

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

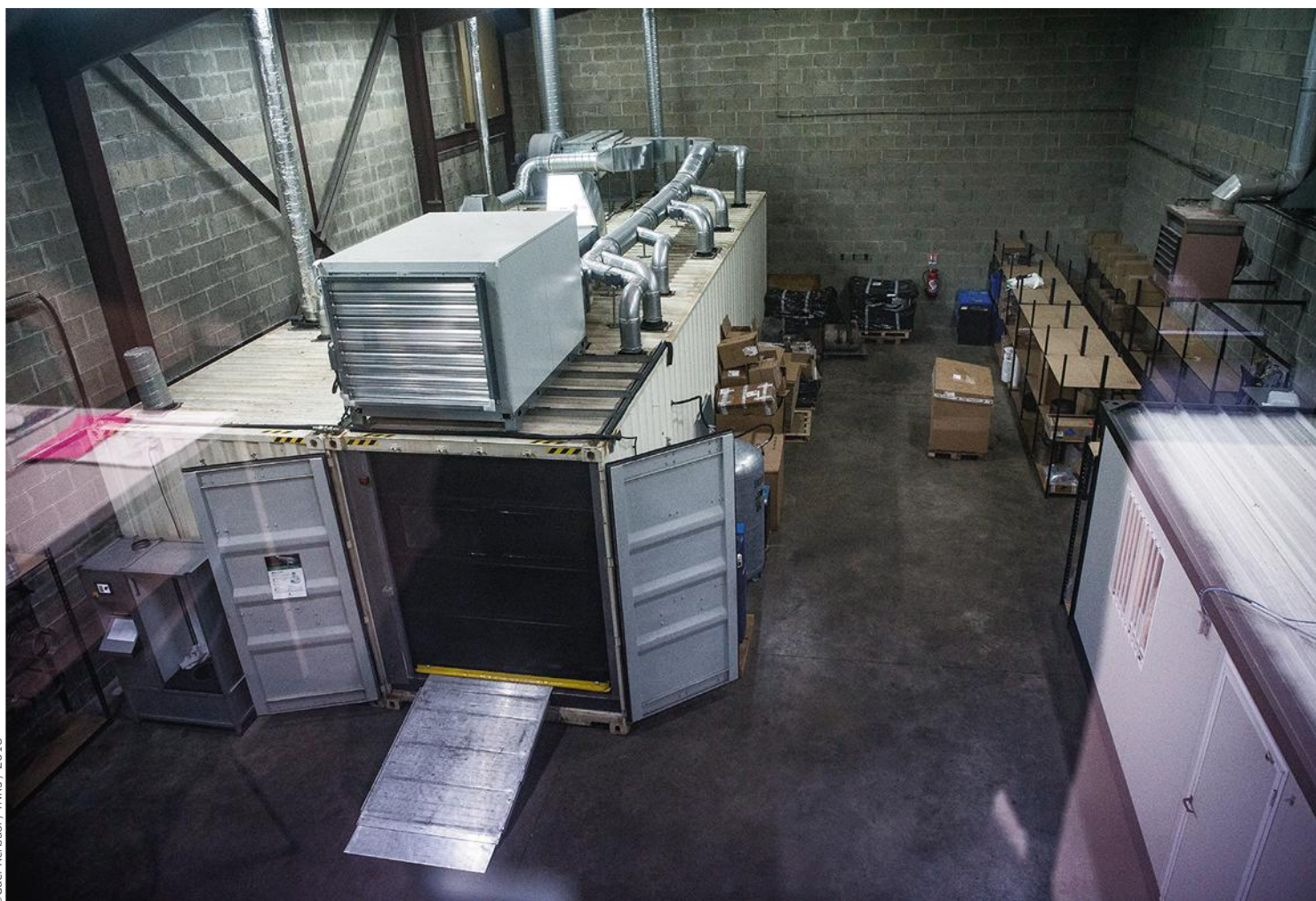
Les installations de production et de stockage d'énergie sous forme de conteneurs peuvent présenter un risque d'incendie ou d'explosion, comme l'illustrent plusieurs exemples récents.

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

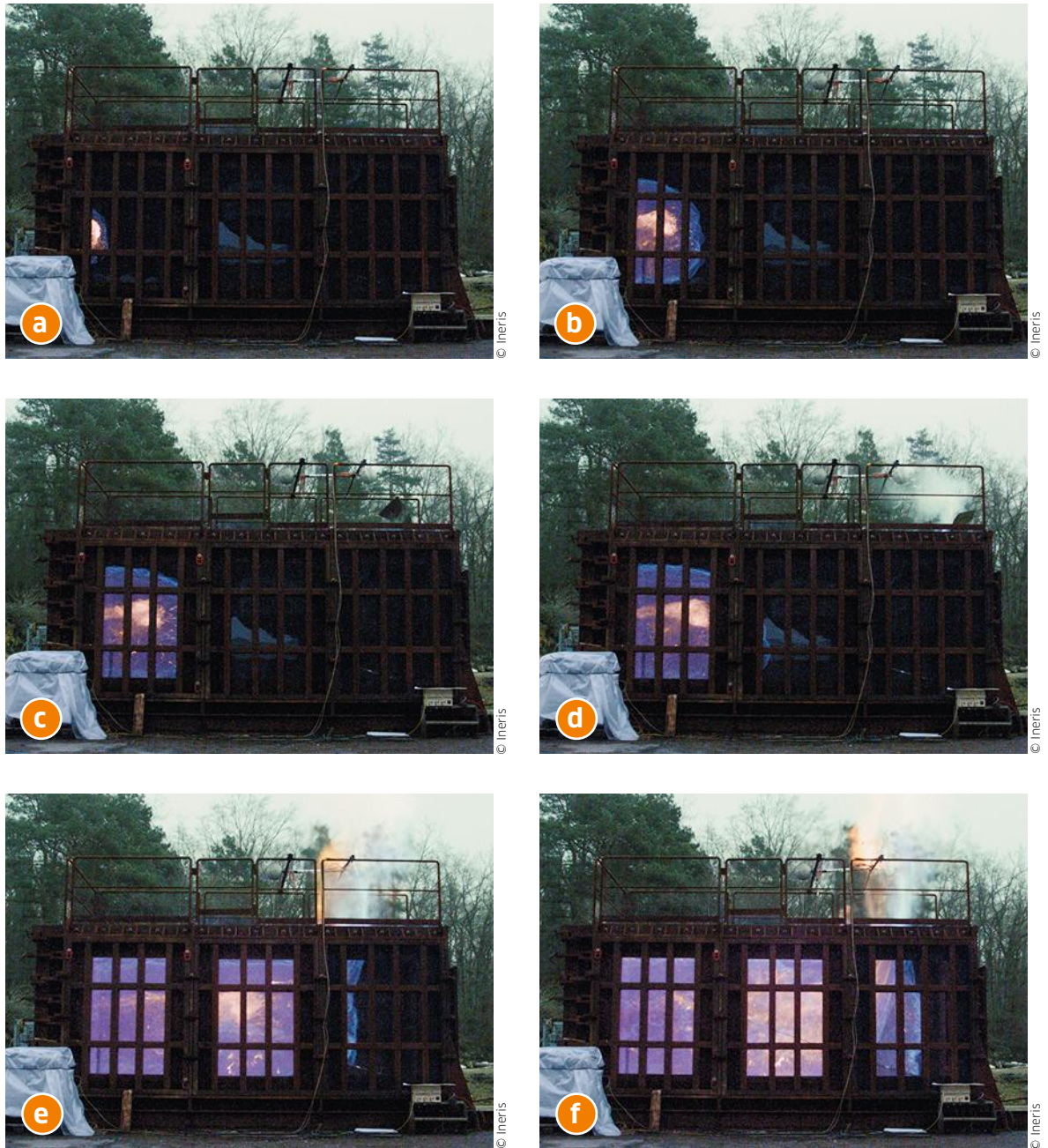
Le conteneur accueillant des systèmes énergétiques constitue un milieu confiné et, selon son encombrement intérieur, le volume libre disponible peut être faible. Il est donc essentiel de comprendre comment une atmosphère explosive peut se former dans ces configurations particulières.

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

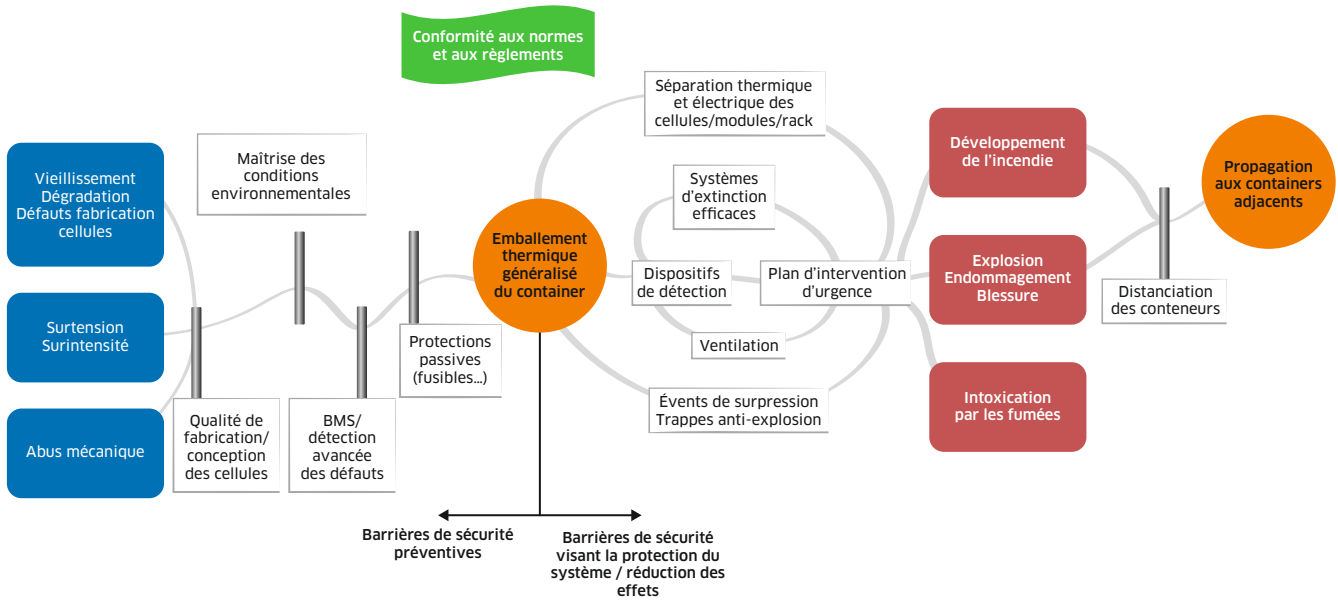
L'étude de sécurité du conteneur, en s'appuyant sur des expérimentations et des modélisations, doit permettre d'adapter sa configuration interne afin de limiter les conséquences d'un événement. Les systèmes électrochimiques de stockage d'énergie et les installations hydrogène sont suffisamment étanches 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 emballage 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 emballage 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>