redouté est celui d'une explosion. La défaillance d'un système de suppression d'explosion, en particulier son déclenchement intempestif, ne doit pas être à l'origine d'une explosion.
- Que la performance du système de suppression d'explosion n'est pas dégradée par l'occurrence des événements initiateurs.
 - L'explosion, une fois détectée, ne doit pas empêcher ou ralentir le fonctionnement des suppresses, de même qu'un supprimeur en fonctionnement ne doit pas perturber le fonctionnement des autres suppresses. Après le déclenchement d'un système de suppression d'explosion, la flamme doit être éteinte. Le système doit alerter sur son déclenchement et la nécessité d'une intervention externe pour son reconditionnement, avant remise en service de l'installation.

4.2 Efficacité

L'efficacité en tant que barrière de sécurité correspond à l'aptitude du système de suppression 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 pour un scénario d'accident précis. Elle repose principalement sur les principes de dimensionnement adapté et de résistance aux contraintes spécifiques, ainsi que sur le positionnement adéquat des différents suppresses suivant les préconisations du certificat associé.

4.2.1 Dimensionnement d'un système de suppression d'explosion

4.2.1.1 Étape 1 : estimer la quantité minimale d'agent extincteur

Pour dimensionner un système de suppression d'explosion à poudre sur une installation industrielle, il faut d'abord estimer la quantité d'agent extincteur requise. Ce type d'information peut se calculer, le plus souvent avec un modèle dédié au supprimeur utilisé.

Admettons par exemple qu'il s'agisse d'une explosion de poussières d'amidon de maïs et que la situation requière d'avoir au moins 70 % d'agent extincteur en masse dans le volume V pour obtenir l'extinction de la flamme. Il est alors possible de déterminer la concentration σ_{lim} en agent extincteur à atteindre dans le volume protégé :

$$\sigma_{lim} = \frac{c \cdot 0.7}{1 - 0.7} \quad \text{Équation 4-1}$$

avec c la concentration en poussières dans le procédé. La masse initiale d'agent dans les suppresses doit être supérieure à $V \cdot \sigma_{lim}$ pour garantir que la concentration minimale σ_{lim} soit atteinte dans l'enceinte.

Ainsi, pour dimensionner une solution de suppression :

$$\sigma_{lim} = h/V \cdot \sum_{i=1}^N M_i \quad \text{Équation 4-2}$$

où h est un coefficient inférieur à 1, car une partie du gaz et de l'agent doit rester dans le dispositif à la fin de la suppression. Il convient alors de choisir N systèmes de suppression d'explosion contenant chacun une masse M_i d'agent extincteur. Les systèmes ne sont pas nécessairement de capacités identiques.

4.2.1.2 Étape 2 : Vérifier que l'agent extincteur peut être injecté partout dans le procédé protégé

La seconde condition est de vérifier que tous les dispositifs choisis sont effectivement capables de remplir la totalité du volume : il y a ici une question de portée maximale du jet d'agent extincteur, dépendante de chaque dispositif.

4.2.1.3 Étape 3 : Estimer la surpression réduite d'explosion P_{red}

Enfin il ne faut pas perdre de vue l'objectif réel qui est la protection de l'enceinte : il s'agit de limiter la surpression réduite d'explosion P_{red} à un niveau acceptable pour la structure. Il faut donc aussi estimer P_{red} dans l'enceinte en cas de suppression réussie d'une explosion. On peut résumer l'événement général de suppression d'explosion dans une enceinte totalement fermée comme suit :

1. L'explosion est initiée, et la pression dans l'enceinte monte jusqu'à la pression d'activation du dispositif (ΔP_a).
2. L'explosion est détectée par le dispositif. Généralement, le délai interne de détection est de l'ordre quelques millisecondes dans l'exemple de l'essai présenté plus haut. Pendant ce temps, la surpression ΔP dans l'enceinte continue d'augmenter proportionnellement à la violence de l'explosion et au volume de l'enceinte :

$$\Delta P = \Delta P_a + \alpha_1 \cdot \frac{K_{ex}}{V^{1/3}} \cdot t_d \quad \text{Équation 4-3}$$

avec α_1 , une constante comprise entre 0 et 1, et K_{ex} , serait le K_g pour les gaz ou le K_{st} pour les poussières.

3. Le signal de détection déclenche le dispositif, qui commence la dispersion des particules. Cette étape d'activation du dispositif dure une durée t_a , également de quelques millisecondes, pendant laquelle l'explosion se poursuit, toujours sans perturbation dans l'enceinte :
4. Les particules doivent ensuite se disperser dans l'enceinte et se mélanger au nuage. Ce processus se fait dans un délai t_{mix} . Un certain temps t_{conc} est nécessaire pour atteindre une concentration suffisante d'agent afin d'éteindre l'explosion. Par ailleurs, l'injection du gaz propulseur dans l'enceinte fermée entraîne une augmentation de pression ΔP_r qui dépend des volumes et de la pression du gaz injecté. Ainsi la pression dans l'enceinte doit approcher la valeur donnée par :

$$P_{red} = \Delta P_a + k \cdot \frac{K_{ex}}{V^{1/3}} \cdot (t_{ouv} + t_{mix} + t_{conc}) + \Delta P_r \quad \text{Équation 4-4}$$

où k est une constante entre 0 et 1, reflétant que l'explosion est en moyenne moins rapide qu'une explosion dans une enceinte totalement fermée sans dispositif de suppression.

Cette équation traduit le fait que tant que la concentration requise en agent extincteur n'est pas atteinte, la pression continue d'augmenter d'une part parce que l'explosion n'est pas terminée et d'autre part, parce qu'on détend un fluide pressurisé dans l'enceinte.

L'estimation de ΔP_r , la contribution du gaz porteur, est relativement simple : connaissant le volume de l'enceinte V, et les volumes et pression de fonctionnement V_c et P_c des N systèmes de suppression d'explosion utilisés, on calcule :

$$\Delta P_r \leq \frac{N \cdot V_c \cdot P_c}{V + V_c} \approx \frac{N \cdot V_c \cdot P_c}{V} \quad \text{Équation 4-5}$$

Les temps de fonctionnement t_{ouv} , t_{mix} et t_{conc} sont mesurables lors d'essais et un modèle permettant de les approcher peut être proposé. Le succès de la suppression dépend de paramètres statiques et dynamiques de l'explosion, à savoir :

- La surpression à partir de laquelle les supresseurs sont activés.
- La surpression additionnelle induite par le gaz propulseur.
- La dynamique propre au dispositif de suppression, qui dépend du comportement mécanique des équipements : le délai de détection et activation t_{ouv} , le délai de mélange D_b (diamètre d'injection du dispositif), Q_m (débit massique moyen du dispositif) et au temps de réponse de la chaîne électronique de détection/activation.
- La violence de l'explosion, mesurée par le paramètre K_{St} .
- La concentration massique minimale de particules inertes (σ_{lim}), qui dépend des limites d'inflammabilité de la poussière et de sa quantité, mais qui est indépendant de K_{St} .

Pour aller plus loin sur ce sujet on peut se référer au rapport Ω 21 (2025) [3] sur les explosions de poussières, disponible sur le site de l'Ineris³.

4.2.2 Choix et installation d'un système de suppression 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.

Les aspects calculatoires du dimensionnement d'un système de suppression d'explosion ont été abordés au paragraphe précédent. De manière plus globale, un dimensionnement correct du système implique d'être attentif sur plusieurs points, tels que :

- La détection d'explosion, qui doit être adaptée aux conditions de fonctionnement du procédé : le ou les détecteurs doivent être disposés de manière à détecter l'explosion le plus tôt possible et sélectionnés de manière adéquate. Par exemple on évitera de placer un détecteur optique dans un mélange opaque ou un capteur détectant un seuil de surpression élevé dans un procédé qui fonctionnerait en dépression. En général, la détection repose sur plusieurs capteurs de différente nature, par exemple un capteur de pression et une mesure de vitesse de montée en pression afin d'éviter des déclenchements intempestifs en raison d'une fluctuation lente de pression dans le procédé, liée à son fonctionnement normal.
- La nature de l'agent extincteur, qui doit être compatible avec les produits traités dans le procédé.
- La quantité totale d'agent extincteur injectée, qui doit être suffisante pour éteindre l'explosion.
- Le nombre et positionnement des supresseurs qui doit permettre de remplir tout le volume protégé avec l'agent extincteur.
- Le volume protégé ne doit pas être endommagé par le bon fonctionnement du système de suppression d'explosion. Le niveau de surpression atteint lors du fonctionnement du système peut être évalué par le fournisseur du système, en général sur la base d'un modèle tel que celui présenté au paragraphe 4.2.1, qui fait partie du dossier de certification du produit.
- Les supresseurs d'explosion doivent pouvoir résister à la pression et à la température de fonctionnement, au régime pulsatoire, aux cycles de pression, et à leur environnement externe.
- Les systèmes de suppression d'explosion doivent être conçus pour conserver les performances spécifiées dans leur environnement et dans les conditions du procédé.
- Les matériaux utilisés pour l'ensemble du système doivent être choisis en fonction de leur bonne adaptation aux conditions chimiques et physiques auxquelles ils seront soumis en service. On pense par exemple à l'environnement du système électronique de pilotage et de son alimentation de secours dont le fonctionnement pourrait être affecté par des conditions particulières de température et humidité dans le voisinage du procédé.
- Les effets postérieurs au déclenchement du système d'isolation d'explosion doivent être intégrés convenablement dans l'étude de sécurité liée au procédé.

³ <https://www.ineris.fr/fr/omega-21-explosions-poussieres-phenomenologie-modelisation-effets>

4.2.3 Cas limites

L'objectif de cette section est l'identification de certains cas limites dans lesquelles les systèmes de suppression d'explosion peuvent être mis en défaut. Lors de la suppression d'explosion, l'objectif est avant tout de protéger l'enceinte en éteignant la flamme à temps, c'est-à-dire avant que la pression ne soit trop élevée pour l'enceinte. Il faut non seulement être capable d'éteindre les flammes mais en plus, les éteindre rapidement.

Il est légitime de se poser la question d'une part des facteurs qui font qu'un mélange sera plus difficile à éteindre et d'autre part de ce qui pourrait conduire à une action trop lente ou inefficace de la suppression.

4.2.3.1 Mélanges plus difficiles à éteindre

Il est déjà spécifié dans la norme NF EN 14373 que les flammes des déflagrations gazeuses et des mélanges hybrides-gaz poussières combustibles sont en général plus difficile à éteindre que les flammes de nuages de poussières.

Le principe de la suppression d'explosion reposant largement sur le refroidissement du mélange, on comprend intuitivement que l'énergie minimale d'inflammation (EMI) et la température d'auto-inflammation du mélange (TAI) sont deux paramètres importants. De notre expérience, des poussières comme le soufre, ayant une EMI de l'ordre de 5 mJ et une TAI de 190°C sont considérablement plus difficile à éteindre par exemple que les flammes de poussières d'amidon de maïs, d'EMI = 10-30 mJ et TAI = 400 °C.

De même, les flammes de poussières métalliques peuvent être significativement plus chaudes que celles des particules organiques (agroalimentaire, biomasse), nécessitant alors un taux d'inerte plus élevé pour obtenir l'extinction.

4.2.3.2 Mélange de l'agent extincteur au nuage en combustion

Obtenir les conditions propices à l'extinction en termes de quantité d'agent injecté n'est pas suffisant : il faut que l'agent extincteur soit présent à proximité du front de flamme, et ce, rapidement, faute de quoi la pression dans l'enceinte peut devenir trop élevée.

Intuitivement on comprend que l'enceinte protégée contient de nombreux obstacles, qui peuvent être des organes internes du procédé, alors il faut s'assurer que le nuage d'agent extincteur peut effectivement atteindre les zones cachées par les obstacles. Cela peut nécessiter de multiplier le nombre de suppresseurs.

Également nous avons déjà constaté expérimentalement à l'Ineris que deux suppresseurs placés en vis-à-vis à une distance modérée (1-2 m dans nos essais) peuvent se perturber mutuellement, l'un empêchant la correcte ouverture de l'autre. La disposition des suppresseurs peut avoir un effet sur les performances du système de suppression d'explosion.

Dans des enceintes de très grands volumes, certaines zones peuvent difficilement être atteinte par l'agent extincteurs si la distance de propulsion de l'agent extincteur est trop courte. Le design de la buse d'injection, ainsi que la répartition des suppresseurs sur l'enceinte, doivent être soigneusement étudiés.

4.2.3.3 Dynamique d'explosion

Par ailleurs on voit apparaître dans le modèle décrit dans les exemples précédents le paramètre K_{ex} qui qualifie la vitesse de montée en pression induite par la combustion. Dans un volume donné, plus la valeur de K_{ex} est grande et plus la pression résiduelle sera importante. Un paramètre comme le K_g ou K_{St} n'influe pas sur la quantité d'agent nécessaire à l'extinction de la flamme mais il intervient malgré tout lors du dimensionnement de la solution de protection.

Dans un volume isolé, lors d'une explosion, 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. En pratique, il n'y a pas d'ouverture vers l'extérieur mais le plus souvent, il y aura des canalisations de transport connectant l'enceinte au reste du procédé. La courbe d'augmentation de la pression en fonction du temps peut être estimée à l'aide d'un modèle tel que celui de Lewis et von Elbe (1987) :

$$\frac{1}{P} \frac{dP}{dt} = \gamma \cdot \frac{Q_{produit} - Q_{perdu}}{V} \quad 6$$

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 des ouvertures éventuellement présentes (par exemple des canalisations reliant l'équipement protégé à d'autres équipements). 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 réactif « froids » en produits brûlés 5 à 10 fois plus chauds (car les températures sont exprimées en Kelvins), selon le mélange réactif considéré.

Avec cette équation, on comprend que les mélanges brûlant à plus haute température ou produisant plus rapidement de plus grandes quantités de gaz brûlés conduiront à une augmentation plus rapide de la surpression. Également il apparaît que les petits volumes seront plus difficiles à protéger car il s'agit également d'un paramètre influant la vitesse de montée en pression. On rappelle que le but du supprimeur est d'éteindre la flamme, avant d'avoir atteint un seuil critique de pression qui endommagerait la structure. La protection des petits volumes (typiquement 1 m³ et en deçà) pose donc des difficultés particulières.

4.3 Temps de réponse

Comme discuté dans le paragraphe 4.2.3.3, le taux de production des gaz brûlés par l'explosion (donc la vitesse de la flamme) et le volume de l'enceinte sont les deux paramètres principaux qui déterminent la vitesse de montée en pression dans l'enceinte.

Le système de suppression doit être capable de distribuer l'agent extincteur d'autant plus vite que le volume est petit ou que la combustion est rapide. On parle typiquement de quelques dizaines à une voire deux centaines de millisecondes, au plus.

Une fois l'explosion démarrée, c'est le délai maximum dont dispose le système de suppression d'explosion pour détecter l'explosion, déclencher les supprimeurs et distribuer une quantité suffisante d'agent extincteur dans tout le volume protégé. Pour répondre à cette contrainte, les systèmes de suppression d'explosion s'appuient sur une détection précoce de l'explosion et l'installation souvent de plusieurs supprimeurs à haut débit d'injection. On a détaillé au paragraphe 4.2.1 les différents temps caractéristiques de fonctionnement d'un système de suppression d'explosion.

4.4 Niveau de confiance

Les systèmes de suppression d'explosion doivent être certifiés conformes à la Directive ATEX 2014/34/UE. La norme harmonisée NF EN 14373, dédiée spécifiquement à ces dispositifs, impose une évaluation de la sécurité fonctionnelle de l'ensemble des éléments du système, en prenant en compte au minimum les points suivants :

- Les anomalies de conception des matériels.
- L'existence de conditions environnementales défavorables, y compris les perturbations électromagnétiques.
- Les anomalies de conception du logiciel.
- La durée de vie des éléments du système de protection.

Dans le cas d'une anomalie identifiable telle que la fonction de sécurité du système ne peut pas être garantie au niveau convenu d'intégrité de la sécurité, la norme prévoit que le système de suppression intègre un moyen de mise en sécurité préventive permettant de rendre sûre l'installation.

L'évaluation de la sécurité fonctionnelle peut être faite par exemple suivant la norme NF EN 15233 : 2007 « Méthodologie relative à l'évaluation de la sécurité fonctionnelle des systèmes de protection pour atmosphères explosibles » [7]. Cette norme permet de structurer l'évaluation fonctionnelle des systèmes de protection en atmosphères explosibles afin de garantir que, même en présence de défaillances, le système reste capable de réduire efficacement le risque d'explosion. En revanche, la norme NF EN 15233 ne fournit pas de méthodes de calcul de fiabilité ni d'approches quantitatives pour l'évaluation de l'intégrité fonctionnelle des systèmes. Pour ces aspects, elle renvoie explicitement à des référentiels complémentaires, notamment la norme IEC 61508.

Lorsqu'un élément est certifié SIL selon la norme IEC 61508, on prendra un NC équivalent au niveau de la certification, à condition que les exigences d'efficacité et temps de réponse soient remplies et que la barrière fasse l'objet d'une politique de tests et maintenance adaptée. Les éléments certifiés SIL doivent être en particulier installés, paramétrés, testés et maintenus conformément aux prescriptions du constructeur et des limites de validité du certificat.

Si le constructeur souhaite adapter les préconisations d'installation, d'utilisation, de test et de maintenance d'un système certifié, une analyse spécifique doit être réalisée pour démontrer l'atteinte et l'adéquation des performances (efficacité et fiabilité) du système. Il est à noter que le certificat ne sera alors plus valide.

En l'absence d'analyse spécifique, un NC = 1 devra être affecté à la fonction de sécurité réalisée par les systèmes de suppression 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 NC = 2, en plus de la justification des critères d'indépendance, efficacité et temps de réponse, une étude détaillée de fiabilité pourrait être réalisée portant notamment sur une identification exhaustive des possibles causes et modes de défaillance des systèmes de suppression 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 et aux conditions de fonctionnement du procédé. Également, il faudrait s'assurer qu'il n'y a pas de moyens d'isoler le système, que les brides de décharge sont dimensionnées pour les pires cas y compris pour les cas d'ouverture de plusieurs surpresseurs simultanés, qu'il n'y a pas de possibilité d'obstruction et en général que les causes de mauvais fonctionnement sont bien identifiées et traitées.

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 systèmes de suppression 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).

4.5 Évolution 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.

4.5.1 Tests périodiques et maintenance

Un système de suppression d'explosion est composé d'un ensemble d'équipements (détecteur, DCC, supprimeur(s), alimentation de secours ...) qui sont soumis aux conditions internes ou externes du procédé.

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 nettoyages périodiques du système, d'autant plus fréquemment que des écarts à la situation de référence sont constatés. On pense notamment à des vérifications des détecteurs, de leur capacité à effectivement détecter l'explosion. Un capteur de pression mécanique encrassé ou un système optique couvert d'un dépôt de poussière opaque peuvent conduire à une défaillance globale du système. Dans le cas des supprimeurs à poudre, il convient de vérifier périodiquement que la poudre n'est pas prise en masse.
- Des tests électroniques du DCC.
- Une vérification des réservoirs sous pression (une fuite, une perte de pression dans un supprimeur peut le rendre entièrement inefficace).
- Pour les systèmes à générateur de gaz, une vérification du bon fonctionnement des générateurs de gaz.
- Le remplacement des pièces d'usure, tels que les éventuels joints entre les différents équipements du système de suppression et le procédé.

La périodicité de la maintenance du système de suppression 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...). La fréquence des opérations de maintenance, de remplacement des pièces détachées et de nettoyage doit être documentée.

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.

Après déclenchement d'un système de suppression, il est nécessaire de vérifier et/ou d'étalonner tous les éléments du système. Le système de suppression, ainsi que l'équipement protégé doivent tous deux être nettoyés.

4.5.2 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).

Le changement d'agent supprimeur constitue une modification substantielle et n'est pas autorisé par la norme NF EN 14373.

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.

5 Références

- [1] Ineris. « Évaluation 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 poussières - OMEGA 21 » (2025). Disponible sur le site <https://www.ineris.fr>.
- [4] NF EN 14373 Systèmes de suppression d'explosion (2021).
- [5] NF EN 15089 Systèmes d'isolement d'explosion (2009).
- [6] NFPA 69 Standard on Explosion Prevention Systems (2024).
- [7] NF EN 15233 Méthodologie relative à l'évaluation de la sécurité fonctionnelle des systèmes de protection pour atmosphères explosibles (2007).
- [8] Note de doctrine relative aux mesures de maîtrise des risques instrumentées (MMRI), du 2 octobre 2013
- [9] Amyotte, P., Mintz, K. J., Pegg, M. J., Sun, Y.-H., Wilkie, K. I. (1991). Effects of methane admixture, particle size, and volatile content on the dolomite inerting requirements of coal dust. *Journal of Hazardous Materials*, 27, 187–203.
- [10] Amyotte, P., Mintz, K. J., Pegg, M. J. (1992). Effectiveness of various rock dusts as agents of coal dust inerting. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 5, 196–199.
- [11] Amyotte, P., Mintz, K. J., Pegg, M. J. (2005). Effect of rock dust particle size on suppression of coal dust explosions. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, 73 (Part B), 89–100.
- [12] Cashdollar, K. L., Sapko, M. J., Weiss, E. S., Harris, M. L., Man, C.-K., Harteis, S. P., et al. (2010). Report of Investigations 19679: Recommendations for a new rock dusting standard to prevent coal dust explosions in intake airways. U.S. Department of Health and Human Services, National Institute of Occupational Safety and Health, Atlanta, GA.
- [13] Dastidar, A. G., Amyotte, P. R., Pegg, M. J. (1997). Factors influencing the suppression of coal dust explosions. *Fuel*, 76, 663–670.
- [14] Dowell, A. M., Hendershot, D. C., & Keeports, G. L. (1999). Explosion caused by explosion suppression system. *Loss Prevention Bulletin*, (146), 3-4.
- [15] Joulin G., (1980), Asymptotic analysis of non-adiabatic flames: heat losses towards small inert particles, *Proceeding of the 18th Int. Symp. on Combustion*, pp.1385-1404.
- [16] Kaelin, D. E. (2005). A recent explosion protection system failure. *Process Safety Progress*, 24(2), 126-129. <https://doi.org/10.1002/prs.10079>
- [17] Lewis B., Von Elbe G., (1987), *Combustion, flames and explosions of gases*: 3rd edition, Academic Press, London, ISBN 0-12-446751-2.
- [18] Williams F.A. (1985), *Combustion theory*: 2nd edition, The Benjamin Cummings Publishing Company Inc., Amsterdam, ISBN 0-8053-9801-5.

