



Dossier

INCENDIE, EXPLOSION : DÉSAMORCER LES RISQUES

❶ Incendie et explosion : tous concernés
P. 24

❷ Impact de la représentativité
des échantillons sur l'évaluation des risques
d'incendie et d'explosion de poussières
P. 28

❸ Méthodes de production d'hydrogène,
risques associés et prévention
P. 38

❹ Prévention du risque incendie
et explosion dans les solutions
conteneurisées
P. 42

❺ Assurer une conception efficace des
barrières de sécurité incendie et explosion
P. 48

❻ L'ingénierie de sécurité incendie :
un outil au service de la prévention
P. 56

Les risques d'incendie et d'explosion sont présents dans une grande diversité d'entreprises. Ce dossier rappelle les notions et principes de base pour mettre en œuvre une démarche de prévention adaptée à chaque situation rencontrée. Après un premier article rappelant les notions et principes de prévention communs, un deuxième article revient sur l'importance de la connaissance de la dangerosité des produits. Dans les troisième et quatrième articles, les risques émergents liés aux nouveaux vecteurs énergétiques (hydrogène, batteries lithium-ion) sont abordés. Le cinquième article présente une démarche méthodologique robuste de prévention des risques, issue de l'industrie et du domaine du pétrole et du gaz, en l'appliquant aux nouveaux vecteurs énergétiques. Face aux limites de l'approche prescriptive actuelle concernant les nouveaux enjeux liés aux risques émergents et à leur prévention, le sixième article présente l'approche dite d'« ingénierie de sécurité incendie », en illustrant son apport pour la sécurité des travailleurs. Les outils correspondants se sont en effet largement perfectionnés au cours des vingt dernières années et ils fournissent aux préventeurs des éléments d'évaluation des risques précis en fonction de nombreux paramètres.

FIRE, EXPLOSION: DEFUSING THE RISKS – The risks of fire and explosion are present in a wide diversity of companies. This dossier sets out the basic concepts and principles to be considered when implementing a prevention approach adapted to specific situations. After a first article reminding readers of transversal concepts and principles of prevention, the second article reviews the importance of being aware of the dangers associated with specific products. The third and fourth articles cover emerging risks linked to new energy vectors (hydrogen, lithium-ion batteries). The fifth article presents a robust methodological approach to risk prevention, developed in industrial settings and in the gas and hydrocarbon fields, and applies it to new energy vectors. Given the limits of the current prescriptive approach when faced with emerging risks and their prevention, the sixth article presents a “fire safety engineering” approach, and illustrates its benefits for worker safety. The corresponding tools have been extensively honed over the last twenty years and they provide health and safety prevention professionals with precise elements to assess risks based on numerous parameters.

INCENDIE ET EXPLOSION : TOUS CONCERNÉS

Prenant en compte la grande diversité des entreprises qui présentent des risques d'incendie ou d'explosion, cet article rappelle les notions et principes de base pour mettre en œuvre une démarche de prévention à la mesure de chaque situation rencontrée. L'application des principes, méthodes et outils détaillés dans ce dossier permet d'adapter la prévention des risques à l'évolution rapide des nouvelles technologies.

BENOÎT SALLÉ,
PIERRE-NICOLAS MAUGER
INRS,
département
Expertise
et conseil
technique

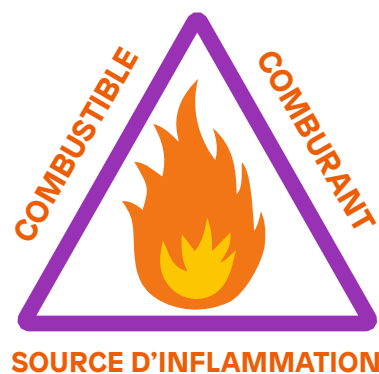
Les risques d'incendie et d'explosion sont des sujets de préoccupation permanente pour de nombreuses entreprises. En effet, les incendies et les explosions sont à l'origine de blessures graves, voire de décès, et de dégâts matériels considérables. Chacun de ces risques fait l'objet d'une démarche de prévention spécifique dont l'objectif prioritaire est d'agir avant que le sinistre ne survienne. Il n'en reste pas moins que, compte tenu des conséquences de ces événements, il est aussi nécessaire de combiner des dispositions techniques et organisationnelles, avec pour objectif de limiter l'étendue d'un éventuel sinistre. L'incendie et l'explosion d'atmosphère explosive (ATEX) se définissent comme des réactions de combustion ; ainsi, l'incendie peut mener à une explosion et inversement. Les produits combustibles qui génèrent ces phénomènes dangereux sont extrêmement courants en entreprise ; il est donc nécessaire que toutes les situations de travail les mettant en œuvre fassent l'objet d'une analyse des risques pour mettre en place des mesures de prévention et des moyens de protection adaptés.

Afin de maîtriser les démarches de prévention, il est essentiel de comprendre ces phénomènes dangereux et de connaître les conditions de leur survenue. Pour l'incendie, la représentation la plus commune est le « triangle du feu » (Cf. Encadré 1). En effet, la réaction de combustion doit mettre en œuvre trois éléments, schématisés par le triangle du feu, pour pouvoir être initiée. Cette réaction de combustion va engendrer un important dégagement de chaleur, ainsi que des fumées composées de particules et de produits de dégradation majoritairement inflammables et toxiques (oxydes de carbone, acides, hydrocarbures aromatiques polycycliques...). En l'absence de dispositions techniques et organisationnelles permettant de limiter sa propagation, l'incendie continue jusqu'à ce qu'il ne reste plus de combustible ou de comburant. Pour que la réaction de combustion puisse produire une explosion, caractérisée par des effets de surpression en plus des effets thermiques, il est nécessaire d'ajouter trois conditions au triangle du feu. On parle alors de l'« hexagone de l'explosion » (Cf. Encadré 2).

ENCADRÉ 1 LE TRIANGLE DU FEU

Pour qu'une combustion susceptible de produire un incendie soit possible, il faut trois conditions simultanées [1] :

- un combustible, c'est-à-dire une matière capable de brûler (matériau de construction, bois, essence, papier, carton, chiffon...);
- un comburant, qui, en se combinant avec le combustible, permet la combustion (oxygène, air...);
- une source d'inflammation, qui va initier la réaction de combustion (étincelle, flamme nue, surface chaude...).



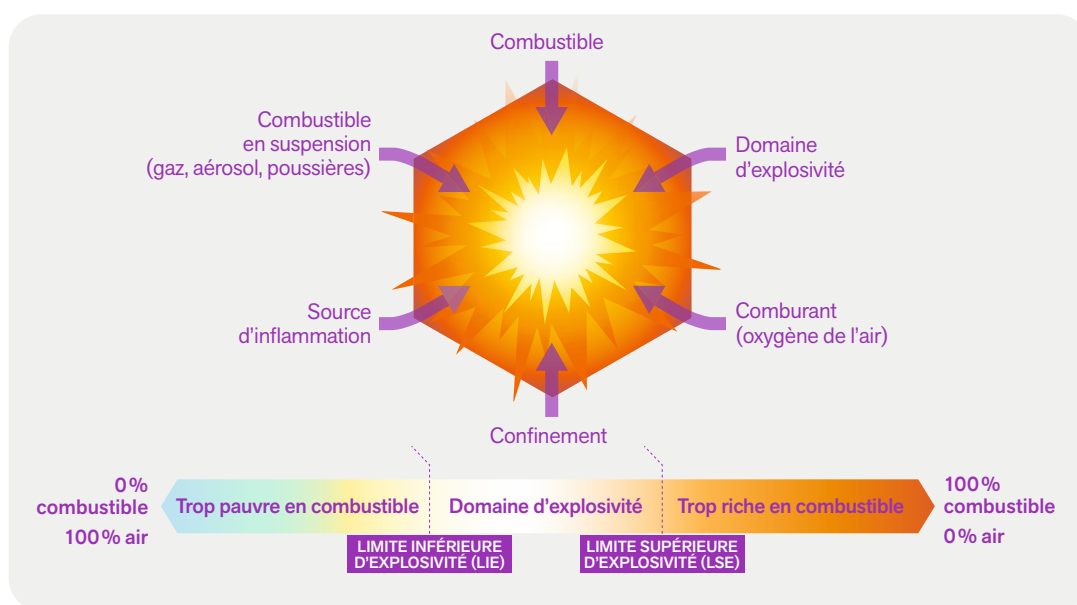
ENCADRÉ 2

L'HEXAGONE DE L'EXPLOSION

Pour qu'une explosion se produise, il faut six conditions simultanées [2].

Le confinement n'est pas une condition indispensable, mais représente un facteur aggravant du phénomène d'explosion et des risques associés.

**Hexagone de l'explosion :
6 conditions à remplir**



L'intérêt de ces représentations, au-delà de la compréhension des phénomènes dangereux mis en jeu, est que toute action portant sur au moins un des sommets aura pour incidence la diminution voire la suppression du risque.

Démarche de prévention : approches stabilisées, offre d'information de l'INRS

Face à l'enjeu, l'INRS a développé une offre d'information complète avec des produits relatifs aux différentes étapes de la démarche de prévention ou à des domaines ou thèmes spécifiques. Cette offre comprend notamment :

- des outils de sensibilisation: documents synthétiques [1-2], dossiers Web sur l'incendie et l'explosion [3], vidéos en format court utilisables également pour des formations, affiches et autocollants [4];
- des outils méthodologiques: évaluation du risque d'incendie [5] et du risque d'explosion [6], démarche de prévention (notamment permis de feu [7], consignes de sécurité [8] et consignation/déconsignation des installations [9]);
- des publications techniques sur la prise en

compte du risque: incendie [10], explosion de gaz/vapeurs [11], explosion de poussières [12];

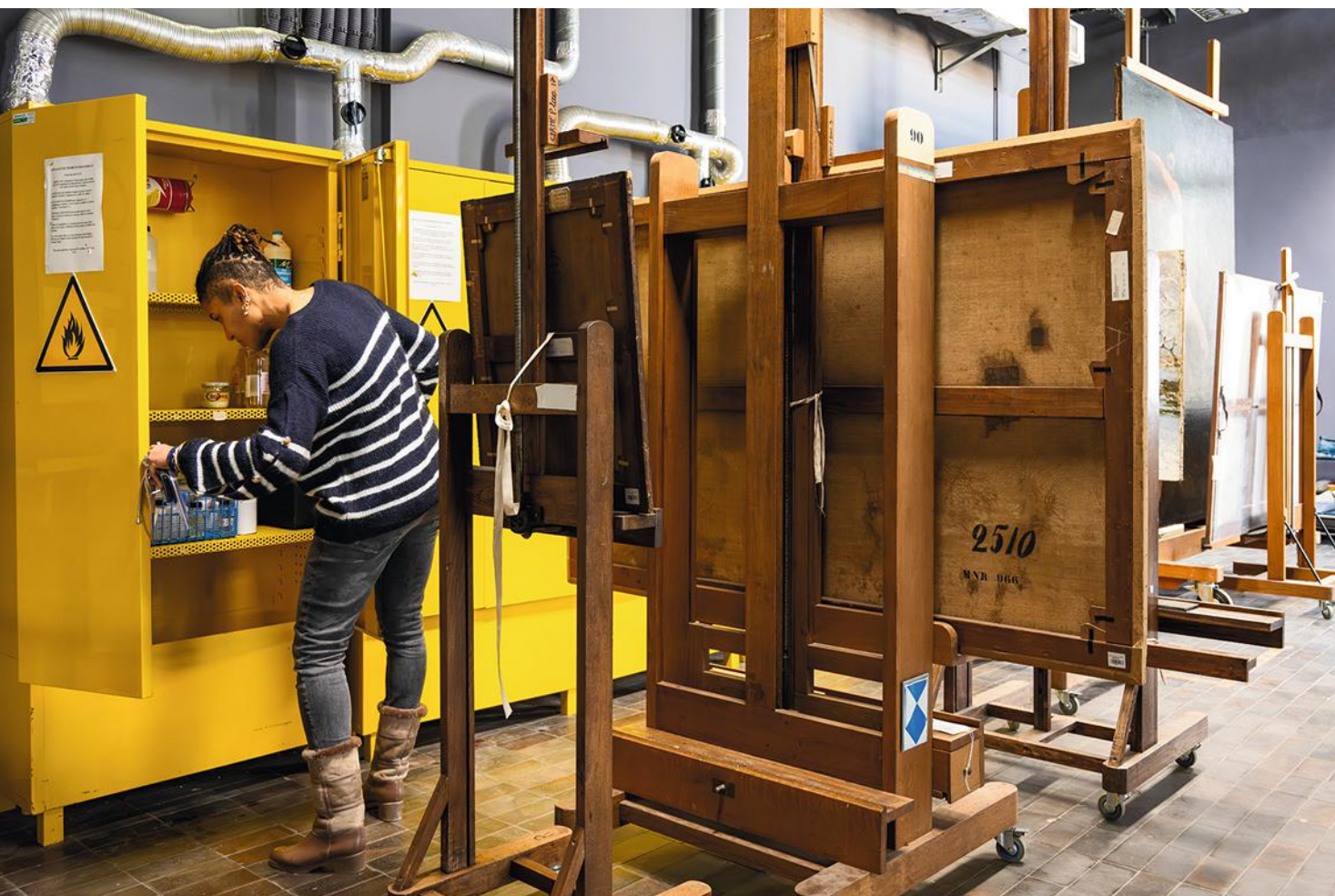
- des publications consacrées à certaines situations de travail ou certains domaines d'activité: charges des accumulateurs plomb-acide [13], méthanisation [14], véhicules industriels équipés au gaz naturel [15], nettoyage des cuves de produits pétroliers en station de distribution [16], choix et utilisation des extincteurs [17], industrie du bois [18];
- des rediffusions de journées techniques permettant de partager des bonnes pratiques en termes de prévention [19,20].

Malgré l'importance de ce fonds documentaire, il ne pourra jamais être exhaustif et aborder l'ensemble des situations de travail et des mesures de prévention et de protection adaptées à mettre en place, notamment pour la prévention des risques émergents.

Évolutions technologiques : revenir à une démarche complète de prévention

Dans ce dossier, le choix a été fait de privilégier des articles mettant en lumière une démarche méthodologique globale qui n'est souvent pas détaillée





© Patrick Delapierre pour l'INRS / 2025

pour des équipements ou des procédés existants. En effet, les évolutions constantes de la technique, des produits utilisés et des besoins de solutions industrielles, additionnées à la pression socio-économique d'autre part, montrent qu'il est primordial de ne pas oublier que la prévention des risques est une démarche structurée et méthodique amenant à la mise en place des mesures de prévention et de protection adaptées au risque. Les développements de nouveaux procédés ou l'émergence de nouvelles situations de travail nécessitent une appropriation de la culture de prévention des risques par les acteurs concernés. Par ailleurs, les concepts de sécurité préexistants pouvant atteindre leurs limites, une analyse de risque spécifique est essentielle afin de mettre en place des moyens de prévention et de protection adaptés. Tout cela doit être intégré dans une vision globale, depuis la conception des équipements et des situations de travail jusqu'à l'entretien et la maintenance de ces équipements.

Bien connaître les produits pour mieux évaluer les risques

Le deuxième article (Cf. pp. 28-37) correspond au premier thème essentiel de la démarche de préven-

tion : la connaissance de la dangerosité des produits. Pour un gaz ou une vapeur combustible, les données sont largement disponibles. Il existe par ailleurs des approches permettant d'estimer les données relatives à l'inflammabilité/explosivité des substances en mélange. Cependant, cette connaissance acquise pour les gaz/vapeurs n'est pas transposable aux poudres et poussières utilisées ou produites par les procédés. Cet article aborde donc les facteurs qui influencent les caractéristiques d'explosivité des matériaux solides, tout en définissant des éléments indispensables pour une bonne analyse de risques tout au long du procédé.

Dans la suite du dossier, les risques émergents liés aux nouveaux vecteurs énergétiques (hydrogène, batteries lithium-ion) sont abordés (Cf. pp. 38-41 et pp. 42-47). Ils éclairent le lecteur sur les spécificités de ces produits.

L'hydrogène, outre ses propriétés de combustion singulières (très faible énergie d'inflammation, vaste domaine d'inflammabilité, vitesse élevée de propagation du front de flamme, cinétique de montée en pression rapide), doit également être appréhendé vis-à-vis de sa compatibilité avec les matériaux (fragilisation des métaux, perméabilité entraînant

des fuites) et de sa pression de stockage très élevée dans les applications visées (pouvant dépasser plusieurs centaines de bars).

Pour les batteries lithium-ion, leur défaillance (emballement thermique notamment) peut entraîner des cinétiques d'incendie particulièrement violentes et difficiles à maîtriser, voire une explosion. Ces éléments remettent en question les stratégies de sécurité habituellement utilisées pour prévenir les risques d'incendie/explosion.

Intégrer la sécurité des travailleurs dans une approche globale

Le cinquième article (Cf. pp. 48-55) présente une démarche méthodologique robuste de « maîtrise des risques », issue de l'industrie et du domaine du pétrole et du gaz, appliquée aux nouveaux vecteurs énergétiques. Cette méthode décloisonne les différentes approches de la prévention des risques et replace la santé et la sécurité des salariés au cœur d'une approche globale. Elle apporte aux préventeurs une connaissance des autres outils et visions existantes des différentes parties prenantes (fabricants, intégrateurs, installateurs, législateur, assureurs, services de secours...), permettant d'enrichir

leur réflexion et leur compréhension des risques dans les applications émergentes. De plus, les différentes barrières de sécurité ont une influence conjointe et globale sur la prévention du risque. Leur connaissance et leur prise en compte sont donc également importantes pour la sécurité des travailleurs. Par ailleurs, face aux limitations de l'approche prescriptive actuelle concernant les nouveaux enjeux liés aux risques émergents et à leur prévention, le sixième article (cf. pp. 56-60) présente l'approche dite d'« ingénierie de sécurité incendie », en illustrant son apport pour la sécurité des travailleurs. Ces outils, appliqués à l'incendie et à l'explosion, se sont en effet largement perfectionnés au cours des vingt dernières années. Portés par un contexte réglementaire favorable, ils fournissent aux préventeurs des éléments d'évaluation des risques précis en fonction de nombreux paramètres.

Conclusion

Compte tenu de l'évolution rapide des technologies, la mise en œuvre des principes, méthodes et outils détaillés dans le dossier est nécessaire pour une prévention adaptée des risques associés à ces nouvelles applications. ●

BIBLIOGRAPHIE

- [1] INRS – *L'incendie sur le lieu de travail*. ED 6336. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206336>
- [2] INRS – *L'explosion d'Atex sur le lieu de travail*. ED 6337. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206337>
- [3] INRS – *Incendie et explosion sur le lieu de travail. S'informer pour prévenir*. ED 4702. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%204702>
- [4] INRS – *Incendie et explosion : des combustions ravageuses*. Page portail / Dossiers Web. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/risques/incendie-explosion/introduction.html>
- [5] INRS – *Évaluation du risque incendie dans l'entreprise. Guide méthodologique*. ED 970. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%20970>
- [6] INRS – *Mise en œuvre de la réglementation relative aux atmosphères explosives (Atex). Guide méthodologique*. ED 945. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%20945>
- [7] INRS – *Le permis de feu. Démarche et document support*. ED 6030. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206030>
- [8] INRS – *Consignes de sécurité incendie. Conception et plans associés*. ED 6230. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206230>
- [9] INRS – *Consignations et déconsignations*. ED 6109. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206109>
- [10] INRS – *Incendie et lieu de travail. Prévention et organisation dans l'entreprise*. ED 990. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%20990>
- [11] INRS – *Les mélanges explosifs. Gaz et vapeurs*. ED 911. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%20911>
- [12] INRS – *Les mélanges explosifs. Poussières combustibles*. ED 944. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%20944>
- [13] INRS – *Charge des batteries d'accumulateurs au plomb. Prévention du risque explosion*. ED 6120. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206120>
- [14] INRS – *Méthanisation des déchets issus de l'élevage, de l'agriculture et de l'agroalimentaire. Risques et prescriptions de sécurité*. ED 6153. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206153>
- [15] INRS – *Véhicules industriels équipés au gaz naturel*. ED 6090. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206090>
- [16] INRS – *Stations-services et autres stations de distribution de produits pétroliers. Prévenir les risques lors des opérations de maintenance*. ED 6256. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206256>
- [17] INRS – *Les extincteurs d'incendie portatifs, fixes et mobiles*. ED 6054. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206054>
- [18] INRS – *Incendie et explosion dans l'industrie du bois*. ED 6021. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206021>
- [19] LABORDE L. – Prévention du risque incendie : enjeux et principes. Compte rendu de la journée technique organisée par l'INRS le 11 décembre 2018. *Hygiène & sécurité du travail*, 2019, CC 27, pp. 90-94. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=CC+27>
- [20] INRS – *Journée technique du 17 novembre 2020 – Atmosphères explosives en entreprise : quels risques, quelle prévention ?* Présentation et rediffusions accessibles sur : <https://www.inrs.fr/footer/actes-evenements/journee-technique-atex.html>

IMPACT DE LA REPRÉSENTATIVITÉ DES ÉCHANTILLONS SUR L'ÉVALUATION DES RISQUES INCENDIE ET EXPLOSION DE POUSSIÈRES

La réactivité des poudres ou des poussières vis-à-vis de l'oxygène de l'air, souvent négligée ou mal connue, constitue pourtant un déterminant essentiel du risque d'incendie et d'explosion. Ce risque est d'autant plus insidieux que les propriétés des solides divisés peuvent évoluer tout au long de leur cycle de vie industrielle : usure mécanique, humidification, vieillissement chimique, contamination croisée ou encore recyclage modifient sensiblement leur comportement face aux sources d'inflammation, favorisant éventuellement le risque d'incendie mais aussi la capacité des produits pulvérulents à former une atmosphère explosive (Atex).

AGNÈS JANÈS
Université
de Lorraine/
Service
départemental
d'incendie et de
secours de l'Oise
(SDIS-60)

ALEXIS VIGNES
Institut
national de
l'environnement
industriel et des
risques (Ineris)

**OLIVIER
DUFAUD**
Université
de Lorraine

L'évaluation fiable des risques incendie et explosion des produits pulvérulents ne peut se fonder uniquement sur des données génériques issues de la bibliographie. Elle exige une compréhension fine de l'évolution des produits au cours du temps et de la représentativité des échantillons à considérer pour l'analyse des risques. Cet article propose une lecture des enjeux liés à la caractérisation des produits pulvérulents, en s'appuyant sur des situations industrielles concrètes et sur l'expérience de terrain. Dans le monde industriel, les produits sous forme divisée – poussières, poudres, granulés, pellets, comprimés – sont omniprésents. Les caractéristiques physicochimiques de leur fraction pulvérulente gouvernent leur facilité à se mettre et à rester en suspension dans l'air, ainsi que leur réactivité avec l'oxygène de l'air. L'aptitude à former une Atex, la sensibilité aux sources d'inflammation et la violence d'explosion en milieu confiné sont des données d'entrée indispensables pour évaluer le risque d'explosion. Les caractéristiques physicochimiques des poudres ou poussières peuvent se modifier peu à peu à l'intérieur des installations industrielles, de façon beaucoup plus marquée que dans le cas des gaz et vapeurs. En effet, il existe une forte variabilité de la pulvéulence, de l'inflammabilité et de l'explosivité des

produits divisés au fil du temps et tout au long d'un procédé : leur granulométrie, leur forme, leur composition, leur teneur en eau ou en gaz adsorbé sont autant de paramètres qui imposent l'utilisation avec précaution des bases de données ou des tests effectués sur un échantillon. Les évolutions techniques, les choix industriels en termes de produits et de procédés sont également des facteurs renforçant la variabilité de la réactivité des produits. Au travers d'exemples issus de retours d'expérience publiés dans la base de données Aria [1], cet article souligne l'importance de la représentativité des échantillons de poudres choisis pour la détermination des paramètres de sécurité. En effet, ce choix conditionne la fiabilité de l'analyse du risque d'explosion d'Atex, que celle-ci s'appuie sur une base de données reconnue ou sur une caractérisation expérimentale.

Où trouver des données et avec quelles limites d'utilisation ?

L'évaluation du risque de formation et d'inflammation d'Atex associé à un produit pulvérulent s'appuie sur ses caractéristiques d'inflammabilité et d'explosivité (Cf. Tableau 1).

Des explications détaillées, concernant la signification et l'interprétation de ces données, sont disponibles dans le guide d'utilisation de la base

PARAMÈTRE	DÉFINITION	EXEMPLES D'UTILISATION POUR LA PRÉVENTION DES RISQUES D'INCENDIE ET D'EXPLOSION
Aptitude à former une Atex		
Pulvéulence	Potentiel d'un matériau à générer des poussières en suspension dans l'air lors de sa manipulation.	Évaluation du risque de formation d'Atex du fait de la facilité de mise en suspension des poussières et du temps nécessaire pour la re-déposition des poussières sur les surfaces horizontales.
Limite inférieure d'explosivité (LIE)	Concentration minimale du domaine d'explosivité à laquelle une explosion peut survenir. Notes : • les concentrations indiquées sont celles pour lesquelles une explosion ne se propage plus pendant les essais ; • la dénomination « concentration minimale explosive (CME) » est parfois employée. Elle correspond à la même définition, mais n'est pas normalisée en Europe.	Prévention de la formation d'Atex par : • la maîtrise de la concentration en poussières dans les réseaux de ventilation ; • le contrôle des dépôts de poussières sur les surfaces horizontales, le nettoyage des installations. Classement en zones à risque de formation d'Atex.
Concentration limite en oxygène (CLO)	Concentration maximale en oxygène d'un mélange d'une substance inflammable, d'air et d'un gaz inerte dans lequel une explosion ne se produit pas, déterminée dans des conditions d'essais spécifiées. Note : La CLO dépend du combustible et du gaz inerte utilisé.	Prévention de la formation d'Atex par inertage (par exemple, avec de l'azote, du dioxyde de carbone, ou encore de l'argon).
Sensibilité aux sources d'inflammation		
Température minimale d'inflammation (TMI) en nuage	Température la plus faible d'une surface chaude à laquelle le mélange air/poussières le plus inflammable s'enflamme dans des conditions d'essai spécifiées.	Prévention de l'inflammation d'Atex par limitation des températures de surface des équipements (calcul d'une température maximale de surface des matériels).
Température minimale d'inflammation (TMI) en couche	Température la plus faible d'une surface chaude à laquelle une inflammation se produit dans une couche de poussière dans des conditions d'essai spécifiées.	
Énergie minimale d'inflammation (EMI)	Énergie électrique la plus faible stockée dans un condensateur qui, sous l'effet de sa décharge, est juste suffisante pour provoquer l'inflammation du mélange poussières/air le plus inflammable dans des conditions d'essai spécifiées.	Évaluation des risques d'inflammation d'Atex par des sources d'inflammation d'origine électrostatique. Prévention de l'inflammation d'Atex par la sélection du matériel adapté.
Violence d'explosion en milieu confiné		
Pression maximale d'explosion (p_{max})	Valeur maximale de la pression d'explosion mesurée au cours des essais de pression d'explosion en faisant varier la teneur en substances inflammables du mélange.	Protection contre les effets des explosions par : • conception d'équipements résistants à la pression ; • dimensionnement des dispositifs de protection (par exemple : événements, supprimeurs, dispositifs d'isolement).
Vitesse maximale de montée en pression [$(dp/dt)_{max}$]	Valeur maximale de l'augmentation de la pression par unité de temps, obtenue lors de l'explosion en récipient fermé.	
Coefficient de violence d'explosion (K_{st})	Valeur maximale de l'augmentation de la pression par unité de temps normalisée par le volume. Caractéristique intrinsèque de la poussière.	
Aptitude à propager la combustion		
Classe de combustibilité	Classement de l'aptitude de la poussière à propager la combustion.	Prévention du risque d'incendie par le dimensionnement d'un stockage. Protection contre le risque d'incendie par la définition de la stratégie d'extinction.

↑ TABLEAU 1 Caractéristiques de pulvéulence, d'inflammabilité et d'explosivité des produits pulvérulents.



Caratex [2] (INRS-Gestis) et sur le site Internet de l'Ineris [3].

Dans le cas des substances et des mélanges pour lesquels une fiche de données de sécurité (FDS) est établie, et même si le risque d'explosion de poussières est signalé, les données relatives à l'inflammabilité et à l'explosivité des matières pulvérulentes ne sont qu'exceptionnellement précisées. En effet, celles-ci ne constituent pas des données concourant à la classification des dangers, au sens du règlement CLP [4], car le danger est lié à la mise en œuvre du produit et non à ses caractéristiques intrinsèques.

De plus, les produits tels que la farine de blé, la sciure de bois ou encore les poudres alimentaires ne sont pas soumis à l'obligation de transmission d'une FDS, bien qu'ils soient susceptibles de former une Atex lors de leur mise en suspension dans l'air.

Enfin, l'expérience montre que les FDS ne sont pas toujours actualisées, et comportent parfois des confusions de termes ou des erreurs. En particulier, les limites décrites ci-dessous sont régulièrement rencontrées :

- Absence d'indication ou erreur concernant la forme du produit : certaines FDS de produits en poudre ne comportent pas d'indication de leur répartition granulométrique, ou, lorsque la granulométrie est mentionnée, il s'agit d'une indication peu précise, comme un diamètre maximum ou moyen. Par ailleurs, dans certains cas, la FDS fait mention d'un

état « liquide » alors qu'il s'agit d'une poudre utilisée dans une suspension.

- Utilisation d'un terme général pouvant recouvrir plusieurs variétés allotropiques. Par exemple, le terme « carbone » peut correspondre à du noir de carbone, de la poudre de diamant, des nanotubes, des fullerènes, du graphite...
- Confusions terminologiques : il existe parfois une confusion entre « explosible » ou « pyrophorique » et « risque de formation d'Atex par mise en suspension dans l'air ». Les dangers liés au caractère explosible ou pyrophorique constituent des classes de danger spécifiques du règlement CLP, qui définit des essais permettant de conduire à la classification dans l'une des catégories associées. Ces essais n'ont aucun point commun avec les caractéristiques d'inflammabilité ou d'explosivité des poussières pour le risque d'explosion d'Atex.
- Une autre confusion est particulièrement fréquente, entre « non inflammable » au sens réglementaire (substance n'appartenant pas à la classe de danger des solides inflammables) et « non combustible », c'est-à-dire suffisamment peu oxydable pour pouvoir conclure à l'absence de risque de formation d'Atex lors d'une mise en suspension dans l'air. De nombreuses poudres qui ne remplissent pas la condition de classification du CLP en « solide inflammable » sont néanmoins susceptibles de former une Atex. C'est le cas par exemple de la

Atelier de menuiserie bois avec une ventilation générale et aspiration localisée sur les équipements de travail.



© Grégoire Maisonneuve pour l'INRS / 2025

← **TABLEAU 2**
Bases de données de caractéristiques d'inflammabilité et d'explosivité d'utilisation fréquente.

BASE DE DONNÉES OU RÉFÉRENCE	COMMENTAIRES
ED 944 (INRS) [5]	Données d'inflammabilité et d'explosivité de plusieurs dizaines de poussières, d'après notamment des résultats expérimentaux obtenus par le <i>US Bureau of Mines</i> .
Caratex/Gestis-dust-Ex (INRS - IFA) [2]	Caratex fournit la traduction en français par l'INRS de la base de données expérimentales de la <i>Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV)</i> concernant l'inflammabilité et l'explosivité de poussières, comportant près de 7 000 entrées.
BIA-Report 13/97 [6]	Il s'agit de la publication des données d'inflammabilité et d'explosivité obtenus par le DGUV, pour environ 4 300 échantillons de poussières, provenant de pratiquement tous les secteurs industriels.
Norme NFPA 660 [7]	L'annexe Y rassemble des données expérimentales d'inflammabilité et d'explosivité de poussières.

poudre de charbon actif ou de certaines matières plastiques.

Compte tenu de l'ensemble de ces limitations, la consultation complémentaire de différentes bases de données (Cf. *Tableau 2*) permet d'enrichir les données d'entrée pour l'évaluation des risques de formation et d'inflammation d'Atex.

Ces bases de données doivent cependant être utilisées avec prudence, en raison de l'existence des limitations suivantes.

Influence du protocole expérimental

La première limitation concerne l'hétérogénéité des protocoles expérimentaux de caractérisation. En effet, les caractéristiques d'inflammabilité et d'explosivité ne sont pas intrinsèques au produit testé, et dépendent des conditions expérimentales comme le montrent les exemples ci-dessous. De plus, différents protocoles coexistent parfois pour la détermination d'une même caractéristique. Certaines données sont, par ailleurs, issues d'essais anciens ou obtenues avec des protocoles ou des équipements expérimentaux non normalisés. Par conséquent, il est indispensable de vérifier la date, les normes et les conditions d'essai qui ont conduit aux résultats proposés dans une référence bibliographique.

- L'épaisseur, le tassement et la porosité de la couche de produit soumis à un essai de température minimale d'inflammation en couche (TMI) sont déterminants par rapport au résultat obtenu. Une couche plus épaisse favorise l'auto-échauffement et la température d'inflammation est donc plus faible. De plus, les conditions expérimentales (température ambiante, isolation thermique présentée par le support) ont également une grande influence.
- Pour les essais d'inflammation en nuage, l'utilisation du four normalisé « BAM » conduit à une température minimale d'inflammation (selon la norme NF EN ISO/IEC 80079-20-2 [8]) plus faible que celle du four normalisé « Godbert-Greenwald ».
- Pour l'énergie minimale d'inflammation (EMI), l'utilisation d'un inflammateur Mike 3 (selon la norme

NF EN ISO/IEC 80079-20-2 [8]) avec ou sans inductance entraîne une durée d'étincelle différente et influence le résultat. Par ailleurs, les résultats obtenus sur les mêmes échantillons avec le tube de Hartmann, utilisé dans le passé dans la même norme mais de conception différente, peuvent différer de ceux obtenus avec l'inflammateur Mike 3.

- Les caractéristiques de violence d'explosion en milieu confiné, p_{max} et K_{st} , sont également très dépendantes de l'aptitude du produit testé à se mettre en suspension dans l'air et de l'intensité de la turbulence dans l'équipement d'essais.

Pertinence de l'échantillon pour lequel les données sont disponibles par rapport au produit à caractériser

La seconde limitation est liée à la représentativité de l'échantillon dont les caractéristiques sont détaillées dans les bases de données, par rapport à la poudre ou la poussière réellement stockée ou mise en œuvre dans le procédé considéré.

Il existe une très forte dépendance de l'inflammabilité et de l'explosivité des poudres ou poussières à leur granulométrie et à leur humidité, et dans une moindre mesure à leur morphologie. Plus les poussières sont fines et sèches, plus la sensibilité à l'inflammation et la violence d'explosion augmentent. Il est donc primordial de s'assurer que les données utilisées pour l'évaluation des risques correspondent bien au produit manipulé.

De plus, la présence d'impuretés ou encore le mélange de plusieurs produits peuvent influencer considérablement l'inflammabilité et l'explosivité. Ceci s'applique dans tous les cas, que le constituant additionnel soit combustible ou inerte, sous forme de poudre ou de poussière, de liquide ou encore de gaz ou de vapeur adsorbés. Ces situations se rencontrent particulièrement dans les filières émergentes avec les produits recyclés, les matériaux biosourcés, les poudres pour fabrication additive, etc. Enfin, dans le cas des matériaux pulvérulents, contrairement à celui des gaz et des vapeurs,



plusieurs produits identifiés par le même nom peuvent être très différents. À titre d'exemples, la recherche « aluminium » dans la base Caratex (INRS-Gestis) [2] renvoie 750 résultats, celle de « bois » conduit à plus de 200 résultats et celle de « blé » plus de 80.

En définitive, les FDS permettent d'orienter l'évaluation initiale de la dangerosité des poussières combustibles. En complément, les bases de données existantes peuvent fournir les caractéristiques d'inflammabilité et d'explosivité indispensables pour conduire l'évaluation des risques d'explosion d'Atex. Mais, dans certains cas, cela ne suffit pas et il est nécessaire de recourir à un avis d'expert et/ou à une détermination expérimentale de l'inflammabilité et de l'explosivité de la poussière ou de la poudre concernée.

Exemples d'accidents liés à la méconnaissance de l'inflammabilité et de l'explosivité des produits

Modification du produit du fait du fonctionnement des installations

Le fonctionnement normal des installations peut conduire à une modification du produit, durant les opérations de granulation, d'atomisation, de broyage, ou encore de tamisage. C'est le cas également dans les équipements de manutention ou les installations de ventilation. En effet, le produit évolue tout au long du procédé : abrasion par le frottement entre les particules, frottement sur les surfaces internes des équipements, sédimentation différente en fonction de la granulométrie, séparation par un dispositif de filtration (cyclone, média filtrant), etc. Ces modifications de granulométrie impactent significativement le risque d'explosion. Ainsi, en fonction de la granulométrie considérée, le risque est différent ; il faut donc évaluer le risque spécifiquement pour chaque équipement, en fonction du produit réellement présent.

Le produit peut aussi être modifié en cas de dysfonctionnement du procédé. Il est donc nécessaire de prendre en compte les dérives ou les pannes prévisibles dans l'évaluation des risques. C'est le cas par exemple de l'accident de Bucy-le-Long en 2023 (référéncé n° 61407 dans la base Aria du Barpi¹) : une explosion suivie d'un départ de feu se produit dans un sécheur exploité par une sucrerie. À la suite d'un bourrage au niveau d'un cyclone, la ligne de production est arrêtée mais le sécheur est laissé en fonctionnement, ce qui rend les poussières de pulpe de betterave plus sèches qu'en fonctionnement normal. Lors du redémarrage quelques heures plus tard, ces poussières explosent. Cet accident a fait deux blessés parmi les salariés. À la suite de l'enquête, il a été recommandé à l'entreprise d'améliorer ses procédures de démarrage et d'arrêt de l'installation et la formation des salariés, ainsi que de disposer

d'un système d'injection d'eau et d'un moyen de surveillance de la température entre le sécheur et les cyclones, de même que d'un dispositif de surveillance de l'humidité du produit en sortie de sécheur.

Modification des conditions de fonctionnement du procédé

La modification des paramètres de fonctionnement d'un procédé peut également avoir un impact sur le risque de formation et d'inflammation d'Atex. C'est notamment le cas lorsque les vitesses dans le réseau de ventilation sont modifiées. Une réduction du débit de ventilation réduit la vitesse de transport des poussières et favorise les dépôts à l'intérieur des canalisations. Le cas de l'accident de Parentis-en-Borne en 2019 (référéncé n°54360 dans la base Aria du Barpi) en est un exemple : un incendie est détecté dans un cyclone de dépoussiérage d'un four de pré-séchage de bois, dans une usine produisant des charbons actifs. Peu après le début de l'injection d'eau par le système d'extinction, une déflagration se produit et deux salariés sont brûlés. Les conditions du procédé avaient été modifiées quatre mois plus tôt, avec l'utilisation d'un bois plus sec et une vitesse d'extraction des gaz réduite. Aucune analyse des risques induits par cette modification de process n'avait été réalisée. Une couche de poussières épaisse de 40 cm a été observée dans la conduite d'extraction des gaz. L'incendie initial a pu être provoqué par de l'électricité statique ou l'introduction de particules incandescentes. L'arrêt du ventilateur d'extraction des gaz et l'injection d'eau ont pu mettre en suspension les poussières dans la conduite et provoquer l'explosion.

Modification des conditions atmosphériques

Bien qu'elles ne soient en général pas maîtrisables par le préventeur, les conditions atmosphériques peuvent avoir un impact sur les caractéristiques d'inflammabilité ou d'explosivité des poussières, ou encore sur les mécanismes de leur inflammation. En fonction des variations de température et/ou de pression, la quantité de gaz adsorbé à la surface des poudres peut varier. Qu'il s'agisse d'oxygène ou de vapeurs combustibles, ces fluctuations peuvent influencer sur l'explosivité des poudres. Ainsi, des charbons actifs contenant des composés organiques volatils, des tourteaux céréaliers incluant des traces d'hexane ayant servi à l'extraction des huiles, ou encore des sciures ayant servi à la récupération de solvants, comme dans le cas de l'explosion de filtre survenu à Amnéville en 2001 (référéncé n°21264 dans la base Aria du Barpi), sont autant d'exemples pratiques de poudres pour lesquelles les phases de sorption/désorption, provoquées par les changements de conditions atmosphériques, affectent l'inflammabilité. Dans le contexte de l'évolution climatique actuelle,

l'augmentation de la température ambiante est un facteur favorisant notamment l'auto-échauffement des poudres².

Plus largement, la saisonnalité entraîne parfois des modifications de conditions opératoires ou de pratiques qui tendent à faire évoluer le risque lié aux explosions de poussières. La ventilation naturelle d'un atelier en été ou la convection forcée générée par les systèmes de chauffage en hiver en sont des illustrations.

Enfin, les conditions atmosphériques affectent également les modalités d'inflammation et notamment les phénomènes qui conduisent à la génération de décharges électrostatiques : une forte humidité relative favorise l'écoulement des charges, alors qu'un temps sec est propice à l'accumulation des charges. Le cas de l'accident qui s'est produit à Sant-Pierre-La-Garenne en 2017 (référéncé n°49108 dans la base Aria du Barpi) en est un exemple : une explosion s'est produite sur un filtre à poussières du réseau de ventilation d'une unité de fabrication de fongicide soufré d'une usine de produits phytosanitaires. En raison des conditions météorologiques très défavorables, l'installation avait été arrêtée. L'hypothèse la plus probable concernant la source d'inflammation est la présence d'un phénomène d'origine électrostatique. La température relativement élevée du fongicide pendant la phase d'arrêt de l'unité (jusqu'à 104°C, contre 70°C lors de la phase de production) aurait pu rendre le produit plus sensible à une telle décharge. De plus, la faible humidité de l'air pendant la phase d'arrêt a pu conduire à une génération accrue d'électricité statique.

À l'inverse, une humidité trop importante peut elle aussi engendrer des risques d'incendie et d'explosion d'Atex liés à un bourrage des équipements et à la génération de sources d'inflammation telles que des surfaces chaudes ou des étincelles d'origine mécanique.

Vieillessement ou oxydation du produit

Tout au long de leur procédé de fabrication ou durant leur stockage, les poudres peuvent aussi subir des modifications physicochimiques progressives sous l'effet du vieillissement, modifiant leurs caractéristiques d'inflammabilité et d'explosivité.

L'une des illustrations les plus directes de ce phénomène se rencontre pour les matériaux pulvérulents biologiquement actifs dont la stabilité temporelle n'est parfois que relative. Par exemple, le comportement thermique de tas de compost ou de boues d'épuration dépend de l'action des micro-organismes qui les constituent. Par leur action continue, ces agents biologiques modifient la composition, la structure et donc la réactivité des poussières organiques qu'ils prennent pour substrat. D'autres poudres combustibles et biologiquement actives



© Gaël Kerbaol / INRS / 2023

peuvent voir leur réactivité évoluer au cours du temps : des levures utilisées dans les industries agroalimentaires, des poudres enzymatiques employées dans l'industrie papetière (cellulase, xylanase, mannanase...) ou des probiotiques produits par l'industrie pharmaceutique (*Lactobacillus...*).

Un autre phénomène lié à une décroissance temporelle d'activité peut survenir aussi avec des poudres chimiquement actives. C'est le cas des biochars, charbons issus de la pyrolyse de la biomasse et possédant de fortes concentrations de radicaux libres. Ces radicaux peuvent persister plus de six mois après la génération des biochars mais leur teneur diminue graduellement et les radicaux carbonés se déplacent progressivement vers les composés oxygénés, ce qui peut modifier leur sensibilité vis-à-vis du risque d'inflammation.

Ces phénomènes peuvent être couplés à des processus d'adsorption/désorption d'air et d'oxydation partielle de la surface des grains de poudre. Ainsi, la variation de l'explosivité du graphite en fonction



ENCADRÉ 1

QUESTIONS UTILES POUR L'ÉVALUATION DES RISQUES DE FORMATION ET D'INFLAMMATION D'ATEX

Identification des produits :

1. Quelles sont les propriétés physicochimiques, physiques, chimiques des produits stockés, mis en œuvre ou émis ?
2. Le procédé modifie-t-il (les caractéristiques de) la poudre/poussière (broyage, séchage, granulation, compactage, vieillissement, adsorption de gaz ou vapeur...) ?
3. La poudre/poussière peut-elle se mélanger (adsorber ?) à des vapeurs ou à un gaz ? Dans l'affirmative, quelle est la composition du mélange ?

Évaluation du risque de formation d'Atex/classement des zones à risque de formation d'Atex :

4. Où et quand un nuage de poudre/poussières peut-il se former ?
5. Où et quand des couches de poudre/poussières peuvent-elles s'accumuler ? Quelle est l'épaisseur typique de ces couches ?

Évaluation du risque d'inflammation d'Atex :

6. Quelles sources d'inflammation peuvent être présentes à l'intérieur ou au voisinage des zones à risque de formation d'Atex (flammes nues, particules incandescentes, étincelles d'origine électrostatique, étincelles électriques, étincelles mécaniques, surfaces chaudes/points chauds...) ?
7. Quelle est leur énergie/température, par rapport à la sensibilité du produit aux sources d'inflammation ?

Évaluation des mesures de protection contre le risque d'explosion :

8. Quels volumes ou équipements faut-il protéger contre les effets des explosions ? Par quel principe effectuer cette protection (résistance aux effets de la pression d'explosion, évènement d'explosion, suppression d'explosion, découplage) ?

de sa durée de stockage a été démontrée. Bien que les pressions d'explosion et vitesses maximales de montée en pression soient dans l'absolu faibles pour ce produit, les résultats montrent une décroissance significative de ces paramètres 30 semaines après le broyage des poudres. Ils se stabilisent ensuite pour des durées de stockage plus importantes.

Les poudres métalliques sont également réputées être extrêmement sensibles à l'oxydation de surface. Dans leur cas, il apparaît légitime de considérer que leur réactivité va décroître en fonction de leur durée d'exposition à l'air. Cependant, il faut garder à l'esprit deux aspects essentiels. D'une part, ces réactions d'oxydation sont exothermiques et la chaleur générée peut être à l'origine de phénomènes d'échauffement locaux, certes rares au vu de la conductivité thermique des métaux. D'autre part, le mélange d'oxydes métalliques et de métaux non oxydés, notamment l'aluminium, rend possible des réactions d'aluminothermie, réaction

exothermique également utilisée de façon contrôlée pour la soudure de rails de chemin de fer. Une explosion impliquant des poudres d'aluminium et d'oxydes de fer est d'ailleurs à l'origine de la destruction du site industriel d'Hayes Lemmerz (USA) en 2003, tuant un salarié et en brûlant deux autres sévèrement [10]. D'un point de vue pratique, ce type de mélange réactif pourrait être rencontré lors d'opérations de ponçage de surfaces métalliques, tôles ou carrosseries. D'autres types de réactions exothermiques métal/oxydes ou des réactions intermétalliques peuvent également impliquer des poudres métalliques [11].

Enfin, le vieillissement peut également impacter la nature des matériaux suite à la réticulation de composés lignocellulosiques (passage d'une forme linéaire à une forme tridimensionnelle) ou à des phénomènes de recristallisation. Des mesures d'énergies minimales d'inflammation (EMI) effectuées sur des poudres de bois et de marcs de raisin, avant et après vieillissement accéléré, montrent à la fois un effet significatif et une variabilité importante des résultats. L'EMI des échantillons de bois tend à croître après vieillissement, alors que les marcs de raisin sont au contraire plus réactifs, leur EMI descendant à 740 mJ alors qu'elle était supérieure à 1000 mJ à l'origine. La structure chimique des poudres peut également évoluer par fracturation de chaînes de polymères. Cette dernière réaction est bien connue pour les matières plastiques qui se dégradent sous l'action des rayonnements ultraviolets, ce qui produit des radicaux libres et réduit la résistance mécanique des composés, les rendant plus aptes à produire de fines particules, potentiellement plus sensibles aux sources d'inflammation.

Variabilité des caractéristiques de la matière première

L'évolution des procédés dans le temps ou la variabilité, voulue ou subie, des gisements de matière première modifient aussi le produit mis en œuvre. Dans le domaine du traitement des déchets, la composition chimique, la granulométrie et la morphologie des poudres traitées ou générées sont sujettes à des fluctuations importantes.

Le cas des poudres d'origine biologique est par ailleurs remarquable. En fonction de leur provenance géographique ou de leur degré de maturation/croissance, les végétaux peuvent, par exemple, avoir des teneurs différentes en lignine ou en sucre. De manière plus secondaire, de telles fluctuations peuvent se rencontrer pour diverses farines animales, qu'il s'agisse de viande, de sang, de plumes, de poisson ou d'insectes. Ces produits sont tous combustibles et peuvent former une Atex lorsque leurs poussières suffisamment fines sont mises en suspension dans l'air.

Dans le contexte du développement d'une économie

circulaire, la valorisation toujours plus poussée des polymères synthétiques ou plastiques doit également attirer l'attention des préventeurs. Ainsi, du fait d'un recours étendu aux additifs tels que les pigments ou les lubrifiants pour améliorer les propriétés des polymères, et de l'accroissement des tonnages en matériaux composites, comme des composites fibres de bois/biomasse-plastiques CBP, le recyclage des plastiques génère des poudres de plus en plus fines et de composition complexe.

La même problématique se rencontre lors du recyclage de matériaux métalliques. L'utilisation fréquente d'alliages complexes et de composites métalliques dans l'industrie automobile, aéronautique ou lors de production à plus petite échelle par fabrication additive rend ce gisement sujet à des variations de composition. Ce même type de mélanges solide/solide se retrouve par exemple lors des opérations de ponçage de carrosserie, durant lesquelles des poudres métalliques ou des poudres de matériaux plastiques de taille et de densité différentes sont générées et mélangées. Une remise en suspension des poussières peut alors conduire à leur ségrégation en fonction de leurs propriétés physiques. Par exemple, la partie supérieure d'un nuage de poussières d'aluminium et de fer de granulométries équivalentes verra sa concentration en fer décroître au cours du temps (différence de masse volumique), ce qui impacte le risque d'explosion car la poussière d'aluminium est plus sensible aux sources d'inflammation et explose plus violemment que la poussière de fer.

De plus, les exigences croissantes sur les taux de valorisation des déchets impliquent des tris plus affinés et des broyages plus fins, permettant une meilleure récupération des ressources secondaires. Ces exigences sont à considérer avec attention dans la mesure où les risques d'explosion sont susceptibles d'être accrus. Par ailleurs, des modifications du cahier des charges ou des exigences des clients peuvent être à l'origine de changements de la granulométrie. C'est le cas par exemple pour l'accident de Linxe en 1994 (référéncé n°5072 dans la base Aria du Barpi) : deux explosions se sont produites dans un cyclone et un filtre à manches d'une ligne de broyage/séchage de copeaux verts. Des conditions de broyage diminuant la granulométrie pourraient être à l'origine de ces accidents. Au cours de l'intervention, un salarié et un pompier ont été blessés.

Des précautions doivent être également prises lors de la conversion d'une chaudière initialement conçue pour brûler du charbon en une chaudière utilisant de la biomasse. L'inflammabilité des poussières de bois brut ou torréfié n'est pas significativement différente de celle des poussières de charbon. Cependant, les pellets, en particulier de bois torréfié, sont beaucoup plus friables et génèrent une quantité bien plus importante de poussières fines.

ENCADRÉ 2

QUE FAIRE POUR PALLIER LES LIMITES DES DONNÉES ISSUES DES RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES ?

1. Recouper les informations : croiser les sources de données et vérifier les dates des essais et leurs conditions expérimentales,
2. Vérifier la représentativité des échantillons testés par rapport aux produits mis en œuvre dans les installations, notamment leur granulométrie et leur taux d'humidité, ainsi que l'état du produit : brut – après réception/fabrication, après manipulation dans des équipements de manutention, durée de stockage...
3. Prendre en compte la variabilité de l'échantillon en collectant des données sur des produits similaires mais de granulométrie, forme et humidité différentes, dans la limite des conditions du procédé concerné.

Ces poussières fines satureront les installations de ventilation et s'accumulent dans les équipements de manutention mal ventilés, ce qui peut être à l'origine d'un risque de formation et d'inflammation d'Atex. En outre, la composition des pellets peut varier, notamment lorsqu'ils comprennent des additifs (amidon, mélasse, huile...) visant à augmenter leur pouvoir calorifique ou à faciliter leur mise en forme.

Bonnes pratiques pour une évaluation efficace de l'inflammabilité et de l'explosivité des produits

Les questions utiles pour l'évaluation des risques de formation et d'inflammation d'Atex associés à l'utilisation de poudres ou de poussières combustibles sont rassemblées dans l'*Encadré 1*.

Pour les substances et les préparations sous forme de poudres ou de poussières, c'est leur pulvéulence et leur réactivité avec l'oxygène de l'air qui gouvernent le risque de formation et d'inflammation d'Atex, au travers notamment de leurs caractéristiques d'inflammabilité et d'explosivité. Il s'agit donc d'un état, et non d'une constante.

Les informations issues des FDS et des bases de données usuelles, dont les références sont rassemblées dans le *Tableau 2*, sont particulièrement utiles pour orienter cette évaluation. Cependant, elles ne peuvent permettre de faire l'économie d'une stratégie d'échantillonnage représentative et adaptée au procédé pour garantir l'adéquation entre les données issues de la bibliographie et les produits réellement présents. Les bonnes pratiques pour contourner les limites des bases de données disponibles sont proposées dans l'*Encadré 2*. En cas de doute, il est possible de solliciter un avis d'expert pour vérifier la pertinence et l'adéquation des données disponibles. Il peut être nécessaire en



complément de recourir à une détermination expérimentale respectant des conditions contrôlées et un protocole normalisé. Dans ce cas, il convient de respecter certaines bonnes pratiques. Celles-ci sont résumées dans le *Focus* p. 37.

Dans tous les cas, les résultats de la recherche bibliographique ou de la caractérisation expérimentale de l'inflammabilité et de l'explosivité doivent se traduire en actions de prévention du risque d'explosion d'Atex. Ceci concerne en particulier : le dimensionnement des installations de captage à la source, le classement des zones à risque de formation d'Atex, le dimensionnement d'un dispositif d'inertage, la définition de la température maximale de surface des matériels utilisables en Atex, le dimensionnement des dispositifs de protection contre les effets des explosions.

Conclusion

Le risque d'explosion d'Atex lié aux poussières ne peut être correctement évalué sans un regard critique sur la représentativité et la pertinence des données utilisées.

Ce regard implique de ne pas considérer les données techniques comme figées, mais bien comme des résultats conditionnés par un contexte précis : origine du produit, conditions opératoires, environnement ambiant et historique du produit. Une valeur relative à une caractéristique d'inflammabilité ou d'explosivité ne saurait donc être transposée sans discernement d'un contexte à un autre.

Face aux produits composites, recyclés, émergents (dont les caractéristiques intrinsèques sont encore

méconnues) ou instables, la prévention passe par la réévaluation régulière du risque de formation et d'inflammation d'Atex, et donc des caractéristiques d'inflammabilité et d'explosivité des produits stockés ou utilisés, le recours raisonné à la caractérisation expérimentale, et la montée en compétence des acteurs de terrain. Cette montée en compétence repose sur la diffusion de connaissances actualisées, mais aussi sur l'analyse critique des retours d'expérience et l'appropriation des phénomènes physiques sous-jacents.

Les pratiques de terrain montrent que les situations d'incertitude sont fréquentes : produits changeants, filières en évolution, collecte difficile de données fiables. Dans ce contexte, le rôle du préventeur est non seulement de rechercher la donnée, mais aussi de poser les bonnes questions, d'identifier les écarts possibles et d'anticiper les effets non linéaires liés à des mélanges ou à des évolutions physiques non maîtrisées.

Enfin, l'intégration de la prise en compte des caractéristiques physicochimiques des produits à la conception du procédé (par l'application des principes de sécurité intrinsèque) peut, lorsque c'est possible, favoriser la réduction du risque. ●

1. Bureau d'analyse des risques et pollutions industrielles ; l'un des bureaux de la Direction générale de la prévention des risques (DGPR).

2. Les caractéristiques physicochimiques et les méthodes permettant de caractériser la sensibilité des produits au phénomène d'auto-échauffement sont décrites dans une précédente note technique, parue dans cette même revue [9].

BIBLIOGRAPHIE

[1] **MINISTÈRE EN CHARGE DE L'ÉCOLOGIE ET DU DÉVELOPPEMENT DURABLE** – Base de données Aria. Accessible sur : <https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/>

[2] **INRS** – Base de données Caratex. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/dam/jcr:2da04194-4a03-4db9-80b8-7553dc0fa4d7/guide-utilisation-caratex-poussieres.pdf> ; <https://www.inrs.fr/publications/bdd/caratex.html> ; <https://staubex.ifa.dguv.de/?lang=f>

[3] **INERIS** – Inflammabilité, explosivité des poudres, poussières, liquides et gaz. Accessible sur : <https://prestations.ineris.fr/fr/solutions-thematiques/substances-melanges-produits/caracterisation-dangers/inflammabilite>

[4] **INRS** – Mémento du règlement CLP. ED 6207. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206207>

[5] **INRS** – Les mélanges explosifs. Poussières combustibles. ED 944. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%20944>

[6] **BECKE H. ET AL.** – Combustion and explosion characteristics of dusts. BIA Report, 1997. Accessible sur : <https://www.dguv.de/medien/ifa/en/pub/rep/pdf/rep02/biar1397/report-13-97.pdf>

[7] **NORME NFPA 660** – Standard for combustible dusts and particulate solids. 2025. Accessible sur : <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/nfpa-660-standard-development/660>

[8] **NORME NF EN ISO/IEC 80079-20-2** – Atmosphères explosives – Partie 20-2 : caractéristiques des produits. Méthodes d'essai des poussières combustibles. Afnor, 2016. Accessible sur : <https://www.boutique.afnor.org/> (site payant).

[9] **JANÈS A., VIGNES A.** – Incendie, explosion : attention au phénomène d'auto-échauffement des solides divisés. *Hygiène & sécurité du travail*, 2018, 250, NT 60, pp. 64-70. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=NT%2060>

[10] **US CSB** – Investigation report: aluminum dust explosion. Hayes Lemmerz International, Report Nr. 2004-01-I-IN, Chemical safety.

[11] **FISCHER S., GRUBELICH M.** – A survey of combustible metals thermites and intermetallics for pyrotechnic applications. AIAA, 1996, 15. Accessible sur : DOI :10.2514/6.1996-3018

[12] **INRS** – Mise en œuvre de la réglementation relative aux atmosphères explosives (Atex). Guide méthodologique. ED 945. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%20945>

FOCUS SUR... Les bonnes pratiques pour la détermination expérimentale des caractéristiques d'inflammabilité et d'explosivité

1. Fournir au laboratoire chargé de l'analyse l'ensemble des informations contextuelles :

- Décrire le procédé ;
- Indiquer le cas échéant les zones de formation d'Atex identifiées, les zones d'accumulation de poudre/poussières et l'épaisseur associée ;
- Préciser les opérations modifiant la poudre : compactage, broyage, séchage, utilisation de solvants... ;
- Donner la description la plus complète possible de l'échantillon (granulométrie, humidité, origine, prétraitements) en fonction des données disponibles.

2. Prélever un ou plusieurs échantillons représentatifs du contexte de stockage ou de mise en œuvre et vérifier avec le laboratoire chargé de l'analyse la pertinence de l'échantillonnage.

En particulier, il est nécessaire d'évaluer les caractéristiques d'inflammabilité et d'explosivité de la poudre/poussière en différents endroits, notamment en cas de broyage, atomisation, séchage, granulation, recyclage, passage au travers des systèmes de filtration.

3. Cibler les objectifs des essais, en fonction des réponses aux questions de l'Encadré 1.

4. Définir le programme expérimental avec le laboratoire chargé de l'analyse, en corrélation avec les objectifs des essais :

- Caractérisation de la distribution granulométrique et du taux d'humidité, et préparation de l'échantillon (tamisage et séchage)¹ conformément aux protocoles normalisés ;
- Évaluation de l'aptitude à former une Atex : en cas de doute, détermination de la LIE. En l'absence de doute, passer à l'évaluation de la sensibilité aux sources d'inflammation, ou directement à l'évaluation de la violence d'explosion en milieu confiné en fonction des besoins ;
- Évaluation de la sensibilité aux sources d'inflammation, en fonction des besoins mis en évidence par l'évaluation préliminaire des risques (Cf. Question 6 de l'encadré 1), par ordre de priorité : détermination de l'EMI (avec ou sans inductance²), de la TMI en couche (épaisseur la plus courante : 5 mm), de la TMI en nuage³ ;
- Évaluation de la violence d'explosion en milieu confiné : en cas de besoin de dimensionner des équipements de protection contre les effets des explosions, détermination de p_{max} et du K_{St} ⁴ ;
- Détermination de la CLO : en cas de besoin de dimensionner un dispositif de prévention de la formation d'Atex par inertage.

La section 6 de la norme NF EN ISO/IEC 80079-20-2 [8] propose des logigrammes utiles pour la définition du protocole expérimental.

5. Réaliser des essais normalisés uniquement, sauf conditions particulières de stockage ou de procédé, telles qu'un fonctionnement à une pression différente de la pression atmosphérique, à une température très élevée, en atmosphère enrichie ou appauvrie en oxygène...

6. Vérifier la compétence du laboratoire et la représentativité du protocole expérimental. Ceci est particulièrement important dans le cas du stockage ou de la mise en œuvre dans le procédé :

- D'un mélange hybride de poudre ou poussières avec un gaz ou une vapeur : il est nécessaire d'effectuer des essais paramétriques avec différentes compositions du mélange, et il est nécessaire de solliciter un laboratoire d'analyse qui dispose d'un savoir-faire et d'installations expérimentales spécifiques ;
- De poudre/poussières de métaux réactifs : l'énergie d'activation de la réaction d'oxydation par l'oxygène de l'air est très faible et sa température est très élevée, ce qui peut être à l'origine d'accidents au cours des essais. ●

1. Les normes de détermination des caractéristiques d'inflammabilité et d'explosivité prévoient en général une étape de préparation de l'échantillon avant les essais. Il s'agit de sécher le produit, le plus souvent à 60 °C pendant 24 heures, et de le tamiser pour ne soumettre à l'essai que la fraction susceptible de contribuer à l'explosion. Ceci est un avantage pour le classement relatif de l'inflammabilité et de l'explosivité de plusieurs produits comparés entre eux, par exemple. Cette pratique permet également une approche conservatrice, en considérant l'inflammabilité et l'explosivité des produits dans des conditions de ségrégation granulométrique défavorables (accumulation de la fraction la plus fine à certains points du procédé, comme la trémie d'un dépoussiéreur, les surfaces horizontales en hauteur d'un atelier...) et météorologiques (été particulièrement chaud et sec...). En revanche, certaines entreprises préfèrent tester le produit tel qu'il est prélevé dans l'installation. Si c'est l'approche retenue, il convient de vérifier qu'en aucun cas une fraction granulométrique plus fine ou du produit plus sec ne peuvent être présents dans l'installation. Quoi qu'il en soit, il est indispensable de caractériser la granulométrie et le taux d'humidité du produit soumis aux essais, afin de relier les résultats obtenus à ces informations. Ceci permet par la suite, en cas de modification du procédé ou du gisement de matières premières, de valider la représentativité des résultats d'inflammabilité et d'explosivité.

2. L'EMI sans inductance est plutôt représentative des étincelles électriques, comme celles qui se produisent lors de contacts électriques ou de décharges d'origine électrostatique. L'énergie est libérée sur un temps court. L'EMI avec inductance est plutôt représentative des étincelles d'origine mécanique, telles que les frottements, chocs ou ruptures de contacts mécaniques. L'ajout d'une inductance dans le circuit électrique augmente la durée de l'étincelle et favorise le transfert d'énergie aux poussières en suspension dans l'air. Ceci tend à diminuer la valeur de l'EMI obtenue au cours de l'essai, toutes choses égales par ailleurs. En général, l'EMI est déterminée avec inductance car cette approche est conservatrice.

3. Pour l'évaluation de la température maximale de surface du matériel utilisable en Atex, les deux valeurs de TMI en nuage et de TMI en couche de 5 mm sont utilisées. Dans la plupart des cas, c'est la valeur de TMI en couche qui est dimensionnante. Aussi, si seulement l'une des deux TMI doit être déterminée, il est souvent préférable de choisir la TMI en couche de 5 mm. Le mode de calcul de la température maximale de surface du matériel utilisable en Atex est explicité dans la brochure de l'INRS ED 945 [12] : « pour les poussières, les températures des surfaces doivent être inférieures ou égales à la valeur la plus faible des deux critères suivants : deux tiers de la température minimale d'inflammation du nuage air/poussières ; température minimale d'inflammation d'une couche de 5 mm d'épaisseur de la poussière considérée diminuée de 75 degrés ».

4. Il est nécessaire d'interpréter les résultats de p_{max} et de K_{St} avec prudence, dans la mesure où il existe des effets liés notamment à la géométrie et à l'extrapolation des résultats à des grands volumes. C'est pourquoi il est recommandé de faire valider le rapport d'essai par un expert, avant la transposition des résultats en prescriptions techniques pour le dimensionnement des dispositifs de protection des installations contre les effets des explosions.

MÉTHODES DE PRODUCTION D'HYDROGÈNE, RISQUES ASSOCIÉS ET PRÉVENTION

Cet article revient en détail sur les technologies de production d'hydrogène, sur les risques d'incendie et d'explosion qui y sont associés et sur les démarches et moyens de prévention mis en place pour les combattre à la source.

CYRIL GEHL
société Fike

La production mondiale d'hydrogène a presque doublé ces dernières années, passant de 55 Mt en 2005 à 97 Mt en 2024 ; cependant, seul 1 % de cette production (hydrogène bleu et vert) est considéré « à faibles émissions » de gaz à effet de serre¹.

Afin de mieux comprendre les différents types de production d'hydrogène et leurs divers niveaux d'émissions, ceux-ci sont généralement regroupés en catégories de couleur, chacune étant définie par la source d'énergie utilisée, la technologie de production et l'empreinte carbone (Cf. Figure 1). Par exemple, les couleurs les plus foncées, noir et marron, représentent les productions d'hydrogène les plus polluantes, tandis que les couleurs les plus claires, bleu et vert, représentent les moins émissives.

Chacune de ces méthodes de production présente des risques spécifiques, notamment ceux liés à la pression, aux incendies et aux explosions. L'objectif de cet article est d'identifier ces risques et de mettre en évidence les meilleures pratiques pour les prévenir.

Risques liés à la production d'hydrogène noir et marron et moyens de prévention et de protection

- Source de combustible : charbons noir et brun (lignite).
- Pourcentage estimé de la production totale d'hydrogène : 30 %.
- Technologie : gazéification – le charbon réagit avec la vapeur d'eau et l'oxygène à haute température.

Plusieurs étapes du processus de gazéification peuvent présenter des risques d'explosion.

Étape 1 : broyage du charbon

Le broyage du charbon (Cf. Figure 2) provoque la mise en suspension de poussières combus-

tibles dans le broyeur et forme une atmosphère explosive (Atex). De plus, la présence de sources d'inflammation dans le broyeur ne peut être totalement exclue par des mesures techniques ou organisationnelles.

Les mesures suivantes permettent de prévenir les risques pour les travailleurs et de protéger les installations :

- Caractérisation de la poussière à l'aide de tests en laboratoire (Cf. pp. 28-37). En effet, les propriétés d'inflammabilité et d'explosivité peuvent varier en fonction du type de charbon, de la taille des particules ou de la teneur en humidité. Cette étape est particulièrement essentielle afin

PRODUCTION D'HYDROGÈNE

NOIR

Gazéification du charbon

MARRON

Gazéification du lignite (charbon brun)

GRIS

Reformage du gaz naturel

NOIR

Reformage du gaz naturel avec CSC*

VERTE

Électrolyse

*Captage et stockage du carbone

↑ FIGURE 1 Exemple de classification des modes de production de l'hydrogène.

de définir correctement les mesures de prévention et les équipements de protection.

- Évaluation des risques tenant compte des spécificités du processus. Elle permet d'identifier les zones à risques et de définir les mesures de prévention des explosions, telles que les actions sur le contrôle des émissions de poussières, les sources d'inflammation, les paramètres de contrôle, la maintenance et l'entretien des équipements, le nettoyage des dépôts.
- Définition de mesures de protection pour le broyeur. Elles consistent à prévoir des dispositifs devant remplir deux fonctions : limiter l'accumulation de pression dans l'enceinte et empêcher l'explosion de se propager aux équipements connexes. Les systèmes de suppression des explosions (au moyen d'agents extincteurs) sont généralement préférés aux événements d'explosion « passifs » en raison des niveaux élevés de vibrations associés aux broyeurs à charbon. Ces systèmes fonctionnent comme suit : quelques centaines de millisecondes après avoir détecté une augmentation anormale de la pression liée à l'inflammation de l'Atex, un agent extincteur est injecté dans l'enceinte. Cela arrête la réaction de combustion et limite par conséquent l'augmentation de pression. L'explosion doit également être contenue dans le broyeur, afin d'éviter sa propagation aux autres équipements, tels que les cyclones ou les dépoussiéreurs. Les dispositifs d'isolation chimique recommandés sont installés sur l'entrée d'air chaud, l'entrée des briquettes de charbon et la sortie des poussières de charbon. Ils fonctionnent de manière similaire aux systèmes de suppression des explosions en créant une barrière inerte que les flammes ne peuvent pas franchir.

Étape 2 : Gazéification

Après broyage, le charbon est soumis à un processus de « gazéification » afin de créer un gaz de synthèse contenant de l'hydrogène. Bien que plusieurs étapes du processus de gazéification soient considérées comme dangereuses, cette section se concentre uniquement sur l'oxydation, qui est considérée comme la phase la plus critique. De même, la fragilisation des matériaux par l'hydrogène doit être prise en compte sur l'ensemble de l'installation (phénomène détaillé ci-après). Après séchage et pyrolyse du charbon, une quantité contrôlée d'oxygène est injectée. Le charbon subit une combustion partielle, générant de la chaleur, des oxydes de carbone et de l'eau. L'injection d'oxygène provoque la formation d'une Atex. Outre les systèmes de protection contre les explosions, des mesures techniques réduisent le risque de combustion et se concentrent principalement sur le contrôle des processus, telles que :



© Flickr

- surveiller les températures afin de maintenir le réacteur dans les limites de fonctionnement spécifiées ;
- ventiler afin de réduire la concentration en gaz inflammables ;
- inerte le réacteur au démarrage et à l'arrêt ;
- arrêter le processus dès la détection d'une anomalie, telle qu'une température de surface élevée ou une étincelle.

Le choix et l'ampleur de ces mesures doivent être déterminés par une évaluation des risques liée au processus.

↑ **FIGURE 2**
Broyeur à charbon.

Risques liés à la production d'hydrogène gris et bleu et moyens de prévention et de protection

- Source de combustible : gaz naturel.
- Pourcentage estimé de la production totale d'hydrogène : 60 % (gris), 2 % à 3 % (bleu).
- Technologie : reformage du méthane à la vapeur (en anglais SMR : *Steam methane refining*) ; une chaleur intense est utilisée pour transformer le méthane en hydrogène.

Le vaporeformage du méthane (SMR) requiert un four de reformage à la vapeur, dans lequel le gaz naturel et la vapeur passent à travers des dizaines de tubes remplis de catalyseurs à des températures pouvant atteindre 1 100 °C pour produire de l'hydrogène, appelé hydrogène gris. Une forme encore plus éco-efficace de ce processus permet la production d'hydrogène bleu. Elle utilise, une fois l'hydrogène produit, une technologie de capture et de stockage du carbone (en anglais CSC : *Carbon storage and capture*) pour réutiliser le CO₂ provenant du vaporeformage dans un autre processus





FIGURE 3 →
Disque de rupture
en amont
d'une PRV.

avec la vapeur d'eau et produisant de nouveau de l'hydrogène et du CO₂.

Les tubes catalyseurs et les collecteurs fonctionnent sous une pression généralement comprise entre 20 bar et 40 bar, et exigent donc un dispositif de décompression qui permet de limiter l'accumulation excessive de pression dans le système et l'empêche d'éclater. En raison du nombre important de tubes et de leur diamètre souvent réduit, des soupapes de décompression (en anglais PRV : *Pressure reducing valve*) sont installées au niveau du collecteur (en sortie) ou du manifold (en entrée) afin de couvrir l'ensemble du faisceau de tubes. Des disques de rupture (Cf. Figure 3) peuvent également être utilisés en amont des PRV pour les raisons suivantes :

- contrôle des émissions dans l'environnement de travail : des pressions légèrement supérieures à la normale peuvent entraîner des fuites indésirables au niveau de la soupape. Un disque de rupture en amont assure une étanchéité parfaite tant qu'il n'y a pas de nécessité de libérer une surpression dangereuse pour l'installation ;
- optimisation des coûts et protection des équipements de sécurité : le processus de reformage du méthane à la vapeur peut nécessiter l'installation de PRV fabriquées avec des matériaux coûteux, tels que des aciers fortement alliés, afin de les

protéger contre la corrosion et la fragilisation par l'hydrogène. Un disque de rupture en amont isole la vanne du fluide, protégeant ainsi les PRV coûteuses ou permettant l'utilisation de matériaux plus courants dans leur fabrication ;

- vérifications et contrôles : les vannes doivent être régulièrement démontées et testées afin de s'assurer qu'elles fonctionnent correctement et que les codes et les normes sont respectés, ce qui entraîne des temps d'arrêt indésirables. Certains types de disques de rupture permettent de réaliser des tests en cours de fonctionnement en pressurant la cavité entre les deux dispositifs.

La fragilisation par l'hydrogène doit également être prise en compte, car elle peut avoir un impact considérable sur les composants critiques. La fragilisation par l'hydrogène rend les métaux cassants en raison de l'introduction et de la diffusion d'hydrogène dans le matériau. Ce phénomène entraîne une réduction de la ductilité et une diminution de la capacité de charge en dessous de la résistance à la rupture ou de la limite d'élasticité prévue des matériaux qui y sont sensibles.

Des fissures peuvent alors apparaître sur un objet fragilisé sous l'effet de contraintes résiduelles, de service ou générées par des opérations de fabrication telles que le formage et le soudage.

Ces conditions peuvent entraîner des dommages importants et, à terme, la défaillance de composants critiques du processus. Il est donc essentiel d'éviter la fragilisation par l'hydrogène.

Les disques de rupture en acier inoxydable, tels que les nuances 304 et 316, ou en d'autres matériaux moins sensibles à la fragilisation par l'hydrogène, peuvent prolonger la durée de vie des PRV composées d'éléments soumis à des contraintes élevées, tels que les ressorts, les disques, les tiges et les sièges. En résumé, moins il y a de fluide qui circule dans une PRV, mieux c'est, et les disques de rupture constituent souvent une solution fiable et rentable pour cette stratégie d'isolation.

Le risque Atex est également très présent dans le processus de reformage à la vapeur en raison de la présence de l'hydrogène et de gaz inflammables pour alimenter les brûleurs des grands réchauffeurs.

Une atmosphère explosive peut se former notamment en cas de fuite de gaz, d'extinction de la flamme du brûleur ou de défaillance des tubes catalytiques (fragilisation par l'hydrogène, rupture pneumatique, etc.).

Il est ainsi pertinent de pouvoir détecter rapidement les diverses défaillances afin de mettre en œuvre les actions adaptées. Par exemple :

- détection de la présence de flammes du brûleur (détecteur UV/IR...) ;
- détection d'une fuite d'hydrogène gazeux (détecteur de gaz, détecteur acoustique...).

Risques liés à la production d'hydrogène vert et moyens de prévention et de protection

- Source d'énergie : électricité à partir d'énergies renouvelables (solaire, éolienne et hydraulique).
- Pourcentage estimé de la production totale d'hydrogène : 3 %.
- Technologie : électrolyse, utilisant l'électricité pour décomposer l'eau en oxygène et en hydrogène.

Les risques liés à la production d'hydrogène vert doivent d'abord être analysés au niveau de la source d'énergie.

Les installations de production d'électricité à partir d'énergies renouvelables peuvent présenter des risques d'incendie inhérents qui doivent être analysés en fonction des spécificités de ces technologies. Ces aspects ne sont pas détaillés dans cet article, qui se concentre sur le stockage de l'énergie électrique afin d'assurer la stabilité du réseau et la disponibilité de l'énergie électrique, ainsi que sur son utilisation pour produire de l'hydrogène par électrolyse de l'eau.

Les énergies renouvelables, en particulier celles provenant de sources non contrôlables telles que le solaire et l'éolien, sont souvent captées dans des batteries lithium-ion intégrées dans une construction mobile de type « conteneur maritime » appelée BESS (*Battery energy storage system* – poste stationnaire de stockage de l'énergie). Les batteries lithium-ion défectueuses peuvent subir un phénomène appelé « emballement thermique », qui est une réaction chimique engendrant une augmentation rapide de la température d'une cellule et l'émission de gaz toxiques et inflammables. Ce phénomène se propage rapidement aux cellules adjacentes (Cf. pp. 42-47).

Les incendies de batteries sont particulièrement difficiles à contrôler et à éteindre, car il est nécessaire de refroidir les cellules et d'arrêter la propagation de l'emballement thermique au cœur de la batterie. À l'heure actuelle, les systèmes traditionnels d'extinction d'incendie, basés sur une action externe avec de l'eau ou des agents chimiques, sont inefficaces contre les incendies dus à un emballement thermique et peuvent entraîner une réinflammation sous forme explosive. Des systèmes d'extinction innovants, basés sur un refroidissement interne et la gestion thermique des cellules sont en cours de développement.

La société Fike a notamment développé « Fike Blue », qui immerge le module de batterie et les cellules affectées et possède une capacité thermique suffisante pour absorber la chaleur et refroidir l'environnement, stoppant ainsi la propagation du phénomène d'emballement. Ce système empêche aussi la réinflammation des fumées émises.

Ce type de système doit être intégré dans une stratégie globale de gestion des risques, qui implique la

prévention du phénomène (qualité des batteries et des assemblages, utilisation dans les limites opérationnelles recommandées par le fabricant, maintenance des équipements, etc.), la formation du personnel de maintenance, la formalisation des procédures d'intervention, la détection des défauts (gaz, incendie, etc.), la gestion des gaz émis lors d'un emballement thermique (ventilation) et du risque d'inflammation différée (explosion).

Pour la production d'hydrogène, une fois l'énergie renouvelable captée en toute sécurité, elle peut être utilisée dans le processus d'électrolyse afin de décomposer l'eau en hydrogène et en oxygène. Les principaux risques liés à l'électrolyse concernent les émissions d'hydrogène et d'oxygène pendant le fonctionnement normal, les fuites accidentelles d'hydrogène et les mélanges accidentels d'oxygène et d'hydrogène en cas de défaillance de la membrane de l'électrolyseur.

Ces installations présentent également des risques liés à la corrosivité de l'électrolyte (électrolyse alcaline) et aux équipements sous pression. La sécurité du système d'électrolyse doit être considérée dès la phase de conception :

- prise en compte des caractéristiques spécifiques de l'hydrogène, notamment concernant la compatibilité des matériaux et le choix des composants;
- installation de soupapes de sécurité ou de disques de rupture;
- possibilité de sécuriser le système en cas de détection d'une fuite.

Les mesures visant à prévenir le risque d'explosion dans ces installations comprennent :

- la réalisation d'une étude Atex et la mise en œuvre des mesures qui en découlent (ventilation, protection contre les explosions, équipements électriques et non électriques adaptés, etc.);
- le contrôle régulier de l'étanchéité de la membrane;
- la définition de protocoles d'intervention sur les équipements (mise en sécurité, inertage, etc.) ;
- la formation du personnel d'exploitation et de maintenance.

Conclusion

Les différentes formes de production d'hydrogène nécessitent des processus complexes, chacun présentant des risques d'incendie-explosion qui doivent être analysés et pris en compte. Il est toujours recommandé de faire appel à un expert et d'appliquer les règles de l'art existantes, que ce soit pour la conception d'une nouvelle usine de production d'hydrogène ou pour l'analyse de la sécurité de fonctionnement, l'évaluation des risques et la mise en place des systèmes de sécurité et de protection. ●

1. Source : <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024/hydrogen-production>

PRÉVENTION DU RISQUE INCENDIE ET EXPLOSION DANS LES SOLUTIONS CONTENEURISÉES

Parmi les différents vecteurs énergétiques utilisés pour accompagner la transition énergétique, l'hydrogène et les batteries lithium-ion ont pour point commun le déploiement sous la forme de solutions conteneurisées.

Cet article revient en détail sur les filières et les technologies de solutions conteneurisées, sur les risques d'incendie et d'explosion qui y sont associés, et sur les moyens de prévention permettant d'y faire face.

JÉRÔME
DAUBECH,
THIERRY
DELBAERE,
EMMANUEL
LEPRETTE,
MARIE-
ASTRID
SOENEN,
BENJAMIN
TRUCHOT,
BENNO
WEINBERGER
Ineris

L'avènement des solutions conteneurisées

Parmi les différents vecteurs énergétiques utilisés pour accompagner la transition énergétique, l'hydrogène et les batteries lithium-ion ont pour point commun le déploiement sous la forme de solutions conteneurisées.

Ce déploiement de systèmes énergétiques en conteneur permet une production et un stockage décentralisés, modulaires et transportables, utilisés dans des contextes industriels, portuaires, aéroportuaires, ou pour des installations temporaires ou mobiles.

Les conteneurs hydrogène sont des systèmes modulaires qui intègrent un ou des électrolyseurs et parfois une pile à combustible et des réservoirs d'hydrogène, ou encore des compresseurs d'hydrogène. La puissance énergétique de ces conteneurs peut atteindre plusieurs mégawatts, les pressions dans les réservoirs peuvent atteindre jusqu'à 1 200 bar.

Les conteneurs de batteries intègrent des batteries, des onduleurs et une gestion thermique. Ils sont conçus comme des systèmes pouvant être facilement mis en œuvre (type « *plug & play* ») et déployés en configuration associée (multi-conteneurs).

Aussi, parmi les bonnes pratiques pour sécuriser ces conteneurs vis-à-vis des risques associés aux systèmes énergétiques qui y sont installés, il est nécessaire de :

- concevoir la ventilation mécanique et naturelle de façon à éviter les zones mortes et favoriser l'extraction des gaz inflammables ou toxiques ;
- déployer des systèmes de détection précoce des fuites ou anomalies ;

- intégrer des barrières de sécurité (systèmes de refroidissement, capteurs de température, événements d'explosion..).

Cet article présente la synthèse des travaux de l'Ineris pour évaluer et « maîtriser les risques » associés à ces solutions conteneurisées.

Retours d'expériences

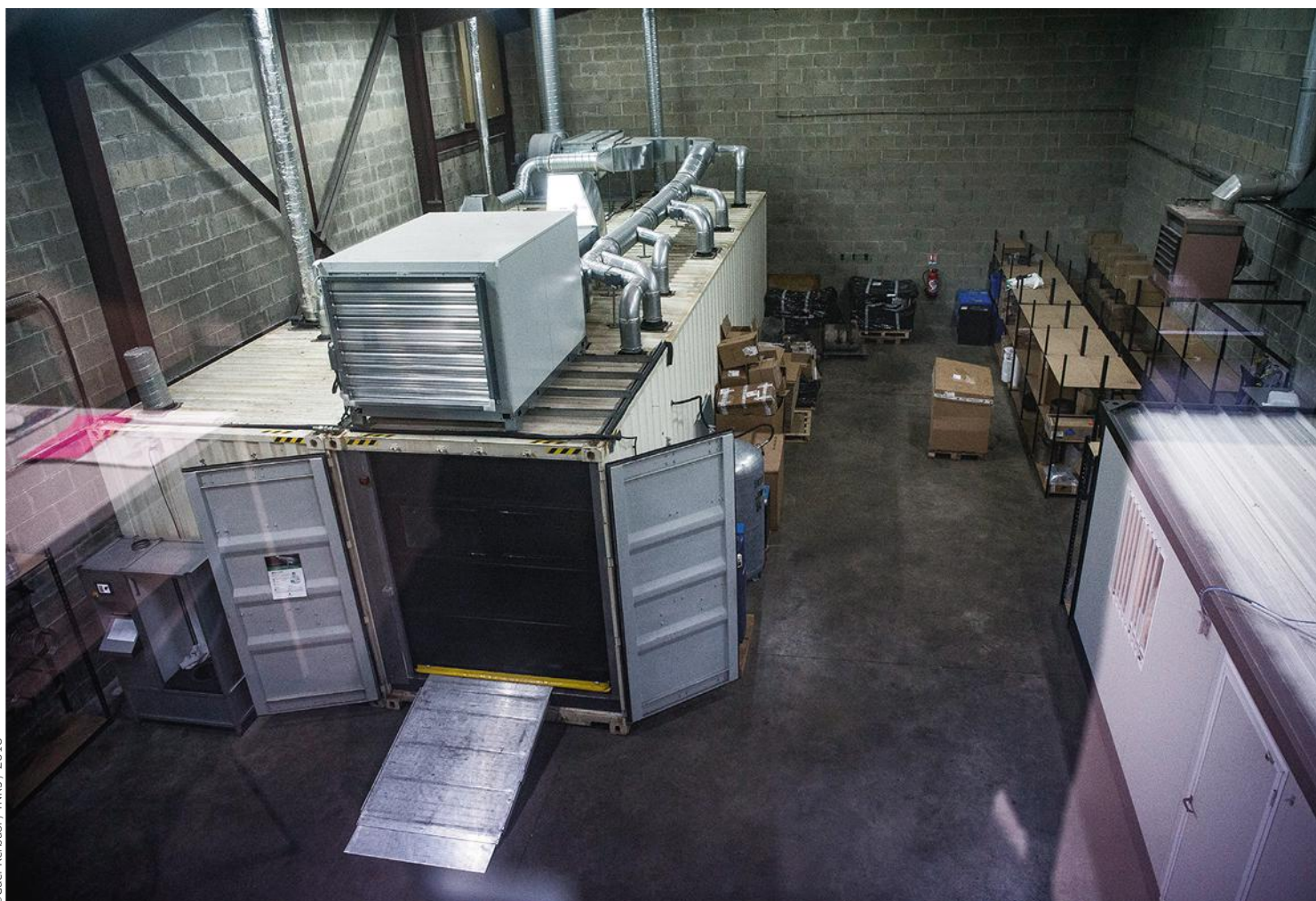
Les installations de production et de stockage d'énergie sous forme de conteneurs peuvent présenter un risque d'incendie ou d'explosion, comme l'illustrent plusieurs exemples récents.

Explosion dans un conteneur de compression hydrogène

Le 25 juin 2024, le conteneur de compression de la station de distribution d'hydrogène de Gersthofen (Bavière) a subi une explosion, suivie d'un incendie. Cette station venait d'être inaugurée quelques jours auparavant. Les pompiers ont rapidement maîtrisé l'incendie. Il n'y a eu aucun blessé mais des dégâts matériels importants.

Les analyses techniques montrent que la rupture d'une tige de liaison (diamètre ≈ 64 mm) a provoqué une perte d'étanchéité dans le compresseur. Cette tige maintient la cohésion des principaux éléments du compresseur. Sa rupture a entraîné un léger désalignement des pièces, créant un interstice par lequel l'hydrogène sous haute pression s'est échappé à l'intérieur du conteneur.

En quelques instants, une grande quantité d'hydrogène s'est accumulée dans le conteneur, puis s'est enflammée, provoquant une déflagration. L'explosion a arraché une porte du conteneur,



©Gael Kerbaol / INRS / 2018

projetée jusqu'à une clôture à 10 mètres, et a également éjecté le refroidisseur, probablement installé sur la toiture.

L'analyse métallographique de la tige a révélé une rupture fragile intergranulaire, signe d'un traitement thermique inadéquat du matériau.

Explosion d'une station de distribution d'hydrogène

Le 10 juin 2019, une explosion majeure s'est produite dans une station de distribution d'hydrogène à Sandvika (Norvège), à la suite d'une fuite sur un réservoir haute pression causée par une erreur de montage. Bien que l'installation ne soit pas conteneurisée mais simplement entourée d'un bardage métallique, l'accident a entraîné la projection d'éléments lourds, notamment des morceaux du mur coupe-feu, retrouvés à environ 50 mètres, et des dégâts importants dans l'environnement proche. Cet événement, souvent cité, illustre les risques liés aux fuites d'hydrogène et souligne l'importance des procédures de montage et des systèmes de détection, même si son contexte diffère des installations conteneurisées.

Cas de conteneurs de batteries

On peut citer les événements suivants :

- explosion non suivie d'un incendie (Surprise, Arizona, 2019) ;
- explosion suivie d'un incendie (Drogenbos, 2017 ; Liverpool, 2020 ; Perles-et-Castelet, 2020 ; Pékin, 2021) ;
- incendie sans explosion (Geelong, 2021) ;
- incendie de plusieurs conteneurs qui a duré plusieurs jours (Moss Landing, 2025).

Phénoménologies appliquées au conteneur

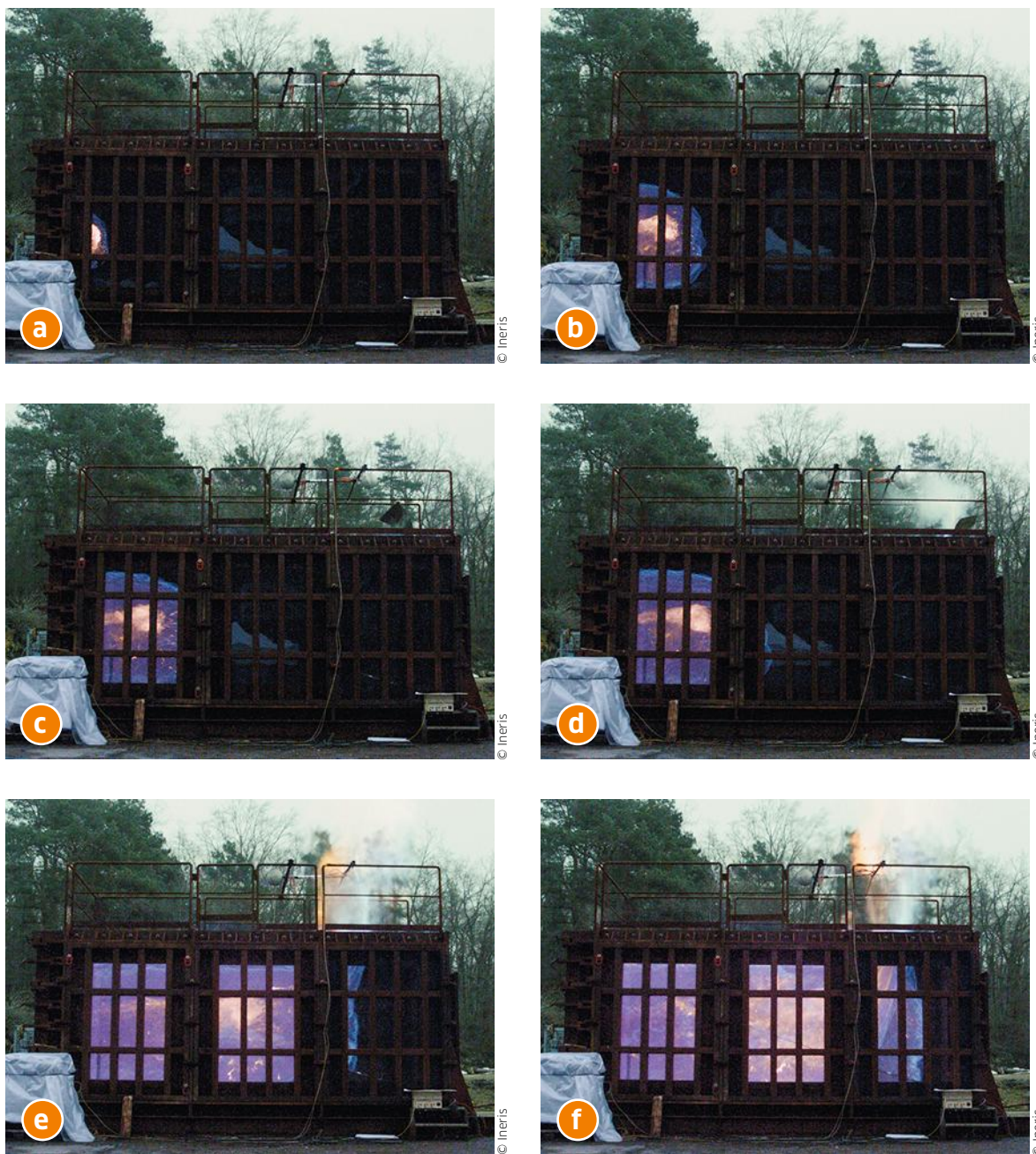
Le conteneur accueillant des systèmes énergétiques constitue un milieu confiné et, selon son encombrement intérieur, le volume libre disponible peut être faible. Il est donc essentiel de comprendre comment une atmosphère explosive peut se former dans ces configurations particulières.

Phénoménologie de la dispersion : formation d'une atmosphère explosive en milieu confiné

Lorsqu'un système contenant un gaz inflammable (par exemple méthane, propane, hydrogène ou gaz issus de l'emballage thermique de batteries)

Exemple de conteneur détourné de son usage d'origine ; ici, activité de nettoyage de filtres à particules.





↑ FIGURE 1 Phénoméologie d'une explosion confinée (chambre de 37,5 m³ ; mélange combustible CO₂/H₂/CH₄ ; panneau d'évent : 1 m² ; pression d'ouverture : 100 mbar).

subit une perte d'étanchéité, le gaz (ou le mélange de gaz) s'échappe dans le volume libre du conteneur et peut conduire à la formation d'une atmosphère explosive (Atex). Ce phénomène résulte de l'accumulation progressive du gaz lorsque celui-ci ne peut être convenablement évacué ou dilué par ventilation. Si sa concentration atteint une plage située entre la limite inférieure (LIE) et la limite supérieure d'explosivité (LSE), un mélange explosif air-gaz se forme. La dispersion du gaz dans le volume libre est influencée par de nombreux paramètres, parmi lesquels la nature physicochimique du gaz (composition, masse volumique...), les

conditions de fuite (pression, température, débit, orientation du jet), la géométrie de l'environnement (volume disponible, encombrement interne) et les conditions de ventilation (naturelle ou mécanique). Dans un espace clos, le nuage inflammable peut occuper tout ou partie de l'espace avec, le cas échéant, des poches localisées dans des zones peu ventilées et présenter une forte stratification.

Phénoméologie de l'explosion

Afin de mieux comprendre le phénomène d'explosion dans cette situation particulière du conteneur, l'Ineris a développé un équipement expérimental

spécifique (Cf. Encadré p. 47). Les principaux résultats des essais menés avec cet équipement sont les suivants :

- Lorsqu'une Atex rencontre une source d'inflammation (étincelle, surface chaude, charge électrostatique...), la combustion s'amorce (Cf. Figure 1a). Les produits de combustion chauds ainsi formés servent à leur tour de source d'inflammation pour les zones avoisinantes. Sur son passage, la flamme transforme le milieu réactif froid en produits de combustion chauds (Cf. Figure 1b). La portion du nuage traversée par la flamme subit une expansion thermique très importante¹. L'expansion thermique du gaz sous l'effet de la combustion est responsable de l'augmentation de la pression interne dans le conteneur. Plusieurs paramètres influencent directement la violence de l'explosion : la composition du mélange (concentration, homogénéité), la nature du gaz (vitesse de flamme, chaleur de combustion), la turbulence initiale, ainsi que la présence d'obstacles internes qui favorisent l'accélération de la flamme et la vitesse de montée en pression dans le conteneur.
- S'il n'existe pas de surfaces fragiles ou d'événements d'explosion, ou s'ils sont mal dimensionnés, la pression interne dans l'enceinte peut augmenter au-delà de la pression de résistance mécanique du conteneur, généralement de l'ordre de 500 mbar. La pression peut alors atteindre un niveau tel que des dégâts importants peuvent être générés, allant de la projection de fragments de l'enceinte jusqu'à sa destruction partielle ou totale. Cette destruction s'accompagne également d'effets de surpression importants sur une distance pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres autour du conteneur.
- Dans le cas où des événements d'explosion ou des surfaces fragiles sont présents, lorsque la pression interne du conteneur atteint leurs seuils de résistance mécanique, ces éléments s'ouvrent et provoquent une dépressurisation partielle de l'enceinte (Cf. Figure 1c). Une partie des gaz frais et brûlés est évacuée. Il y a alors une compétition entre la production de gaz chauds par la flamme et l'évacuation des gaz par les surfaces ouvertes. La pression maximale atteinte dans l'enceinte est alors appelée « pression réduite ». Les gaz expulsés forment un nuage turbulent (Cf. Figure 1d). Lorsque la flamme atteint les surfaces ouvertes, le nuage externe est enflammé (Cf. Figure 1e). La flamme se propage alors dans le nuage externe et génère une explosion externe appelée explosion secondaire. À ce stade, la combustion interne n'est pas terminée. L'explosion externe produit une onde de pression qui se propage dans l'environnement. La surpression interne du volume atteint alors son maximum. Après l'explosion externe, le mélange inflammable restant dans l'enceinte finit

de brûler et les produits de combustion chauds sont évacués par l'évent sous forme de jet chaud (Cf. Figure 1f).

La compréhension fine de cette phénoménologie (dispersion/explosion) est essentielle pour évaluer les scénarios d'accident, dimensionner les dispositifs de sécurité et orienter les mesures de prévention, notamment en matière de détection de gaz, de gestion de la ventilation, de maîtrise des sources d'inflammation et de dimensionnement des surfaces de décharge d'explosion. La connaissance du phénomène permet d'agir tant sur la sécurité de fonctionnement de l'équipement que sur la sécurité des personnes à proximité. Conformément à la réglementation en vigueur pour les travailleurs, une analyse du risque d'explosion dans le conteneur (considéré comme un local) doit être effectuée pour toute mise en œuvre de produits inflammables ou combustibles et, notamment, un zonage Atex doit être établi.

Garantir la sécurité du conteneur

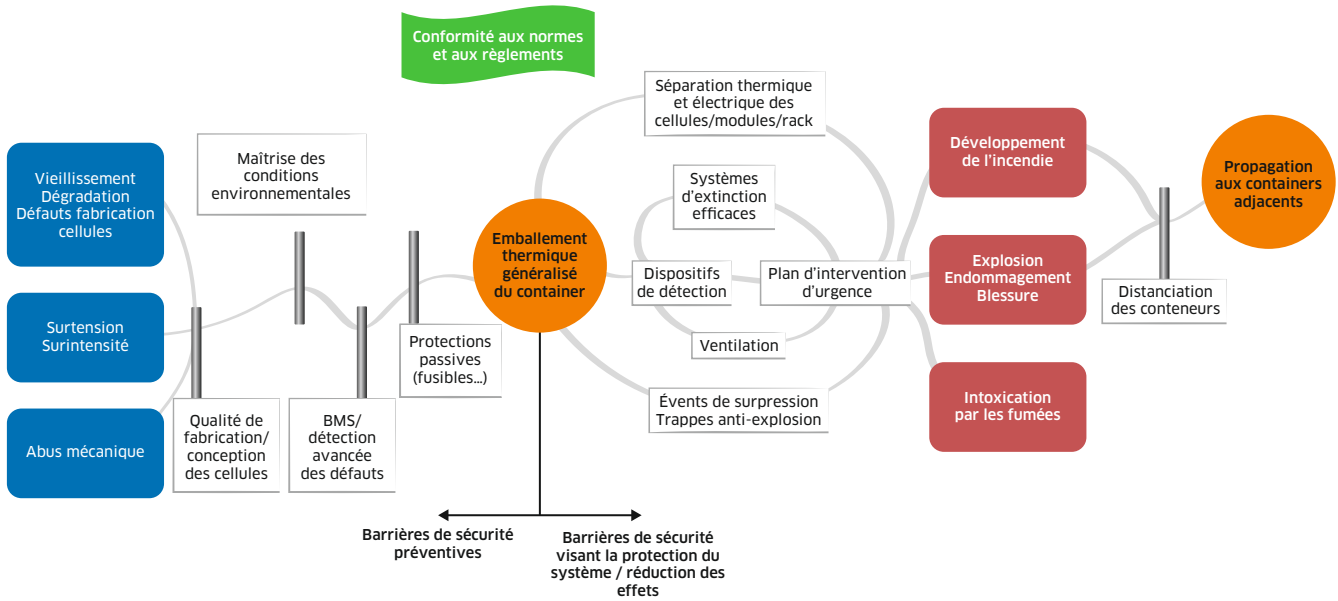
L'étude de sécurité du conteneur, en s'appuyant sur des expérimentations et des modélisations, doit permettre d'adapter sa configuration interne afin de limiter les conséquences d'un événement. Les systèmes électrochimiques de stockage d'énergie et les installations hydrogène sont suffisamment étanches en fonctionnement normal pour ne pas conduire à un risque d'explosion. Aussi, l'enjeu pour ces installations est de garantir la maîtrise des risques en situation accidentelle à la suite, par exemple, d'un emballement thermique de batterie ou d'une fuite d'hydrogène.

Les textes réglementaires existants aux niveaux national, européen et international sont établis pour assurer la maîtrise des risques dans ces situations accidentelles. Cependant, lors de l'assemblage de plusieurs de ces objets énergétiques dans un milieu confiné comme un conteneur, les principaux phénomènes dangereux rencontrés ne sont pas forcément tous bien pris en compte.

Les deux principaux phénomènes dangereux à prendre en compte pour l'étude de sécurité pour un conteneur de batteries Li-ion sont :

- l'incendie consécutif à l'inflammation des gaz émis lors d'un emballement thermique : il s'agit *a priori* de la majorité des incidents (50 cas sur 56 incidents recensés) ;
- l'explosion consécutive à l'accumulation de gaz émis lors d'un emballement thermique et son inflammation retardée : la formation d'une atmosphère explosive puis son inflammation va provoquer une explosion avec projections de débris. Les gaz inflammables émis sont principalement l'hydrogène, des carbonates organiques utilisés comme solvants de l'électrolyte, le monoxyde de carbone et des hydrocarbures légers (méthane,





↑ FIGURE 2 Schéma représentant les barrières de sécurité préventives et de protection des systèmes de stockage de batteries Li-ion conteneurisés [1].

éthylène...). Les sources d'inflammation potentielles sont des surfaces chaudes, des étincelles éjectées lors de l'emballage thermique, des arcs électriques...

Dans la configuration d'un rack de batteries, l'emballage thermique d'une cellule peut se propager aux cellules adjacentes par l'un des mécanismes de transfert de chaleur suivants :

- conduction : contact direct entre les cellules ou entre les cellules et leur bus bar (connecteurs électriques) communs ;
- convection : impact des gaz chauds ;
- rayonnement : impact des flammes.

L'emballage thermique se propage ainsi de cellule en cellule. La libération importante d'effluents

↓ FIGURE 3 Conception de conteneur avec événements d'explosion sur le toit.



gazeux volatils augmente alors la quantité de gaz et vapeurs inflammables présents dans l'atmosphère. Ceci peut conduire à un scénario où une Atex de volume important se forme et génère une explosion de forte intensité. L'accidentologie montre qu'un rack de batteries (généralement constitué d'une dizaine de modules) peut générer suffisamment d'effluents gazeux pour atteindre les conditions d'une explosion. Le volume de gaz émis avant inflammation, variable selon les sources, serait de l'ordre de 0,3 L/Wh à 6 L/Wh.

Lors de la conception et de la mise en œuvre d'un système de stockage conteneurisé avec des batteries Li-ion, il est donc nécessaire de tout mettre en œuvre afin que :

- l'apparition d'un incendie, voire d'un événement précurseur (émission de vapeur/gaz) soit détectée et signalée à un stade précoce par la détection ;
- la propagation du feu soit limitée voire supprimée à un stade précoce ;
- la structure soit protégée contre une explosion causée par l'accumulation et l'inflammation des gaz émis lors d'un emballement thermique ;
- l'intervention des services d'urgence puisse être réalisée en sécurité.

Ainsi, des barrières performantes et efficaces « multicouches » doivent être mises en place à toutes les échelles (cellules, modules, racks, systèmes, parc batteries, conteneur) afin de minimiser la propagation en cascade d'un emballement thermique à partir d'une cellule ou d'un module et d'atténuer les conséquences associées à un incendie ou à une explosion ou encore à un dégagement de gaz toxiques et inflammables. Il s'agit de barrières de sécurité préventives et de protection. Ces barrières sont représentées sur la Figure 2.

Les barrières préventives comprennent notamment :

- la qualité de fabrication et de conception des cellules;
- la maîtrise des conditions environnementales;
- les fonctions de sécurité assurées par le BMS (battery management system);
- la détection redondante des défaillances et les actions associées;
- le report des alertes/alarmes en temps réel dès la mise en service du système;
- la protection passive du système (disjoncteurs, fusibles ou autres éléments passifs de protection contre les surtensions).

L'analyse de l'accidentologie montre que chacune des barrières préventives recensées ci-dessus a été défaillante dans au moins un incident impliquant un système de stockage stationnaire.

Les barrières de protection comprennent notamment :

- les matériaux assurant une isolation thermique;
- les dispositifs d'extinction;
- la protection contre les explosions (ventilation, trappes anti-explosives);
- les règles de conception visant la non-propagation d'un événement au sein du conteneur mais aussi de conteneur en conteneur tels l'ajout de dispositifs d'extinction;
- l'élaboration d'un plan d'intervention d'urgence.

L'analyse de l'accidentologie montre que, lors des différents accidents, soit la barrière de protection a été inefficace (dispositif d'extinction par exemple), soit le système de stockage ne disposait pas de cette barrière (événement d'explosion par exemple, Cf. Figure 3).

Les systèmes d'extinction à base de gaz/aérosol, qui peuvent être efficaces contre les incendies dans l'ensemble du système en dehors des batteries, peuvent être complétés par un système d'extinction à base d'eau localisé sur les modules en feu et par une ventilation adéquate pour éliminer rapidement l'agent s'il est inefficace (c'est-à-dire si la température du système continue à augmenter).

De nombreux conteneurs sur le marché aujourd'hui n'ont pas les dispositifs nécessaires à la prise en compte de l'accumulation de gaz inflammables et du risque d'explosion. Compte tenu des retours d'expérience de l'accidentologie, des conceptions récentes de conteneur prévoient des événements d'explosion sur le toit, dimensionnés pour s'ouvrir en cas d'explosion, ainsi que des dispositifs de ventilation pouvant être actionnés manuellement ou automatiquement sur détection de gaz inflammables.

Des difficultés d'intervention ont été remontées dans les rapports d'analyse d'accident. L'élaboration d'un plan d'intervention d'urgence et la formation des premiers intervenants et des secours extérieurs est essentielle pour assurer une intervention sûre lors d'un événement sur ce type de stockage d'énergie.

ENCADRÉ

CHAMBRE D'EXPLOSION DE 37,5 M³ DE L'INERIS : ESSAI D'UN CONTENEUR À L'ÉCHELLE 1

L'Ineris dispose d'une chambre d'explosion de 37,5 m³ dont les dimensions sont similaires à celles d'un conteneur ISO de 20 pieds (Cf. Figure 4). Cette installation unique dispose d'une paroi transparente permettant la visualisation des phénomènes d'explosion interne ; sa résistance mécanique à la surpression d'explosion est de l'ordre de 3 bar.



↑ FIGURE 4 Chambre d'explosion de 37,5 m³.

Enfin, des évolutions importantes des normes, notamment à l'international (exemple de documents normatifs : UL 9540A, NF EN IEC 62933-5-2, NFPA 855 [2,4]) sont en cours dans le but de renforcer les dispositions de prévention et de protection, d'améliorer la sécurité des systèmes de stockages stationnaires et de protéger efficacement les installations et les personnes. ●

1. Le volume du nuage initial subit, après combustion, une expansion d'environ sept fois son volume pour un mélange hydrogène/air stœchiométrique.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] CHRISTENSEN P. – *Electric vehicles and risks to first responders*. Newcastle university, Webinar No. 38, FABIG 21.09.22. Accessible sur : <https://www.fabig.com/publications-and-videos/online-lectures-webinars/webinar-038/>
- [2] NORME UL 9540A – *Test method for battery energy storage systems (BESS)*. Accessible sur : <https://www.ul.com/services/ul-9540a-test-method>
- [3] NORME NF EN IEC 62933-5-2 – *Systèmes de stockage de l'énergie électrique (EES). Partie 5-2 : exigences de sécurité pour les systèmes EES intégrés dans un réseau – Systèmes électrochimiques*. Afnor, 2020. Accessible sur : <https://www.boutique.afnor.org/fr> (site payant).
- [4] NORME NFPA 855 – *Standard for the installation of stationary energy storage systems*. NFPA, 2026. Accessible sur : <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/nfpa-855-standard-development/855>

ASSURER UNE CONCEPTION EFFICACE DES BARRIÈRES DE SÉCURITÉ INCENDIE ET EXPLOSION

Cet article partage les bonnes pratiques d'ingénierie de sécurité incendie et explosion, appliquées aux nouvelles filières de l'énergie, en listant les points de vigilance à travers le choix et le dimensionnement des différentes mesures de prévention.

LAURENT
PARIS,
VIRGINIE
DREAN
Efectis

L'essor des filières batteries et hydrogène a vu émerger de nouveaux acteurs qui ne disposent pas toujours de la culture sécurité des acteurs historiques de l'énergie.

L'environnement fortement concurrentiel dans ces secteurs pousse certains développeurs de briques technologiques (par exemple électrolyseurs, piles à combustible, batteries ou réservoirs) à prioriser la mise sur le marché avec une approche focalisée principalement sur le produit au détriment d'une approche système. L'intégration revient alors à l'opérateur qui n'est pas nécessairement suffisamment informé et compétent sur les aspects de sécurité. Enfin, les approches prescriptives existantes (règles

et normes actuelles) ne sont pas forcément adaptées pour ces nouvelles applications.

Une meilleure prévention des risques dans ces filières s'appuiera sur :

- la réalisation d'analyse des risques pour les systèmes dès la phase de conception ;
- l'appropriation des bonnes pratiques et des méthodes des filières existantes comme celles du pétrole et du gaz ;
- le recours à une approche performantielle de la sécurité incendie et explosion, basée sur l'atteinte des objectifs de sécurité et non sur le respect de prescriptions (Cf. pp. 56-60), permettant de développer des solutions adaptées et innovantes.



© Fabrice Dimier pour l'INRS / 2025

Cet article s'attache à partager le retour d'expérience acquis ces dernières années quant aux bonnes pratiques d'ingénierie de sécurité incendie et explosion, appliquées aux nouvelles filières de l'énergie, en pointant les points de vigilance à travers le dimensionnement des barrières de sécurité.

Gestion des risques incendie et explosion

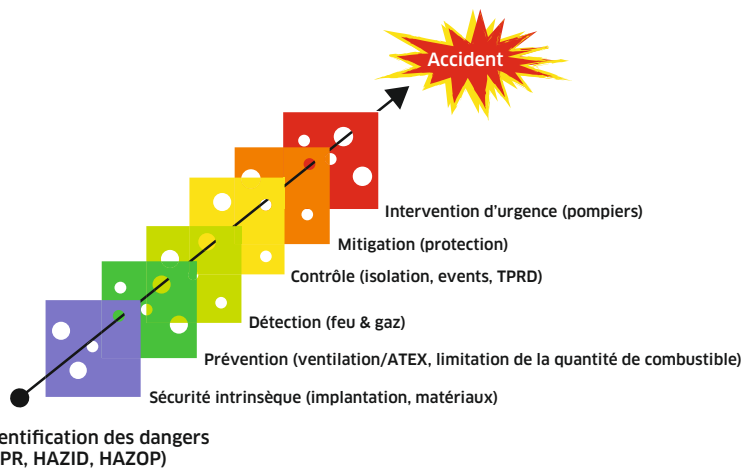
Barrières de sécurité

En amont de l'application de la méthode des barrières de sécurité, il convient de définir avec l'ensemble des parties prenantes (utilisateurs, concepteurs, autorités) les objectifs de sécurité et les exigences de performance à satisfaire pour chaque barrière (seuil d'acceptabilité). Cette étape doit également intégrer les exigences spécifiques telles que celles émises par les assureurs ou sociétés de certification.

Le principe fondamental de la méthode consiste à introduire différentes couches, visant à réduire la fréquence ou la gravité d'un danger (Cf. Figure 1 – terminologie issue de la norme NF EN ISO 13702 [1]).

Ces différentes barrières peuvent être passives ou actives, avec une action potentielle sur la fréquence ou la gravité. La valorisation de ces barrières dans les analyses de sécurité permettra de parler alors de conséquences résiduelles.

Chaque barrière doit être dimensionnée sur la base de scénarios crédibles afin de couvrir l'ensemble des risques jusqu'au seuil d'acceptabilité. Les scénarios de dimensionnement peuvent être corrélés à une fréquence d'occurrence.



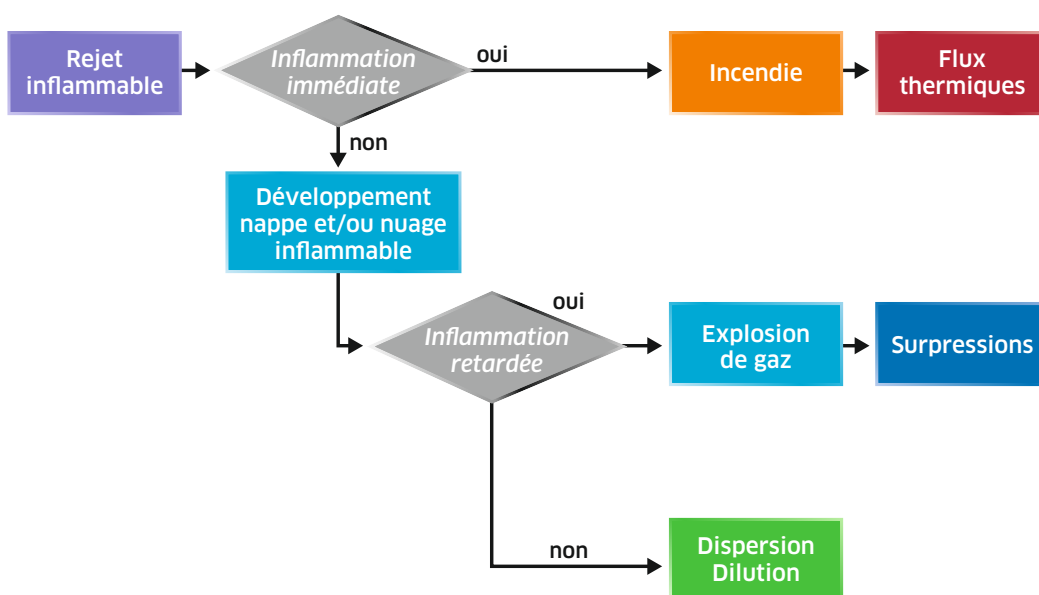
Identification des dangers

La première étape consiste à identifier les situations dangereuses, pour ensuite développer un arbre d'événements des conséquences potentielles (Cf. Figure 2). Cette approche s'appuie sur des techniques d'analyse usuelles menées en groupe d'experts pluridisciplinaire et permet ensuite de définir des scénarios accidentels pour le dimensionnement des barrières de protection.

Parmi ces techniques d'analyse, deux méthodes sont généralement utilisées lors du développement d'un projet car elles ont un impact fort sur la conception des barrières de sécurité :

- l'Hazop (*Hazard & operability*) : analyse systématique des risques liés aux dérives de procédés (système) ;
- l'Hazid (*Hazard identification*) : analyse systématique des interactions entre le système et son environnement.

↑ FIGURE 1
Vue d'ensemble des barrières de sécurité et d'atténuation des effets.



← FIGURE 2
Exemple d'arbre d'événements consécutif à une fuite sur une canalisation contenant un liquide inflammable.

ENCADRÉ 1

EXEMPLE DE MISE EN ÉVIDENCE DE L'INTÉRÊT D'UNE ANALYSE HAZID

Les groupes électrogènes à hydrogène apparaissent comme une alternative intéressante pour les utilisateurs. Cette solution n'émet pas directement de CO₂ et son fonctionnement est plutôt silencieux. En revanche, le stockage et la mise en œuvre d'hydrogène à haute pression nécessitent de s'interroger sur les interactions avec l'environnement d'exploitation (agressions externes et conséquences pour l'environnement).

• **Cas 1 : Alimentation isolée après défaillance du réseau électrique local suite à un événement intempêtif**

L'installation d'un tel équipement dans une zone isolée n'est pas de nature à générer des risques inacceptables : les agressions externes potentielles sont limitées ou facilement maîtrisables (probabilité faible). Une fuite sur le système hydrogène n'est pas de nature à générer des conséquences sévères sur les personnes à proximité.

• **Cas 2 : Alimentation à proximité d'un festival afin d'éviter les nuisances sonores et l'émission directe de CO₂**

D'une part, le public nombreux et imprévisible est une menace potentielle difficile à gérer pour l'installation située à proximité et, d'autre part, en cas de fuite, les conséquences seraient désastreuses pour les personnes.

Ces deux cas antagonistes illustrent la nécessité pour le même système de réaliser une analyse des risques de type Hazid même modeste afin de statuer sur l'acceptabilité et de définir des barrières techniques adaptées à la situation.

d'analyses de risques. Une approche courante est l'approche semi-quantitative reposant sur une matrice d'acceptabilité (Cf. Tableau 1) comportant plusieurs niveaux de risque. L'exemple ci-dessous comporte trois niveaux de risque, définissant trois zones de risque.

Le principe fondamental est de réduire le niveau des risques en zones 2 et 3 à un niveau acceptable (zone 1) préalablement défini (approche Alarp : *as low as reasonably practicable*) en s'appuyant sur le dimensionnement de barrières de sécurité appropriées.

Il convient de préciser que dans une approche performantielle réaliste, et eu égard au fait qu'un risque résiduel ne peut être écarté, il est nécessaire de définir préalablement les critères d'acceptabilité du risque. Il est en effet essentiel que l'ensemble des acteurs (assureurs, opérateurs, ingénierie, constructeur et bureau de contrôle) s'accordent d'abord sur les objectifs de sécurité puis sur le niveau de risque acceptable pour le projet compte tenu des enjeux.

Pour les technologies émergentes (systèmes de batteries stationnaires ou installations hydrogène), la principale difficulté réside dans la quantification des fréquences d'occurrence en l'absence de banque de données fiables issue du retour d'expérience et de l'accidentologie, comme cela peut être le cas dans le secteur industriel traditionnel. À l'heure actuelle, la transposition du retour d'expérience d'autres secteurs d'activité doit être privilégiée, tout en s'assurant de bien identifier les spécificités de ces nouvelles applications pour adapter les valeurs, en ayant une lecture critique des données existantes.

Sécurité intrinsèque

La sécurité intrinsèque n'est pas une barrière technique à proprement parler, mais consiste en la mise en œuvre de bonnes pratiques issues du retour d'expérience lors de la conception, notamment :

- réduire les potentiels de dangers (choix des procédés, conditions opératoires, nature et phase des produits mis en œuvre, limitation des quantités) ;
- sélectionner des matériaux constitutifs adaptés à l'application, comme dans le cas de l'hydrogène ;
- isoler et espacer les zones à risque par rapport aux personnes (distances de sécurité) ;
- assurer un compartimentage et un arrangement interne limitant la propagation.

Ces principes permettent de réduire à la fois l'occurrence des phénomènes accidentels et leur gravité. Dans une perspective de densification du stockage de l'énergie (haute pression pour l'hydrogène, augmentation des densités d'énergie pour les batteries au lithium), ces principes fondamentaux peuvent être complexes à satisfaire et sont souvent

Conséquences	Significatives	2	2	3	3
	Moyennes	1	2	2	3
	Faibles	1	1	2	2
	Négligeables	1	1	1	2
Matrice d'acceptabilité des risques	Négligeable	Faible	Moyenne	Élevée	
	Fréquences				

↑ TABLEAU 1 Matrice d'acceptabilité des risques semi-quantifiée.

La méthode Hazop est menée naturellement par les concepteurs de briques technologiques car elle concerne directement le produit et son fonctionnement (process). Elle permet de définir des barrières de sécurité intrinsèques, de prévention, voire de contrôle.

La méthode Hazid vise à évaluer l'intégration de la brique technologique dans un système plus large et donc d'identifier les interactions avec son environnement. Elle est spécifique à chaque projet et nécessite une attention particulière en regard des enjeux de sécurité. Les situations accidentelles sont traitées lors de cette revue (Cf. Encadré 1).

L'analyse des dangers peut être complétée en intégrant la fréquence d'occurrence. Il s'agit alors

remis en cause, obligeant à durcir les autres barrières pour atteindre le niveau de sécurité requis.

Prévention

Les barrières de prévention visent principalement à réduire l'occurrence des événements indésirables. Parmi les mesures envisageables, la ventilation est une barrière usuelle vis-à-vis du risque d'explosion mais peut être aggravante pour le risque incendie. La ventilation peut être naturelle, avec des variations potentielles en regard des conditions ambiantes, ou mécanique, maîtrisée mais nécessitant alors une maintenance régulière afin d'en garantir la fiabilité.

Pour les applications conteneurisées (groupe électrogène hydrogène ou poste de stockage par batteries), le système de ventilation doit être suffisamment dimensionné pour permettre la dilution des émissions éventuelles risquant de former un mélange explosif. Une ventilation d'urgence peut également être activée sur détection de gaz. Cependant, en cas d'incendie, il est préférable de réduire l'apport d'oxygène en agissant sur la ventilation. Ces deux exigences étant antagonistes, il est nécessaire d'avoir une approche équilibrée en vue de prendre les meilleurs choix selon la stratégie de sécurité définie (Cf. Encadré 2).

Détection feu et gaz

Les barrières de détection feu et gaz ont un double objectif :

- alerter le personnel et permettre l'évacuation (réduction de la gravité pour les personnes situées à proximité du danger) ;
- réduire le potentiel de danger par la mise en sécurité de l'installation (Cf. « Contrôle et atténuation des effets » p. 52).

La philosophie de détection doit s'inscrire dans une stratégie de sécurité globale en cohérence avec le dimensionnement des autres barrières en se référant aux objectifs de sécurité définis. La conception du système de détection doit prendre en compte les aspects suivants :

- la nature du scénario de feu et de l'émission : caractéristiques du foyer, produits émis, taille de l'orifice de fuite, position, direction, probabilité... ;
- le choix d'une logique de détection : par exemple définir des actions en fonction de l'activation d'un certain nombre de détecteurs ;
- le choix d'un ou plusieurs seuils de détection, par exemple pour un scénario d'émission et de risque d'explosion : 20 % LIE, 50 % LIE, et pour un scénario de feu : détection de fumées ou de monoxyde de carbone ;
- le temps de détection maximum requis et la réactivité du système pour chaque scénario ;
- le taux de couverture (pourcentage de l'espace couvert par un ou plusieurs détecteurs),

ENCADRÉ 2 GARANTIR UN ZONAGE ATEX ADAPTÉ À SON ENVIRONNEMENT GRÂCE À LA SIMULATION

Une mesure de prévention systématiquement mise en œuvre pour prévenir la formation d'une atmosphère explosive (Atex) consiste à mettre en place un taux de renouvellement d'air horaire permettant théoriquement d'éviter l'atteinte d'une fraction de la limite inférieure d'explosivité (LIE), généralement de 20 à 25 %.

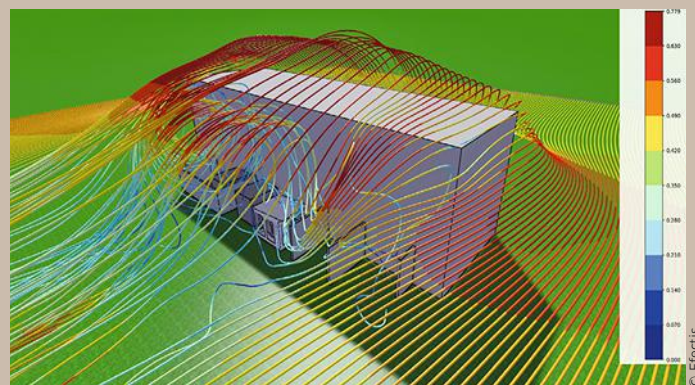
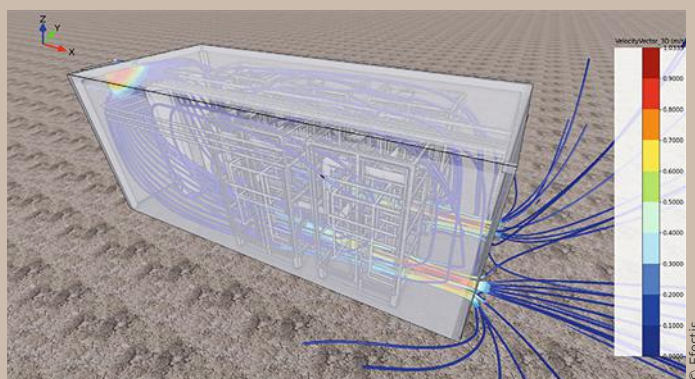
Cette approche est cependant limitée car elle considère une concentration moyenne et ne prend en compte que de manière limitée les paramètres suivants :

- caractéristiques de l'émission dans le scénario de dimensionnement (débit, composition) ;
- nature de la ventilation (naturelle/mécanique) ;
- encombrement interne et zones de recirculation ou zones mortes ;
- environnement du système (distances minimales d'un bâtiment) notamment pour les entrées d'air.

Les analyses menées avec des outils numériques de mécanique des fluides (CFD) permettent de prendre en compte tous ces aspects et de parvenir à un zonage Atex bien plus réaliste en intégrant par exemple le risque de formation de poches de gaz inflammable localement en raison de l'hétérogénéité du milieu.

La CFD peut également être utilisée en conception (par exemple, positionnement et débit des ventilations) ou pour quantifier les effets en cas d'explosion.

Toutefois, ces analyses nécessitent un niveau de détails et de compétences suffisant pour être pertinentes. Il est donc préférable d'exploiter des modèles simples en début de conception et de valider celle-ci par la CFD dans les étapes ultérieures lorsque le projet est plus mature.



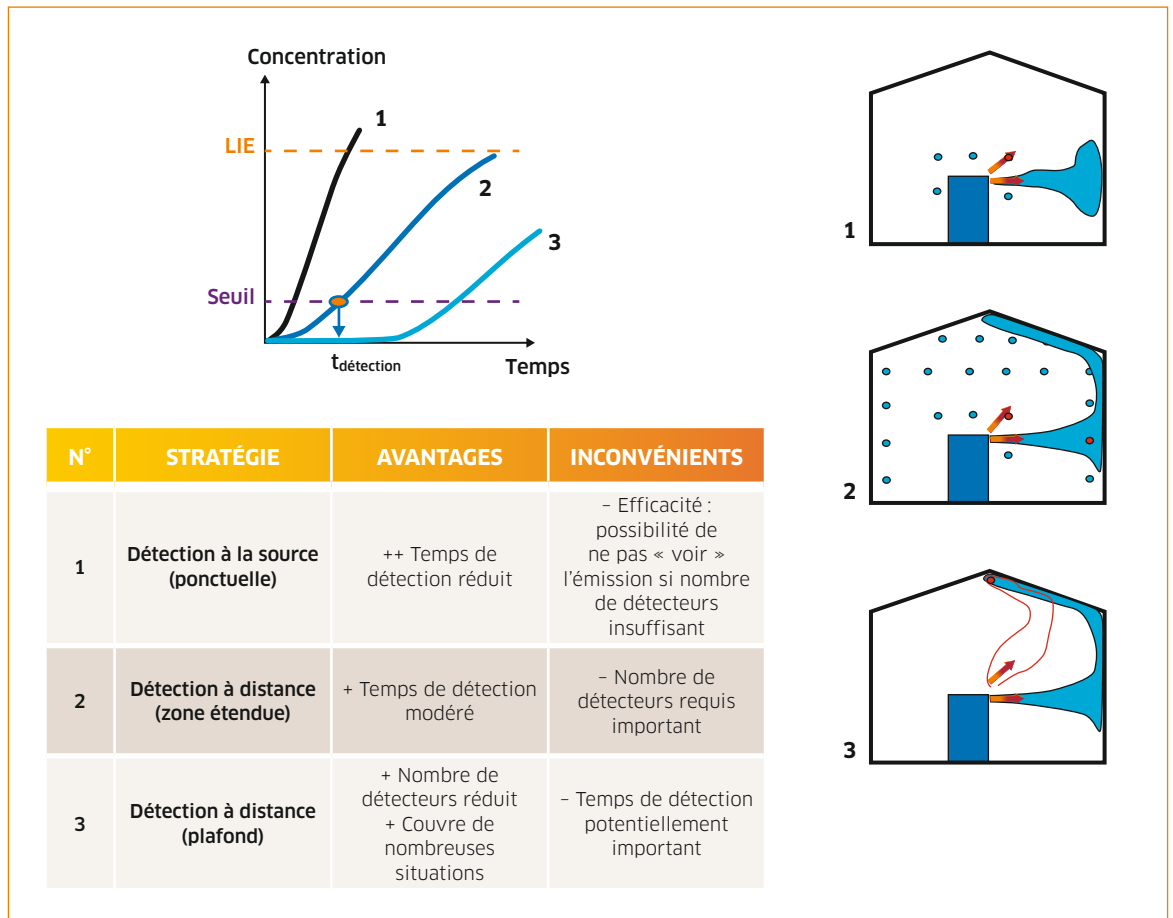


FIGURE 3 → Exemples de différentes stratégies de détection pour une émission d'hydrogène sous pression matérialisée par les flèches rouges.

en prenant en compte l'encombrement de la zone (facteur limitant pour la réactivité du système) ;

- la combinaison de plusieurs technologies/la redondance pour atteindre un niveau de fiabilité souhaité et notamment éviter les alarmes intempestives.

La conception d'une détection performante doit considérer différents scénarios probables, en prenant en compte leur fréquence d'occurrence et les conséquences attendues pour évaluer l'acceptabilité du risque de non-détection.

Dans la pratique, dans un scénario d'émission de produits inflammables, il paraît illusoire de vouloir tout détecter car ces émissions sont directionnelles avant de rencontrer un obstacle. La Figure 3 illustre différentes stratégies qui peuvent être mises en place dans un local fermé en l'absence de ventilation pour détecter une émission d'hydrogène sous pression ou au niveau de l'évent d'une batterie lors d'un emballement thermique.

Enfin, pour assurer un maintien des performances de cette barrière « détection » dans le temps, il est nécessaire de considérer l'aspect « maintenance » du système pendant toute la durée de vie de l'ouvrage.

Contrôle et atténuation des effets

Sur la base d'une détection confirmée, des actions peuvent être effectuées afin d'atténuer les effets de l'événement accidentel considéré (Cf. Tableau 2). De manière pratique, il convient d'agir sur l'intensité de l'événement accidentel et/ou sur sa durée par la limitation de la quantité de combustible ou d'air disponible, voire d'agir sur les sources d'inflammations potentielles.

Le contrôle des effets s'apparente à la mise en place de mesures de mitigation selon la terminologie française, mais se distingue des mesures de protection (visant à gérer le risque résiduel) dans les normes internationales (telles que NF EN ISO 13702 [1]). Les barrières de contrôle sont actives (et donc associées à une certaine réactivité et fiabilité), alors que les barrières de protection sont plutôt passives, et par essence fiables sous réserve d'être entretenues.

L'interaction entre les risques incendie et explosion doit être évaluée afin de s'assurer du meilleur compromis dans la gestion globale des risques.

Les dispositifs de protection des systèmes sous pression (Cf. Encadré 3) peuvent être complémentaires mais doivent surtout être définis en fonction

DISPOSITIF	OBJECTIF	PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	LIMITATIONS
Parois de décharge active	Réduire les surpressions engendrées dans un environnement confiné.	Ouverture d'un événement après atteinte d'un seuil de surpression prédéfini.	Propagation à l'extérieur des flammes et de l'onde de surpression.
Sprinklage	Contrôler et/ou éteindre un incendie.	Libération d'eau après atteinte d'un seuil de température prédéfini ou manuellement après détection.	Explosion, le sprinklage étant générateur de turbulence pouvant favoriser ou aggraver une explosion.
Noyage	Refroidir et éviter la propagation d'un emballage thermique d'une batterie.	Injection d'un fluide caloporteur permettant d'absorber et d'évacuer la chaleur dégagée par la réaction et faire baisser la température.	Nécessite la proximité d'un bac de noyage et la manipulation de la batterie vers le bac.

↑ **TABLEAU 2** Exemples de barrières de contrôle (non exhaustifs).

de la nature des scénarios d'agression à considérer, qu'ils soient d'origine interne ou externe.

Concernant les disques de rupture ou les événements, un compromis doit être défini, lors du dimensionnement en conception, entre les effets déchargés à l'extérieur de l'équipement et sa résistance. En effet, une faible surface d'événement conduira à limiter les effets externes mais la résistance à la pression de l'équipement devra être plus importante. Réciproquement, une surface d'événement importante minimisera les pressions internes mais conduira à des zones d'effets externes accrues. (Cf. Figure 4).

Les caractéristiques des surfaces d'événements peuvent être évaluées sur la base de corrélations empiriques simplifiées pour les situations les plus simples, ou par des outils de simulation en mécanique des fluides (CFD) dans les cas les plus complexes (mélange réactif particulier, encombrement de la zone). Les données expérimentales montrent que l'accélération de la flamme peut être très importante lorsque la teneur en hydrogène est élevée (applications hydrogène, gaz d'emballage de batteries pour certaines chimies). Par conséquent, il convient de s'assurer d'une réactivité suffisante des événements afin d'assurer une atténuation significative des effets.

Concernant les dispositifs de type TPRD (Cf. Encadré 3), leur efficacité dépend fortement de leur localisation et des caractéristiques de l'incendie (taille et durée). En effet, des essais menés par Efectis ont montré qu'une exposition au feu localisée à distance des TPRD sur un réservoir peut conduire à une dégradation thermique et mécanique de l'enveloppe, notamment lorsque des matériaux composites sont utilisés, avec une activation tardive des dispositifs de sécurité dans le meilleur des cas. Cet incendie peut être par exemple un feu de pneumatiques, un feu de nappe de fuel ou un jet enflammé d'hydrogène issu d'un réservoir adjacent. Dans cette configuration, l'éclatement du réservoir peut intervenir rapidement, avant même que l'incendie ne se propage jusqu'à la TPRD. Outre sa

ENCADRÉ 3

DISPOSITIFS DE CONTRÔLE ET DE PROTECTION DES SYSTÈMES SOUS PRESSION

Sur les appareils sous pression, il est généralement prévu un ou plusieurs dispositifs de sécurité afin d'éviter le scénario de rupture brutale de l'enveloppe en cas de pressurisation excessive :

- **Soupape** : elle vise à réguler et limiter la pression interne d'un équipement suite à une dérive de procédé (par exemple, un emballage thermique dans un réacteur ou une batterie). La soupape s'active à partir d'une consigne de pression et permet d'évacuer de manière contrôlée une partie du contenu pour faire baisser la pression interne. L'activation est mécanique, passive, automatique et réversible. Le dimensionnement des soupapes s'appuie sur les résultats de l'Hazop et des règles de calcul prescriptives maîtrisées par l'industrie.
- **Dépressurisation d'urgence** : elle vise à évacuer le contenu vers une zone sécurisée identifiée et prévue à cet effet (événement ou torche). Ce dispositif peut s'activer, après fermeture des vannes d'alimentation de l'appareil sous pression, manuellement ou automatiquement sur détection. L'activation est irréversible. Les scénarios de dimensionnement sont liés aux dérivés de procédés ou à une agression externe de type incendie. L'activation peut également être préventive, avant que l'agression ne soit effectivement présente.
- **Disque de rupture** : il est généralement complémentaire aux mesures précédentes et permet de réduire brutalement la pression par son ouverture calibrée sur la résistance de l'enveloppe. Ce système est passif.
- **Paroi de décharge ou événement d'explosion** : ce sont des éléments soufflables mis en place sur des ouvrages devant résister à une explosion interne. Ils s'apparentent à des disques de rupture de grandes dimensions.
- **TPRD (Temperature pressure relief device)** : ce dispositif est mis en place sur les réservoirs à haute pression tels que ceux destinés aux applications de mobilité hydrogène. Un fusible thermique déclenche l'ouverture irréversible d'un orifice à une température donnée, permettant de réduire brutalement la pression dans l'enveloppe. Ce dispositif passif est conçu pour les réservoirs exposés à un incendie.



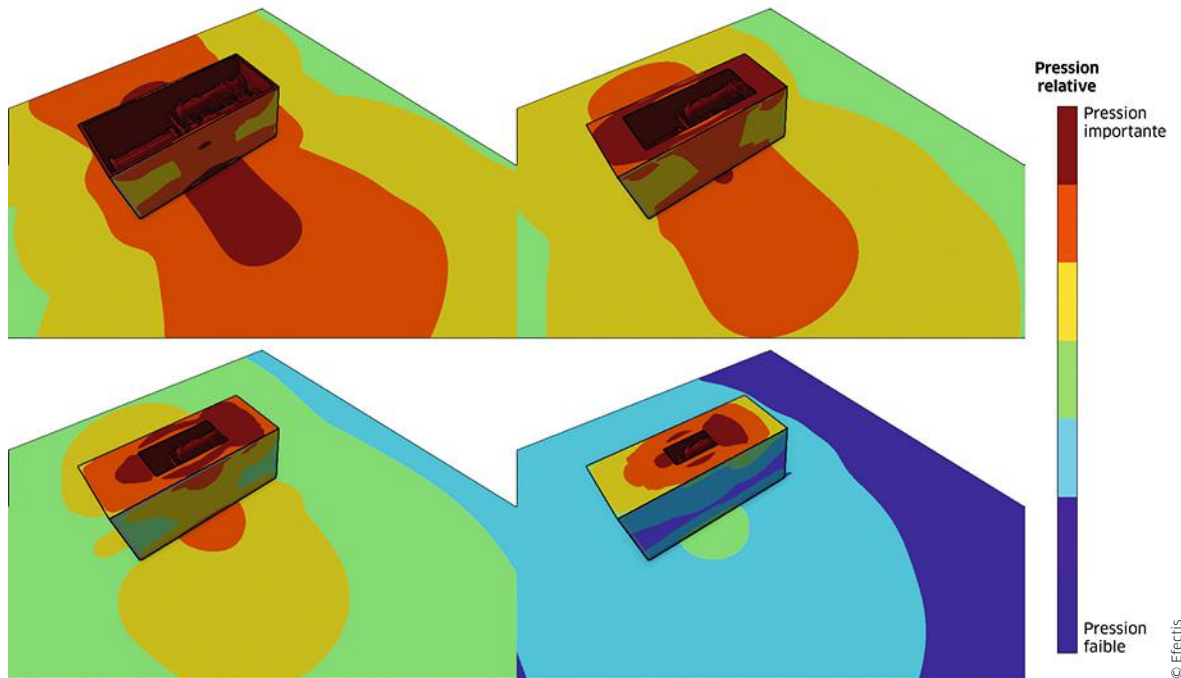


FIGURE 4 → Simulations de l'influence de la surface d'événements sur les zones d'effets de surpression autour d'une solution conteneurisée.

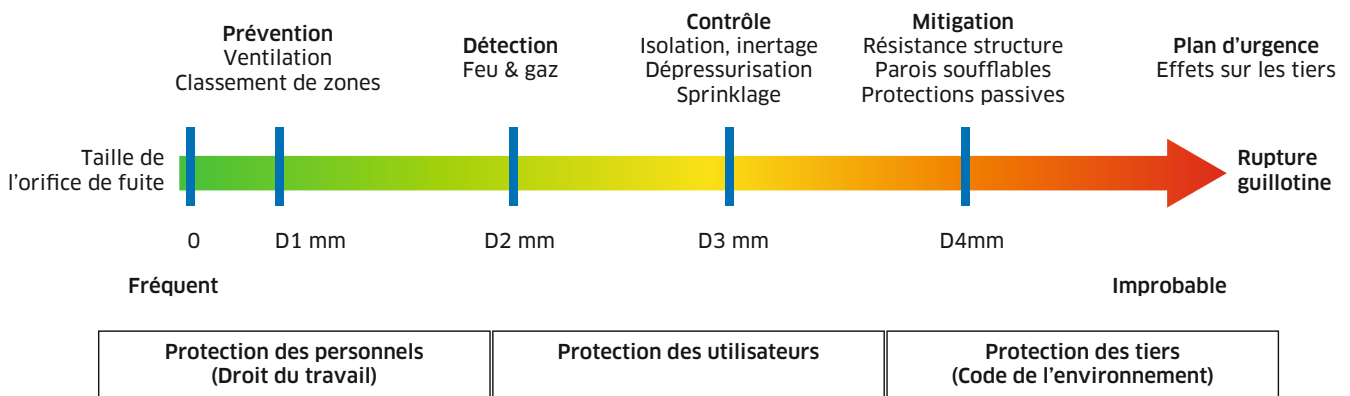
localisation, il convient de considérer l'inertie thermique et l'échauffement progressif de la bille de verre qui obture le dispositif de décharge de pression.

Protection contre les effets

Concernant la protection vis-à-vis des effets d'une explosion, le dimensionnement des ouvrages doit être effectué selon des méthodes adaptées permettant de prendre en compte, d'une part, des chargements (surpression) de forte intensité mais de durée très brève, et d'autre part, la capacité des matériaux au-delà de leur limite élastique (déformations résiduelles après l'événement). Le principe est de s'assurer que les objectifs de sécurité sont satisfaits moyennant des réparations plus ou moins conséquentes.

Concernant la protection vis-à-vis des effets d'un incendie, le dimensionnement des ouvrages s'appuie souvent sur les critères de performance traditionnels tel que le degré de résistance au feu normalisé (REI). Cette approche est néanmoins discutable car les nouvelles technologies (batteries, hydrogène) engendrent potentiellement des incendies et des effets d'une nature différente, avec une intensité accrue et, potentiellement, des projections de particules incandescentes qui peuvent favoriser l'érosion des matériaux de protection. Il n'existe malheureusement pas encore à ce jour d'essais normalisés permettant de justifier de la tenue des matériaux dans ce contexte. Il est donc nécessaire de faire progresser les connaissances sur ces sujets par des essais en vue d'élaborer des recommandations plus pertinentes.

↓ FIGURE 5 Approche progressive de dimensionnement des barrières pour une fuite d'hydrogène.



Intervention d'urgence

De manière générale, la mission des secours est de protéger les personnes et de s'assurer que les conséquences sur les tiers restent limitées. Il convient néanmoins de s'assurer que les secours puissent gérer la situation de manière efficace sans se mettre en danger. De même que précédemment, les connaissances sur les risques induits par ces nouvelles technologies sont en cours d'acquisition et seul le retour d'expérience permettra de définir des stratégies et des procédures d'intervention adaptées à chaque situation.

Dimensionnement des barrières

Caractérisation des scénarios

Un panel de scénarios accidentels, allant du plus fréquent avec des conséquences limitées au moins fréquent avec des conséquences majeures, doit être étudié afin de couvrir l'ensemble des risques jusqu'au seuil d'acceptabilité. Une attention toute particulière doit être portée sur les scénarios « intermédiaires » qui sont souvent dimensionnants, avec une intensité et une durée modérée, mais une fréquence significative en regard de la durée de vie de l'ouvrage.

Adéquation des barrières aux enjeux

Chaque barrière est dimensionnée de manière performantielle pour des scénarios d'une gamme d'intensité et de fréquence donnée. Par exemple pour une fuite, la barrière de prévention va couvrir les petites fuites, la barrière de détection traitera des fuites intermédiaires, etc. (Cf. Figure 5). Cela permet de couvrir l'ensemble des scénarios et d'éviter un dimensionnement inadéquat des barrières.

En regard de ces différentes tailles de fuite, les objectifs de sécurité concernant les personnes peuvent être également structurés, assurant ainsi l'articulation entre les prescriptions du droit du travail et la réglementation ICPE¹ lorsque celle-ci est applicable.

Cohérence des méthodes et des outils pour le dimensionnement

Le choix des méthodes et des outils pour le dimensionnement des barrières doit être adapté aux enjeux et à la phase du projet. Les bonnes pratiques en matière d'ingénierie de sécurité incendie et explosion nécessitent au préalable une bonne compréhension des phénomènes physiques impliqués, afin de pouvoir s'adapter et exploiter les outils appropriés en regard de leur domaine d'applicabilité. De plus, selon la disponibilité et la robustesse des données d'entrée, il est nécessaire d'adapter les choix pour les modélisations en privilégiant les études de sensibilité² qui permettent de mieux évaluer quels paramètres ou données d'entrée sont les plus critiques pour la suite du développement. De manière générale, il est donc recommandé d'avoir une vision d'ensemble de la problématique

en combinant les expertises de chacun, depuis l'analyse des risques jusqu'à la solution technique. Ceci permet d'optimiser le dimensionnement, tout en assurant une cohérence et une démonstration robuste des niveaux de sécurité atteints.

Conclusions et perspectives

L'émergence des nouvelles technologies dans le secteur de l'énergie, que ce soit au niveau de la mobilité ou des applications stationnaires, génèrent de nouveaux risques qu'il convient d'appréhender de manière globale.

Le développement de projets sûrs nécessite la sensibilisation des acteurs au regard :

- des propriétés spécifiques des produits et systèmes ainsi que des dangers potentiels associés ;
- des applications variées (fixe, mobile) et des cultures/réglementations applicables ;
- de l'intégration dans un environnement existant pouvant être complexe (encombrement/confinement) et incertain (agressions) ;
- des enjeux (présence de salariés ou du public à proximité, intégration à l'habitat).

Les approches prescriptives existantes, en termes de règles et normes actuelles, ne sont pas forcément adaptées pour ces nouvelles applications. Une approche structurée de la gestion des risques et des barrières de sécurité est néanmoins nécessaire. Une approche performantielle est particulièrement adaptée pour gérer ces nouveaux risques en s'appuyant sur un dimensionnement adéquat des barrières de sécurité actives et passives qui sont complémentaires, mais il reste essentiel de comprendre les phénomènes physico-chimiques en jeu, notamment leur cinétique et leurs effets, pour pouvoir s'y adapter.

Il est ainsi nécessaire de poursuivre et d'accentuer les travaux de recherche, et notamment de favoriser la réalisation d'essais, afin de disposer d'outils de prédiction (modélisation) pertinents, même si cela reste assez difficile compte tenu de l'évolution permanente des technologies.

Enfin, l'approche performantielle nécessite un suivi pendant toute la durée de vie de l'ouvrage ou de l'équipement et une gestion des modifications en vue, au minimum de maintenir, voire de réduire les niveaux de risque dans le temps. ●

1. Installation classée pour la protection de l'environnement.
2. Étude consistant à faire varier les paramètres d'entrée afin d'évaluer leur influence sur le résultat final dans un outil ou une méthode de calcul.

BIBLIOGRAPHIE

[1] NORME NF EN ISO 13702 – Industries du pétrole et du gaz. Contrôle et atténuation des feux et des explosions dans les installations en mer - Exigences et lignes directrices. Afnor, 2024. Accessible sur : <https://www.boutique.afnor.org/fr> (site payant).

L'INGÉNIERIE DE SÉCURITÉ INCENDIE : UN OUTIL AU SERVICE DE LA PRÉVENTION

Cet article a pour but de présenter les principes de l'ingénierie de sécurité incendie à travers des cas d'application à des lieux de travail. Dans un premier temps, un rappel est fait sur les méthodes et le déroulement d'une étude d'ingénierie ainsi que sur l'apport de la méthode dans le cadre de l'évaluation du risque, notamment professionnel. La seconde partie de l'article présente deux cas concrets permettant d'illustrer l'ingénierie pour des lieux de travail complexes (des établissements de soin et atypiques (un plateau de cinéma avec effets spéciaux pyrotechniques)).

NICOLAS
TREVISAN
CNPP

En France, la réglementation en matière de sécurité incendie repose principalement sur une approche prescriptive. Cela signifie qu'il existe un ensemble de règles et de normes qui définissent de façon détaillée les mesures de sécurité à mettre en œuvre selon le type d'établissement. Ces prescriptions couvrent des domaines comme le compartimentage, l'évacuation, le désenfumage, ou encore la résistance au feu des structures.

Lorsqu'un bâtiment est conçu et exploité en conformité avec ces règles, on considère qu'il satisfait automatiquement aux objectifs de sécurité associés (par exemple, permettre l'évacuation des personnes, faciliter l'intervention des secours ou encore limiter la propagation du sinistre). Il n'est donc pas nécessaire d'apporter une démonstration supplémentaire de performance : le respect strict de la réglementation fait présomption d'un niveau de sécurité suffisant.

L'approche « performantielle » constitue une alternative (ou un complément) à l'approche prescriptive. Cette approche consiste à démontrer que les objectifs de sécurité sont atteints, non pas parce que les prescriptions sont respectées, mais parce que la performance réelle du système (ou de l'organisation) a été évaluée et jugée suffisante. Cette démonstration peut se faire de différentes manières : par des calculs analytiques simples, par des essais ou encore par des simulations numériques.

L'ingénierie de sécurité incendie (notée ISI) constitue l'application de l'approche performantielle au domaine de la sécurité incendie. Bien que l'on puisse parler d'ingénierie de sécurité incendie de façon générale, incluant tout moyen pour démontrer la performance, en pratique on fait souvent référence à des méthodes de simulation numérique. En France,

le recours à l'ISI est encadré réglementairement et seuls certains domaines l'autorisent, les plus courants étant la résistance au feu et le désenfumage. Le recours à l'ISI s'avère pertinent lorsque les particularités d'un bâtiment ne s'inscrivent pas pleinement dans le cadre réglementaire prescriptif, ou lorsque l'application stricte des règles se heurte à des contraintes architecturales, techniques, patrimoniales ou économiques, comme par exemple dans le cas de certains bâtiments industriels, de bâtiments patrimoniaux classés ou de configurations architecturales innovantes ou atypiques. Une ISI peut également être réalisée pour apporter un avis technique lorsque la performance réelle d'une solution suscite un doute, ou encore dans le cadre d'une démarche volontaire visant à analyser, optimiser ou démontrer plus finement le niveau de sécurité incendie d'un établissement.

Quel que soit le domaine concerné, le processus d'une ISI est sensiblement similaire et est présenté dans la norme NF ISO 23932-1 [1]. De manière simplifiée, l'approche est divisée en trois étapes principales :

- dans un premier temps, il est nécessaire de définir le cadre et les limites de l'analyse. Cela consiste, entre autres, à bien identifier les objectifs de sécurité visés et les exigences fonctionnelles associées ainsi qu'à identifier les critères de performances à évaluer ;
- la deuxième partie consiste à définir les scénarios de dimensionnement qui seront utilisés pour évaluer la performance du système. Cette définition passe par une analyse de risques adaptée aux objectifs identifiés précédemment ;
- enfin, la dernière partie consiste à réaliser l'analyse afin de déterminer si les critères de performance sont remplis ou non.

Application de l'ISI au désenfumage

Dans le cas d'une ISI de désenfumage, l'objectif principal consiste généralement à évaluer si le système de désenfumage mis en place dans un établissement est en mesure de maintenir des conditions de « tenabilité » suffisantes pour permettre, en cas de départ de feu, l'évacuation du public et du personnel, mais également pour faciliter l'intervention des services de secours et pour limiter la propagation du sinistre. Pour cela, différents scénarios sont définis. Ils intègrent non seulement les caractéristiques du foyer et de sa propagation éventuelle, mais aussi l'ensemble des éléments liés à la mise en sécurité de l'établissement. Il s'agit notamment de déterminer :

- le moment où le désenfumage est mis en œuvre ;
- le délai de fermeture des portes coupe-feu ;
- comment est réalisée la détection et à quel moment est diffusée l'alarme d'évacuation ;
- la manière dont l'évacuation des occupants est réalisée (cheminement, temps de réaction, organisation du personnel, etc.).

Ces paramètres permettent de construire des scénarios représentatifs et pénalisants à partir desquels la performance réelle du système de désenfumage pourra être évaluée. L'un des principaux avantages de l'ISI est la possibilité de prendre en compte toutes les particularités d'un établissement alors que la réglementation prescriptive reste générique. L'analyse de risque permet de construire ces scénarios, notamment en identifiant les emplacements des charges calorifiques et les sources d'inflammation possibles. L'objectif est d'identifier des scénarios « enveloppes », volontairement majorants. En testant le système dans les conditions les plus sévères, on garantit que les situations moins critiques seront également couvertes. Même si la probabilité d'occurrence de ces scénarios majorants est faible, ils permettent d'éprouver le système dans ses limites. Il convient cependant de ne retenir que des scénarios raisonnablement envisageables

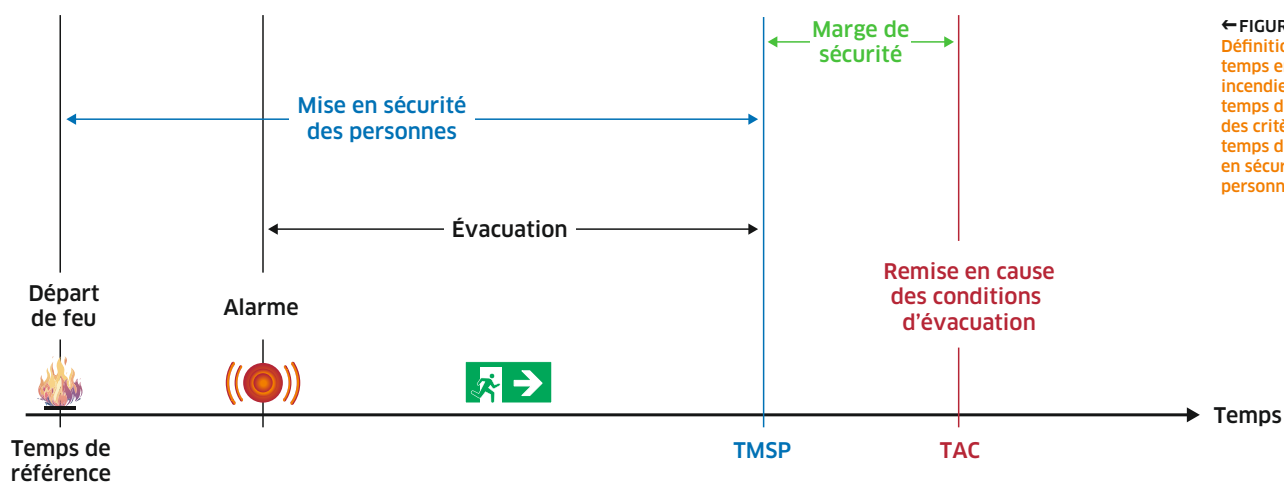
afin d'éviter un surdimensionnement des mesures, voire une impossibilité de définir une solution de mise en sécurité cohérente.

Cette étape de construction des scénarios est réalisée en concertation avec l'ensemble des acteurs du projet. Cette démarche collaborative permet de garantir que le fonctionnement et les spécificités de l'établissement sont bien pris en compte et que les attentes des différentes parties prenantes sont bien intégrées dès les prémices de la démarche. Dans le cadre des études réalisées en établissement recevant du public (ERP), cette étape doit obligatoirement faire l'objet d'une validation par les autorités compétentes afin de s'assurer de la pertinence et de la représentativité des scénarios proposés.

Une fois les scénarios définis et validés, ils sont simulés à l'aide d'un logiciel de mécanique des fluides adapté à la représentation des phénomènes physiques impliqués dans un incendie. Le plus utilisé en France, comme à l'international, est le *Fire Dynamics Simulator* (FDS) [2]. Ce logiciel permet de représenter en 3D le volume concerné et d'y suivre le développement du feu, la propagation des fumées et autres effluents ainsi que les contraintes thermiques qui en résultent.

La méthode d'évaluation de la performance la plus couramment employée consiste à comparer le temps de dégradation des conditions d'évacuation au temps nécessaire à la mise en sécurité des personnes.

La première partie de cette méthode consiste à évaluer à partir de quel instant les conditions deviennent trop dégradées dans les différents locaux pour permettre une évacuation dans de bonnes conditions. Cette évaluation repose sur l'analyse de l'évolution de plusieurs grandeurs clés : la visibilité, la température et le flux thermique radiatif. Des valeurs seuils sont définies pour chacune de ces grandeurs¹. Leur dépassement correspond au temps d'atteinte des critères (noté TAC ; Cf. Figure 1).



← FIGURE 1
Définition des temps en sécurité incendie : temps d'atteinte des critères (TAC), temps de mise en sécurité des personnes (TMS).



La seconde partie consiste à évaluer le temps de mise en sécurité des personnes (noté TMSP). Celui-ci peut être déterminé par des méthodes analytiques ou par des simulations à l'aide de logiciels spécialisés. Il correspond au temps nécessaire pour que l'ensemble de l'effectif présent dans un établissement puisse être mis à l'abri des conséquences d'un incendie. En pratique, il s'agit le plus souvent d'évaluer le temps nécessaire pour évacuer les locaux concernés. En plus du temps nécessaire au cheminement pour atteindre les différentes issues, ce temps inclut également le délai de détection ainsi que le temps de réaction des personnes. Il s'agit d'une valeur théorique du temps minimal nécessaire à l'évacuation de l'établissement, basée sur une succession d'hypothèses pénalisantes. Ce calcul ne prend pas en compte les comportements humains qui pourraient ralentir cette évacuation. Une solution sera jugée performante si le TAC est supérieur au TMSP. Plus cet écart est important, plus la marge de sécurité est élevée et permet, par exemple, de couvrir des aléas liés aux comportements humains.

Exemple d'utilisation de l'ISI de désenfumage dans un établissement de santé

Le premier exemple de recours à l'ISI concerne le désenfumage des circulations d'un hôpital situé en Île-de-France. Les exigences applicables à ce type d'établissement sont décrites dans le règlement de sécurité incendie des ERP, ainsi que dans l'instruction technique n°246 [3]. Ces textes prescrivent notamment les débits d'extraction des fumées que doivent assurer des installations de désenfumage mécanique installées dans les circulations.

L'établissement étudié présentait un déficit de débit d'extraction dans les circulations de huit niveaux. Face à ce constat, les autorités compétentes demandaient soit une mise en conformité de l'installation de désenfumage, soit la démonstration de la performance de l'installation au moyen d'une ISI. Compte tenu de la complexité technique et économique qu'impliquait une mise en conformité (présence d'amiante, travaux en site occupé), une ISI a été réalisée. L'objectif de l'étude était double :

- comparer la performance de l'installation existante avec une solution réglementaire (approche relative) ;
- vérifier la compatibilité avec la mise en sécurité des patients et du personnel (approche absolue). Cette seconde approche nécessite de prendre en compte les spécificités liées à l'exploitation de ce type d'établissement. En effet, le public présent ne peut, dans une grande majorité, pas évacuer par lui-même. Les règles de mise en sécurité sont donc différentes d'autres types d'ERP, puisqu'elles reposent sur un transfert horizontal des personnes vers d'autres locaux du même niveau.

Ce transfert étant réalisé par le personnel, il est nécessaire d'inclure leur action dans l'analyse et d'évaluer si celle-ci peut être réalisée en sécurité en cas d'incendie.

En suivant la méthodologie générale des études ISI, une analyse préliminaire a été réalisée afin de bien comprendre le contexte, d'identifier les locaux les plus critiques et de recueillir toutes les données nécessaires à l'étude. Cette première étape a permis de poser toutes les hypothèses utiles à la définition des scénarios incendie.

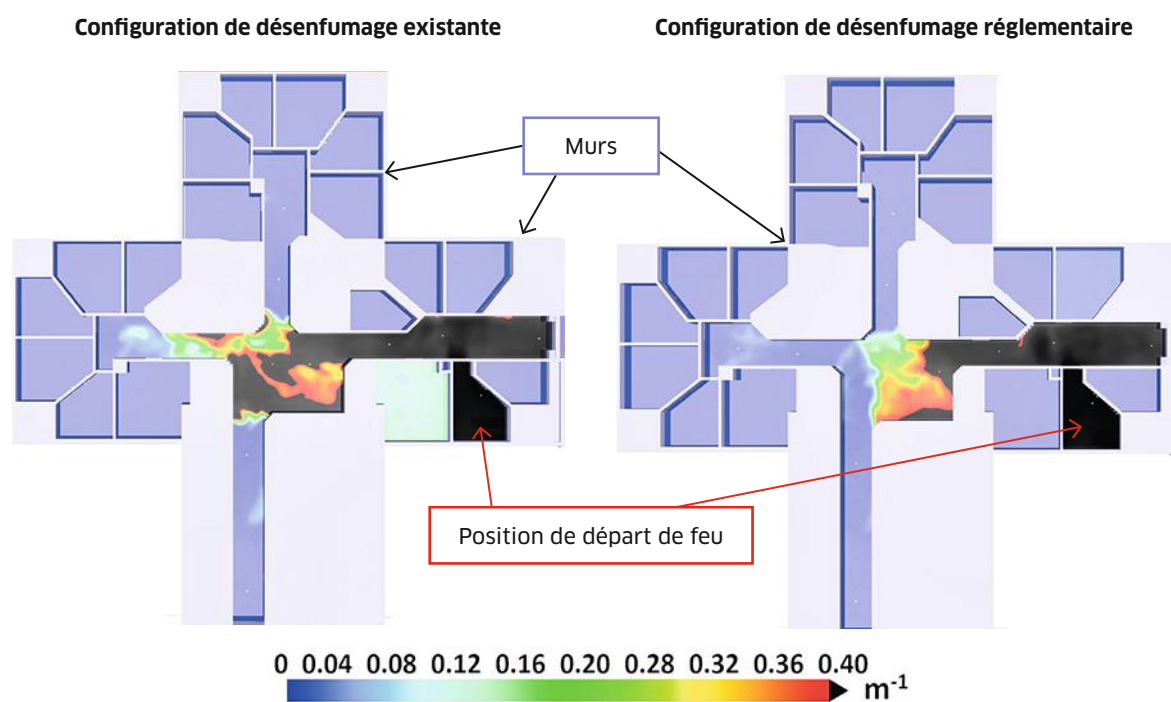
Après avoir bien définis les objectifs, le périmètre et les limites de l'étude, l'analyse de risque réalisée a permis d'identifier les différents scénarios pertinents à simuler afin d'évaluer la performance de l'installation. Ces scénarios étaient :

- un départ de feu dans une chambre avec porte ouverte sur la circulation. Cette configuration est représentative du fonctionnement courant de l'établissement et est considérée comme le scénario le plus réaliste, notamment en considérant l'historique des sinistres récents sur des établissements similaires ;
- un départ de feu dans un local à risque dont la porte est restée ouverte. Ce scénario majorant sert à évaluer la capacité du système à traiter la production d'un grand volume de fumée et de chaleur. Il représente une situation dégradée du fonctionnement de l'établissement, les portes de ce type de local devant normalement rester fermées (présence de ferme-portes). Ce scénario est raisonnablement envisageable car il est souvent constaté des portes maintenues ouvertes en situation réelle d'exploitation ;
- un départ de feu dans une circulation. Ce scénario sert à traiter un cas de figure où un départ de feu de faible puissance (poubelle, chariot...) se produirait et où les fumées se propageraient directement dans la circulation.

Conformément à la démarche administrative prévue pour la réalisation d'études ISI en ERP, les scénarios ont été soumis aux autorités compétentes pour validation avant de pouvoir être mis en œuvre.

Pour chaque scénario, deux simulations ont été réalisées. La première considérait les caractéristiques du système de désenfumage en place. La seconde prenait en compte des débits d'extraction de fumées conformes à la réglementation applicable.

Les résultats obtenus ont montré que, quel que soit le scénario considéré, les conditions d'évacuation se dégradent très rapidement dans les circulations (Cf. Figure 2). Cette dégradation se traduisait par une perte de visibilité liée à la présence de fumées ainsi qu'une augmentation de la température au-delà d'un critère seuil défini à 40°C. Cette dégradation rapide n'était pas compatible avec les



↑ FIGURE 2 Comparaison des conditions de visibilité à 2 m du sol dans deux configurations de désenfumage, cinq minutes après un départ de feu dans une chambre. Les zones noires correspondent à une visibilité réduite (coefficient d'extinction COE < 0,4 m⁻¹).

délais nécessaires pour que le personnel réalise la mise en sécurité des patients, les exposant ainsi tous à un risque important.

Les résultats ont également montré qu'une mise en conformité de l'installation pouvait améliorer légèrement les performances, sans pour autant permettre d'atteindre un niveau compatible avec le transfert horizontal des patients. Il a ainsi été démontré que l'amélioration du niveau de sécurité nécessaire ne pouvait reposer uniquement sur la mise en conformité du système de désenfumage. Des simulations complémentaires ont donc été réalisées afin d'évaluer d'autres solutions visant à améliorer les résultats.

Sur la base des conclusions de l'étude, l'établissement a finalement opté pour la création de recouvrements supplémentaires dans les circulations, permettant d'empêcher la propagation rapide des fumées dans tout le niveau. Il a également été acté de mettre en place des ferme-portes débrayables au niveau des chambres, offrant à la fois la souplesse nécessaire au travail du personnel de santé et le respect de l'intimité des patients, tout en garantissant une mise en sécurité efficace en cas de sinistre. La stratégie de mise en sécurité a été également adaptée en favorisant, lorsque cela est nécessaire et adapté, le confinement des patients dans les chambres au lieu de systématiser leur transfert horizontal.

Enfin, les résultats de simulation et notamment les

animations de propagation des fumées ont également servi à des actions de formation et de sensibilisation du personnel au risque incendie dans l'établissement.

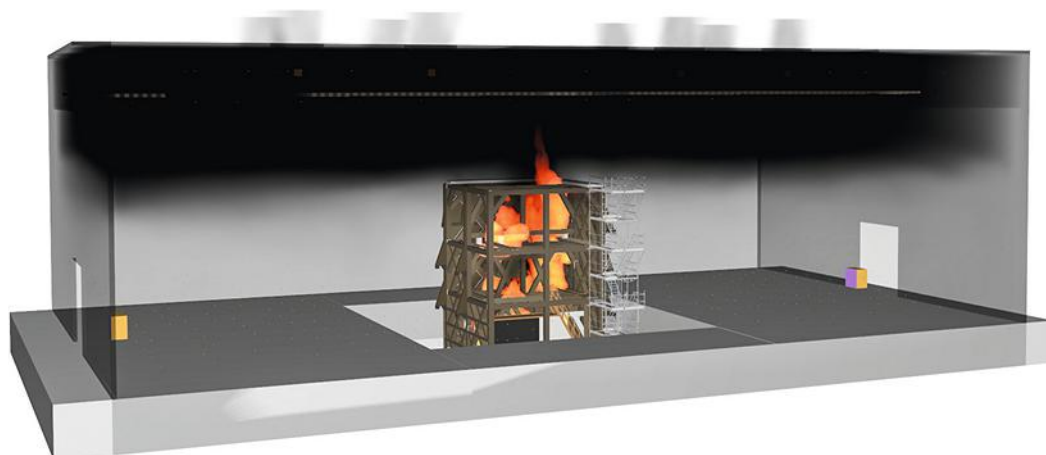
Exemple d'utilisation de l'ISI de désenfumage dans un lieu de travail atypique

Le second exemple concerne un cas particulier de recours à l'ISI où le bâtiment ne présente pas de non-conformité par rapport à la réglementation, mais où une activité exceptionnelle est susceptible de présenter un risque pour le personnel.

Lors du tournage du film « Notre-Dame brûle », Jean-Jacques Annaud a souhaité limiter au maximum le recours aux effets spéciaux numériques pour les scènes incluant du feu. Il a donc eu recours à des effets pyrotechniques lors du tournage de certaines scènes. L'une de ces scènes concerne la progression des pompiers de la Brigade des sapeurs-pompiers de Paris dans le beffroi en flammes. Pour cela, une partie du beffroi a été reconstituée à l'échelle 1:1 dans un studio de la Cité du cinéma. Cette réplique, de 13 m de haut avec une base carrée de 9 m de côté, était équipée de 120 m de rampes de gaz permettant de générer des séquences de flammes au gré des besoins. L'utilisation simultanée de la totalité des rampes était en mesure de générer un foyer de plus de 40 MW, soit l'équivalent d'un feu de poids lourd.

Une étude ISI a été réalisée (Cf. Figure 3) afin de





© CNPP

↑ FIGURE 3 Vue 3D d'un résultat de simulation. Visualisation du volume de flamme formé par les rampes de gaz ainsi que de la stratification et de l'évacuation des fumées dans le studio.

vérifier que ces mises à feu ne présentaient pas de risques pour le personnel présent sur le plateau pendant les scènes (techniciens, cadres, machinistes, acteurs, etc.) ainsi que pour les équipements et structures du bâtiment.

Les mesures destinées à assurer la sécurité incendie sont souvent perçues comme des contraintes pesant sur l'exploitation d'un établissement. Dans le cadre d'un tournage de cinéma, elles peuvent notamment se traduire par une réduction du nombre de prises réalisables chaque jour, entraînant une augmentation de la durée du tournage et une hausse significative des coûts de production. L'un des objectifs de l'étude consistait donc à définir une chronologie optimisée des cycles de mise à feu et des périodes de refroidissement, afin de garantir la sécurité des personnes et des biens, aussi bien durant les scènes qu'entre celles-ci, tout au long de la journée de tournage.

Les résultats ont montré qu'une phase de brûlage de cinq minutes, suivie d'une pause de 10 minutes, suffisaient à garantir la sécurité des personnes et des équipements durant les scènes, tout en assurant le renouvellement de l'air (notamment pour limiter l'exposition des salariés au CO et CO₂) et le refroidissement des éléments de structure entre deux prises. Cette chronologie se révélait par ailleurs compatible avec les exigences et les rythmes de production. Il a également été préconisé de réaliser une pause plus longue au cours de la journée afin de permettre aux éléments de structure les plus massifs de refroidir suffisamment, certains pouvant atteindre près de 200 °C au cœur après plusieurs heures de tournage. Enfin, l'analyse des contraintes thermiques au niveau des équipements situés en partie haute du volume a permis de mettre en évidence un risque de dégradation et de préconiser l'ajout de protections thermiques (plaques de plâtre ou couvertures) afin de les protéger.

L'étude ISI a ainsi permis de définir une organisation de tournage à la fois sécurisée et compatible avec les impératifs de production.

Conclusion

L'ingénierie de sécurité incendie constitue une approche performancielle complémentaire à une réglementation prescriptive, notamment lorsque les situations sont complexes ou atypiques. En s'appuyant sur des simulations numériques de scénarios incendie représentatifs, elle permet d'évaluer de manière objective la performance réelle des mesures de prévention mises en œuvre et d'adapter les solutions aux risques et aux contraintes spécifiques des établissements. ●

1. Les critères utilisés pour quantifier la performance sont généralement tirés du « Guide de bonnes pratiques pour les études d'ingénierie du désenfumage » [4]. D'autres critères peuvent être utilisés, en fonction des objectifs de l'étude.

BIBLIOGRAPHIE

[1] NORME NF ISO 23932-1 – Ingénierie de la sécurité incendie - Principes généraux. Partie 1 - Généralités. Afnor, 2019. Accessible sur : <https://www.boutique.afnor.org/fr> (site payant).

[2] FDS-SMV – Fire dynamics simulator. Accessible sur : <https://pages.nist.gov/fds-smv/> (consulté en nov. 2025).

[3] INSTRUCTION TECHNIQUE MINISTÉRIELLE N° 246, relative au désenfumage des établissements recevant du public (ERP) du 25 juin 1980. Accessible sur : <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000000436811> (Cf. Annexe III de l'arrêté du 22 mars 2004).

[4] LABORATOIRE CENTRAL DE LA PRÉFECTURE DE POLICE – Guide de bonnes pratiques pour les études d'ingénierie du désenfumage. 2017. Accessible sur : <https://www.prefecturedepolice.interieur.gouv.fr>