



(ID Modèle = 454913)

Ineris - 207085 - 2773674 - v1.0

06/07/2023

Moyens de maîtrise des risques des batteries pour les applications conteneurisées

PRÉAMBULE

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

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

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

Au vu de ses missions qui lui incombent, l'Ineris, n'est pas décideur. Les avis, recommandations, préconisations ou équivalents qui seraient proposés par l'Ineris dans le cadre des missions qui lui sont confiées, ont uniquement pour objectif de conseiller le décideur dans sa prise de décision. Par conséquent, la responsabilité de l'Ineris ne peut pas se substituer à celle du décideur qui est donc notamment seul responsable des interprétations qu'il pourrait réaliser sur la base de ce document. Tout destinataire du document utilisera les résultats qui y sont inclus intégralement ou sinon de manière objective. L'utilisation du document sous forme d'extraits ou de notes de synthèse s'effectuera également sous la seule et entière responsabilité de ce destinataire. Il en est de même pour toute autre modification qui y serait apportée. L'Ineris dégage également toute responsabilité pour chaque utilisation du document en dehors de l'objet de la mission.

Nom de la Direction en charge du rapport : DIRECTION INCENDIE DISPERSION EXPLOSION

Rédaction : LECOCQ Amandine

Vérification : JOUBERT LAURIS

Approbation : Document approuvé le 06/07/2023 par BOUET REMY

Table des matières

1. Introduction	4
2. Description succincte des systèmes de batteries stationnaires Li-ion conteneurisés et risques associés	5
2.1. Description des batteries Li-ion conteneurisées.....	5
2.2. Typologie de risques associés aux systèmes batteries Li-ion conteneurisés.....	8
3. Barrières de sécurité dans les systèmes conteneurisés Li-ion.....	10
3.1. Barrières de sécurité préventives.....	10
3.1.1. Qualité de fabrication et de conception des cellules.....	10
3.1.2. Maîtrise des conditions environnementales	11
3.1.3. Battery management system et capacité d'arrêt du système.....	12
3.1.4. Protection passive des circuits	14
3.1.5. Processus de certification des systèmes de stockage et conformité aux normes.....	15
3.2. Barrières de sécurité visant la protection du système	16
3.2.1. Dispositifs de détection	16
3.3. Dispositifs d'extinction des systèmes conteneurisés Li-ion	18
3.3.1. Systèmes gazeux.....	18
3.3.2. Aérosols solides.....	19
3.3.3. Systèmes à base d'eau.....	19
3.3.4. Couplage système extinction gaz/aérosol et extinction à eau.....	22
3.4. Dispositifs de protection contre l'explosion	22
3.4.1. Ventilation en cas d'emballement thermique.....	22
3.4.2. Event de surpression et trappes anti-explosion.....	23
3.5. Règles de conception/installation visant la limitation de la propagation d'un évènement accidentel	24
3.6. Plan d'intervention d'urgence et intervention	26
4. Conclusion	28

1. Introduction

L'analyse des accidents impliquant des batteries Li-ion stationnaires a montré les limites de certains dispositifs de maîtrise des risques intégrés dans des containers de stockage batterie (ex : non-déclenchement du dispositif d'extinction, absence d'évent, etc.).

Dans ce contexte, le présent rapport a pour objectif de :

- réaliser un recensement des principaux dispositifs généralement déployés dans les containers batteries Li-ion visant une maîtrise des risques d'incendie et d'explosion et, le cas échéant, l'analyse de leur comportement pour quelques cas d'accidents,
- réaliser une synthèse des éléments disponibles sur la performance de ces dispositifs en s'appuyant sur l'analyse détaillée de l'accidentologie, des données disponibles dans la littérature et sur les collaborations de l'Ineris avec des partenaires externes, en particulier l'Université de Newcastle, les membres du comité de normalisation du TC120 et la fondation recherche de la NFPA qui a initié fin 2021 une étude sur la sécurité et les mesures de maîtrise des risques des batteries stationnaires.

2. Description succincte des systèmes de batteries stationnaires Li-ion conteneurisés et risques associés

2.1. Description des batteries Li-ion conteneurisées

Ces dernières années, la technologie Li-ion et ses variantes déclinées selon la chimie des matériaux actifs d'électrodes est de plus en plus utilisée comme système de stockage d'énergie électrochimique en raison notamment de sa densité d'énergie élevée et de son haut rendement.

En 2018, les proportions des batteries Li-ion par rapport aux autres technologies de batteries pour les applications stationnaires dans le monde étaient les suivantes¹ :

- Installations en opération : acide plomb 4% ; **Li-ion 78%**, NaS 11%, Ni/Cd ou NIMH 2%, flow battery 2%, batterie à base de Zinc 2% ;
- Installations en projet : acide plomb 1%, **Li-ion 74%** ; flow battery 11%, NaS < 1%, Metal-air < 1% (auquel il faut ajouter 11% des installations dont la technologie n'est pas spécifiée).

De nombreux modèles et tailles de systèmes de stockage Li-ion existent et sont déployés pour une large gamme d'applications. A l'échelle résidentielle, les systèmes sont généralement constitués de batteries de type énergie de quelques kWh à 100 kWh associées à des systèmes photovoltaïques alors que les systèmes destinés aux services publics et aux applications commerciales sont généralement des unités de batteries conteneurisées de plusieurs MWh destinées à fournir des services auxiliaires au réseau.

Cette étude porte sur les systèmes Li-ion conteneurisés à l'échelle du MWh et ne couvre pas les systèmes à l'échelle résidentielle ou optant pour des architectures modulables type « casing ». Il convient de noter qu'il existe également des systèmes conteneurisés « hybrides » composés de batteries Li-ion et de supercondensateurs intégrés au sein d'un même container.

Les différents composants des systèmes de stockage d'énergie en container sont généralement similaires. Toutefois, la conception/l'architecture varie considérablement avec notamment des évolutions récentes d'agencement constatées.

Le nombre de cellules Li-ion peut varier de plusieurs milliers à plusieurs dizaines de milliers dans un container. Les fabricants utilisent des tailles et des formats de cellules différents, ce qui modifie la conception des systèmes. Il existe 3 formats de cellules Li-ion : cylindrique, prismatique et Pouch (Figure 1). Chacun de ces formats est disponible en différentes tailles corrélées à des différences en termes de masse, densité d'énergie, etc. La tendance actuelle est d'aller vers des cellules de grosse taille (en particulier de format prismatique).

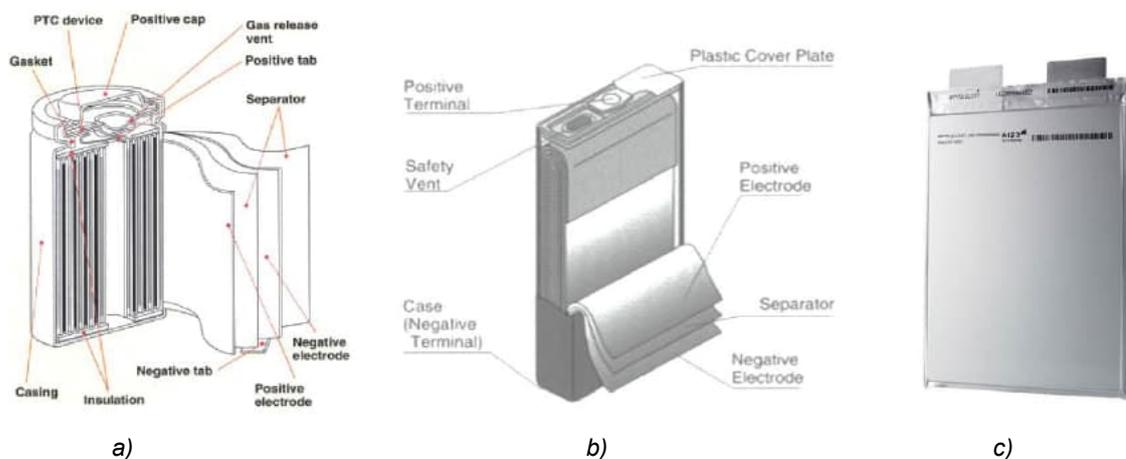


Figure 1 : cellule Li-ion de différents formats : cylindrique a), prismatique b), et Pouch c)²

Chacune de ces cellules, quel que soit le format, est constituée :

- d'une électrode positive appelée cathode. La matière active de la cathode est très variée même si la grande majorité des batteries est à base d'oxydes de métaux de transition lithiés LiNiMnCoO_2 (NMC : dans cette variante de technologie Li-ion, la densité d'énergie obtenue est d'autant plus élevée que la cathode est riche en NiO₂) ou de LiFePO_4 (Lithium Fer Phosphate ou LFP). On pourra également citer les variantes LiMn_2O_4 (LMO), LiCoO_2 (LCO) et $\text{LiNi}_{0,8}\text{Co}_{0,15}\text{Al}_{0,05}\text{O}_2$ (NCA) – on parle de différentes « chimies » de batteries Li-ion ;
- d'une électrode négative appelée anode. La matière active de l'anode est généralement du graphite, un mélange de graphite et de silicium/oxydes de silicium ou plus rarement en titanate de lithium ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ ou LTO) ;
- d'un séparateur, généralement un polymère assurant la séparation électrique (galvanique) des électrodes ;
- d'un électrolyte, classiquement un liquide à base de carbonates organiques (EC, DEC, DMC¹...) dans lesquels est dissous un sel de lithium (le plus souvent LiPF_6).

Plusieurs cellules sont connectées en série et en parallèle pour constituer un module de batteries (Figure 2 a) répondant aux caractéristiques fonctionnelles (tension, courant) désirées. Chaque module comporte une carte électronique destinée au suivi des caractéristiques de tension des cellules et de température du module que l'on peut appeler BMS (Battery management system) esclave (voir § 3.1.3).

Plusieurs modules (entre 15 et 20 généralement) sont ensuite interconnectés électriquement pour former un rack dans une armoire fermée en acier/aluminium (Figure 2b) ou ouverte. Au sein de chaque rack, un emplacement est réservé pour des protections électriques (fusibles, contacteurs, ...) et à un dispositif de type BMS que l'on peut appeler BMS maître. Les racks peuvent être ouverts ou fermés par une porte ou grillage.



a) module Li-ion pour système stationnaire



b) rack Li-ion pour système stationnaire

Figure 2 : module 1) et rack 2) d'un système stationnaire Li-ion (fabriquant LG Chem)

Un ensemble de racks sont alignés le long de chaque côté du container pour former un système de stockage d'énergie par batterie à grande échelle et obtenir la puissance/énergie désirée. Les modèles commercialisés jusqu'à présent disposaient d'un couloir central avec une porte sur la plus petite face du container (Figure 3a). Cette configuration permet à une personne de rentrer dans le container.

¹ EC = éthylène carbonate, DEC : diéthyle carbonate, DMC : diméthyle carbonate

Les évolutions récentes font apparaître un agencement sans couloir central avec des ouvertures sur les plus grandes faces du container (Figure 3b). Cette configuration ne permet plus à une personne de rentrer dans le container, l'ouverture des portes permet d'accéder directement aux batteries et composants.

Le container comprend également un système de gestion global des batteries (Master BMS ou superviseur), un dispositif de maintien des batteries dans des conditions de température et d'hygrométrie définies, un ou des dispositifs de détection/extinction.

Au sein de ce container (ou dans un container à part), il y aura un convertisseur (souvent dénommé PCS pour power conversion system) pour convertir l'énergie du courant continu en courant alternatif et vice versa, afin de permettre l'utilisation de l'énergie stockée sur le réseau électrique.

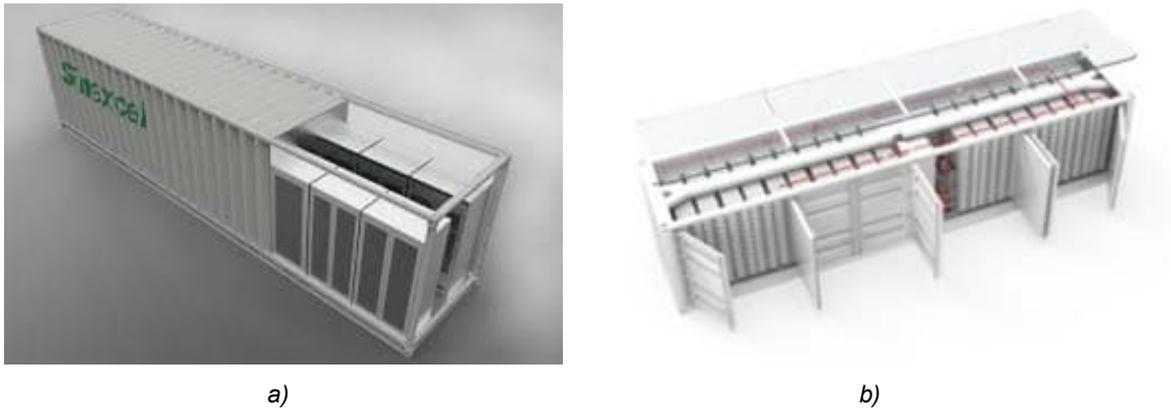


Figure 3 : système conteneurisé typique Li-ion a) avec alignement des racks le long de chaque côté du container avec couloir central b) avec ouvertures latérales sans couloir central

Les containers sont ensuite juxtaposés au sein d'un parc batteries dans des configurations variées à des distances plus ou moins importantes, permettant le développement sur un seul site de systèmes de stockage d'énergie électrique de plusieurs centaines de MW. 2 exemples sont illustrés en Figure 4.



1)



2)

Figure 4 : 2 configurations de parc containers batteries Li-ion 1) AES 30 MW (120 MWh) San Diego 2) Neoen Victorian Big Battery Australie Geelong – 300 MW/450 MWh

2.2. Typologie de risques associés aux systèmes batteries Li-ion conteneurisés

Lorsque les batteries Li-ion sont utilisées en dehors de leur plage de fonctionnement en température, tension, courant ou soumises à des conditions environnementales inadaptées (taux d'humidité élevé, poussières, ventilation insuffisante, etc.), elles peuvent déclencher un emballement thermique. Ce phénomène peut également être causé par des défauts de fabrication à l'échelle cellule (contamination par des particules métalliques, présence de défauts au niveau des électrodes ou du séparateur, ...) ou à l'échelle module/rack/système (défaut de serrage, fusible insuffisant ou mal dimensionné, défaut d'isolation, défaillance BMS, etc.). Le phénomène d'emballement thermique se caractérise par des réactions de décompositions exothermiques successives pouvant se traduire par une fuite d'électrolyte liquide, l'émission de fumées, un feu ou une explosion (Figure 5). Au sein d'un système stationnaire, la défaillance peut provenir d'une seule cellule et l'emballement thermique peut se propager à l'ensemble d'un module, rack, container, voire aux containers voisins.

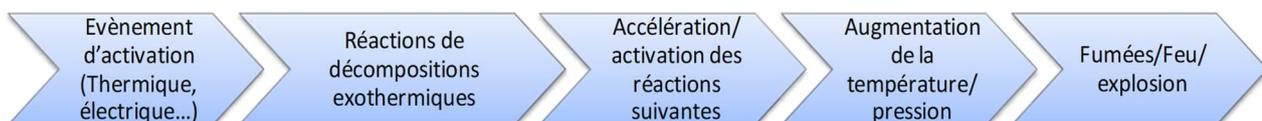


Figure 5: les différentes étapes d'un emballement thermique d'une batterie Li-ion³

La liste des principaux phénomènes dangereux possibles à prendre en compte pour l'étude du risque accidentel dans un container de batterie Li-ion sont :

- **L'incendie** consécutif à l'inflammation des gaz émis lors d'un emballement thermique : il s'agit à priori de la majorité des incidents recensés (50 cas sur 56 incidents recensés) ;
- **L'explosion** consécutive à l'accumulation de gaz émis lors d'un emballement thermique : formation potentielle d'une atmosphère explosive (ATEX) associée à un risque d'explosion et **de projections de débris**. Les gaz inflammables émis sont principalement le dihydrogène, les carbonates organiques utilisés comme solvants de l'électrolyte, le monoxyde de carbone et des hydrocarbures légers (méthane, éthylène...). Les sources d'inflammation potentielles sont des surfaces chaudes, des étincelles éjectées lors d'un emballement thermique, des arcs électriques, des équipements alimentés électriquement présents dans le container... 1 cas d'explosion non suivie d'un incendie a été recensé (Surprise Arizona – 2019), 4 cas d'explosion suivi d'un incendie (Drogenbos-2017, Liverpool-2020, Perles et Castelet-2020, Beijing – 2021), 1 cas de dégagement de fumées sans inflammation ni explosion (Moss Landing – 2021).

L'éclatement d'un container n'a pas été observé à ce jour dans l'accidentologie, la présence de points faibles (en particulier la porte du container) a jusqu'à présent empêché l'éclatement d'un container.

Lorsqu'une cellule unique subit un emballement thermique, cette cellule peut provoquer un emballement thermique dans les cellules adjacentes par l'un des mécanismes de transfert de chaleur suivants : 1) contact direct entre les cellules ou entre les cellules et leur bus bar communs (conduction), 2) impact des gaz chauds (convection) et/ou 3) impact des flammes (rayonnement). On parle de propagation de l'emballement thermique. Plusieurs cellules ou modules libérant des effluents gazeux volatils augmentent alors le volume total des effluents gazeux et peuvent conduire à un scénario dans lequel une explosion à grande échelle pourrait se produire. L'accidentologie montre que moins d'un rack de batteries a généré suffisamment de gaz pour atteindre les concentrations d'effluents gazeux nécessaires aux conditions d'explosion. Le volume de gaz émis avant une inflammation éventuelle est variable selon les sources, l'une d'elle indique un volume de gaz compris entre 0,3 L/Wh et 6 L/Wh⁴.

Les conséquences de l'emballement thermique des batteries Li-ion en systèmes conteneurisés dépendent de nombreux paramètres, et en particulier :

- **la chimie des cellules Li-ion** : la chimie LiFePO₄ est davantage sujette à l'émission de gaz sans inflammation spontanée, avec un risque de formation d'ATEX et donc d'explosion plus élevé que d'autres chimies plus réactives tels que le NMC. Toutefois, l'analyse de l'accidentologie indique quelques cas d'incendie sur des systèmes Li-ion LFP et d'explosion sur du NMC ;
- **l'état de charge** du système au moment de l'incident. En effet, en plus de l'énergie libérable par combustion ou décomposition des substances qu'elle contient, la batterie peut contenir une grande quantité d'énergie stockée sous forme électrochimique, susceptible de se libérer rapidement, participant ainsi au profil de risque. Il est par exemple connu que, plus l'état de charge de la batterie est élevé, plus sa susceptibilité à réagir et les effets produits seront importants ;
- **l'architecture** de la cellule/module/rack/système (y compris le couplage électrique des cellules en série/parallèle) affecte grandement le niveau de sécurité associé à la batterie. La robustesse du casing des modules, l'étanchéité du système, la présence d'évent au niveau des cellules, etc. sont des paramètres importants vis-à-vis de la propagation d'un emballement thermique ;
- **l'énergie totale** stockée dans le container : plus l'énergie stockée est importante, plus les effets en cas d'incendie/explosion seront potentiellement importants,
- **l'agencement** du système de stockage batteries, du convertisseur AC/DC et du transformateur. Si le transformateur se trouve au sein du container batterie ou est juxtaposé au container batterie, le risque de propagation d'un incendie d'une installation à une autre est plus important,
- **les barrières de sécurité** mises en œuvre en termes de détection, protection incendie et explosion sont également cruciaux pour limiter les effets. Les paragraphes ci-après détaillent ces barrières de sécurité.

3. Barrières de sécurité dans les systèmes conteneurisés Li-ion

Les étapes de la défaillance d'une batterie stationnaire et les mesures de maîtrise des risques associés sont résumées dans la Figure 6.

Ces différentes barrières sont détaillées dans les paragraphes ci-après en séparant les barrières de sécurité préventives et les barrières de sécurité visant la protection du système et la réduction des effets.

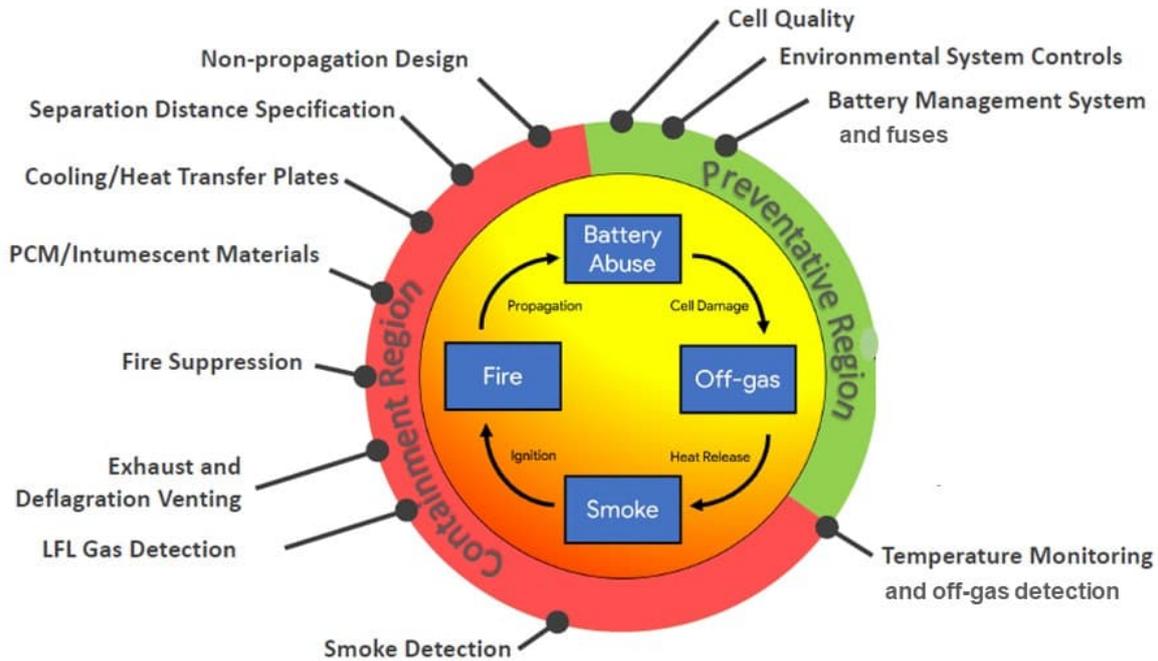


Figure 6 : Etapes de la défaillance d'une batterie stationnaire et les mesures de maîtrise des risques associés⁵

3.1. Barrières de sécurité préventives

3.1.1. Qualité de fabrication et de conception des cellules

Cette barrière est destinée à regrouper toutes les considérations liées à la qualité des cellules. Il est probable que l'utilisateur final du système n'en ait pas le contrôle, mais il s'agit de la fiabilité globale des cellules en ce qui concerne les défaillances internes et les défauts (contamination par des particules métalliques, présence de défauts au niveau des électrodes ou du séparateur, des empilements ...) qui peuvent entraîner le déclenchement d'un emballement thermique. Les tolérances des caractéristiques des cellules fabriquées et vendues sous une même spécification sont aussi un point important : des tolérances permissives sont susceptibles d'entraîner des problèmes de déséquilibres au sein des modules et compromettre la fiabilité des systèmes de compensation électronique assurant un équilibrage fonctionnel.

Des rappels importants de différentes marques de véhicules électriques en 2020 à la suite d'incendies répétés auraient été causées par des défauts de fabrication de cellules Li-ion⁶.

L'analyse de l'accidentologie sur les systèmes Li-ion conteneurisés indique qu'au moins 1 cas d'incendie (2021, Nouvelle Calédonie) serait dû à un défaut de fabrication cellules. A noter qu'un rappel massif de système de stockage résidentiel (relié à des panneaux solaires) a été initié par le fabricant LG Energy Solution en 2021 pour cause de surchauffe et de risque d'incendie qui aurait été lié à « certains problèmes » au début du processus de production des électrodes^{7, 8}.

Cette barrière peut être représentée par un taux de défaillance dû à un défaut de fabrication qui est de 1 sur 10 millions pour des cellules cylindriques de format 18650⁹. Il convient de noter que ces défauts de fabrication ne conduiront pas systématiquement à un emballement thermique et peuvent conduire uniquement à un défaut de fonctionnement.

Le niveau de sécurité intrinsèque apporté par conception et fabrication des cellules repose également sur leur capacité à résister à des abus électriques (surcharge, surdécharge, courants élevés), à des abus thermiques et mécaniques mais également sur leur résilience aux dégradations potentiellement subies au cours de leur vie (vieillesse, variations des conditions environnementales, etc.). Ces points dépendent notamment de la chimie et de la géométrie de la cellule Li-ion mais aussi de certains dispositifs de sécurité qui équipent certains formats de cellules, par exemple le current interrupt device (CID) qui coupe le courant dès que la pression interne de la cellule est trop élevée, et/ou PTC (Positive Thermal Coefficient) qui limite le passage du courant à travers la cellule lorsque la température de la cellule atteint 100°C. Les cellules prismatiques et cylindriques disposent également d'événements qui s'ouvrent dans le cas d'une augmentation brutale de pression afin d'éviter l'éclatement.

3.1.2. Maîtrise des conditions environnementales

La gestion des conditions environnementales correspond à la maîtrise de la température, du taux d'humidité et de l'absence de poussières dans les batteries situées dans les containers.

Les systèmes conteneurisés Li-ion sont aujourd'hui généralement équipés d'un dispositif de chauffage, ventilation et climatisation (HVAC) de l'ensemble du container, normalement conçu pour maintenir les niveaux de température et d'humidité du système global. Les défaillances du système HVAC se sont avérées être l'un des modes de défaillance les plus courants dans les systèmes batteries conteneurisés et ont été identifiées comme la cause profonde de plusieurs incendies de batteries en Corée du Sud. Parmi les 36 incidents Coréens, 18 systèmes ont été installés dans les montagnes ou les zones côtières (environnement salin). Il a été conclu que ces environnements entraînaient des conditions difficiles, notamment de grandes variations de température, une humidité élevée et des niveaux élevés de poussière et de particules, ce qui a finalement conduit à des modes de défaillance entraînant des incendies. Les niveaux d'humidité élevés et les variations importantes de température ont entraîné de la condensation et des résidus après séchage dans le système de batterie. Cet effet a dégradé l'isolation électrique à l'intérieur des modules de batterie entre les cellules et la masse du module, ce qui a entraîné des courts-circuits et des incendies ultérieurs. Cette cause a été aggravée sur certains systèmes par les ventilateurs conçus pour refroidir à l'air les modules de batterie.

Cette hypothèse est également évoquée pour l'accident de 2019 en Arizona. Selon le rapport Exponent¹⁰, des basses températures et des concentrations élevées de vapeur d'eau relevées lors de la vie de l'installation ont pu faciliter **la condensation et/ou la corrosion sur les équipements électroniques et les batteries**. La condensation a pu entraîner des défauts d'isolation électrique, résultant en arcs électriques sur le rack provoquant un chauffage intense des cellules et leur emballement thermique. De plus, la corrosion peut mener à des connexions électriques de plus grande résistance et enflammer des matériaux combustibles si la chaleur générée aux connexions est suffisante.

Bien que cette barrière se concentre principalement sur la température et la gestion du chauffage provenant de la charge électrique, elle devrait également tenir compte des températures extérieures élevées et inclure la gestion de l'humidité et la ventilation lorsque la climatisation ne fonctionne pas. **Selon la conception du système de HVAC, la perte d'une seule unité peut entraîner des conditions de température défavorables. La redondance des systèmes HVAC constitue une barrière supplémentaire pour atténuer l'impact de la perte d'une unité¹¹. L'efficacité de cette barrière doit être évaluée en fonction de la restriction du flux d'air à travers l'unité.**

La surveillance des conditions à l'intérieur du container (à minima capteurs de température et hygrométrie) est également essentielle dans le but de détecter une humidité élevée, la condensation de l'eau, les fuites d'eau, une mauvaise évacuation des eaux de condensation, la salinité de l'humidité et d'autres conditions défavorables de l'eau. En plus des capteurs, cette barrière doit intégrer une intelligence dans les mesures qui permettraient de déterminer rapidement les conditions défavorables, telles qu'une humidité élevée ou de la poussière, qui présentent un risque de corrosion ou un risque électrique.

Certains systèmes conteneurisés sont dorénavant **étanches** pour assurer une protection des équipements intérieurs vis-à-vis notamment de la poussière et de l'humidité. Le refroidissement de l'air intérieur est assuré via une circulation en mode fermée sans échange d'air entre l'intérieur et l'extérieur.

Un autre exemple de système étanche est le système commercialisé par Tesla appelé Mégapack ; le boîtier en acier étanche du Mégapack est conforme à la norme IP66 et offre une protection contre les expositions environnementales, chimiques et physiques. Le refroidissement des modules batteries est assuré par **un système de refroidissement liquide**. Le fluide de refroidissement circule dans des canaux spécifiques en dessous ou autour des cellules. L'analyse du retour d'expérience montre qu'une fuite dans le système de refroidissement liquide peut être à l'origine d'un incendie. Par exemple, la cause la plus probable de l'incendie du Mégapack Tesla à Geelong en Australie est une fuite dans le système de refroidissement liquide qui a provoqué un arc électrique dans l'électronique de puissance des modules de batteries du Mégapack. Cela a entraîné un échauffement des cellules lithium-ion du module de batterie qui a conduit à un emballement thermique qui s'est propagé et à l'incendie¹². L'exposition du liquide de refroidissement sur les modules de batterie a probablement désactivé l'alimentation électrique du circuit qui actionne le pyrodéconnecteur, qui est un fusible pyrotechnique contrôlé par shunt, propre à Tesla, qui permet un déclenchement rapide en une seule fois. Compte tenu de la panne de l'alimentation électrique, le pyrodéconnecteur n'a pas reçu de signal de coupure et n'a pas été en mesure d'interrompre un courant de fuite passant par le module de batterie avant qu'il ne dégénère en un incendie.

Depuis cet incendie, Tesla a mis en œuvre un certain nombre de mesures d'atténuation qui ont été appliquées à toutes les installations Mégapack existantes et futures. En ce qui concerne la fuite du système de refroidissement liquide, ces mesures comprennent :

- l'amélioration de l'inspection du système de refroidissement pour détecter les fuites pendant l'assemblage du Megapack et pendant les tests en fin de ligne afin de réduire la probabilité de fuites futures de liquide de refroidissement ;
- l'ajout d'alarmes supplémentaires aux données de télémétrie du système de refroidissement pour identifier et répondre (manuellement ou automatiquement) à une éventuelle fuite de liquide de refroidissement ;
- le maintien de tous les dispositifs de protection de sécurité électrique actifs, quelle que soit la position de l'interrupteur de verrouillage ou l'état du système. Cette mesure d'atténuation du micrologiciel permet aux dispositifs de protection de la sécurité électrique (tels que le pyrodéconnecteur) de rester en mode actif, capables de se déclencher en cas de défaillance électrique des modules de batterie,;
- la surveillance et le contrôle du circuit d'alimentation du pyrodéconnecteur de façon active. En cas de défaillance de l'alimentation électrique (soit par un événement externe tel qu'une exposition du liquide de refroidissement, soit par un autre moyen), le Megapack actionnera automatiquement le pyrodéconnecteur avant la perte de son alimentation électrique.

3.1.3. Battery management system et capacité d'arrêt du système

Le Battery Management System (BMS) est un élément de protection essentiel au système conteneurisé Li-ion. Il assure à la fois des fonctions de conduite (fonctions de mesures, gestion, diagnostic, communication) et de sécurité qui ont pour objectif d'éviter les situations dangereuses ou de mitiger leurs conséquences dans des conditions de fonctionnement dégradé (défaillance ou dérive des fonctions de conduite, événement extérieur non maîtrisé, ...).

Dans le cas des applications de stockage stationnaire, l'architecture modulaire suivante est généralement implémentée¹³ :

- **Le BMS esclave (niveau module)** : chaque module stationnaire possède une carte électronique destinée au suivi des caractéristiques de tension des cellules et de température du module ou cellules. Il assure également l'équilibrage des cellules,
- **Le BMS maître (niveau rack)** : chaque rack dispose d'un BMS maître qui assure une protection contre les surtensions/surcharges, les températures excessivement élevées et les surintensités en charge ou en décharge. En cas de dépassement des seuils de tension, température, intensité, plusieurs niveaux d'alarmes/défauts peuvent être remontés : renvoi d'informations sans déconnexion du rack sur atteinte des seuils niveau 1 et arrêt/déconnexion du rack sur atteinte des seuils niveau 2,

- **Le Superviseur (niveau système)** : il est en charge de consolider les informations issues des différents racks (énergie stockée, état de santé, puissance maximale, ...), de gérer leur connexion/déconnexion au poste de transformation DC/AC, et la gestion des alarmes/défauts du système de stockage électrochimique au niveau système (comportement du système complet face à cette alarme, enregistrement, notification). Ce superviseur a également en charge la gestion des sous-systèmes périphériques : régulation de température, système de détection et d'extinction d'incendie, capteurs environnementaux (humidité, température, sismique), ainsi que la gestion des alarmes/défauts de ces sous-systèmes.

La plupart des BMS sont conçus de telle sorte que la défaillance d'une cellule individuelle, d'un module, d'un rack, d'un composant BMS, ou la perte de communication avec n'importe quel sous-composant ou sous-système, ces BMS limiteront automatiquement le fonctionnement du système de stockage stationnaire (mode « fail-safe »), ou arrêteront complètement le système, tout en signalant une alarme correspondante via le système de contrôle.

Les actions du BMS se concentrent principalement sur la capacité du système, alors qu'il est encore actif, à isoler électriquement les composants affectés tout en maintenant autant que possible le service attendu. Plutôt que d'ouvrir rapidement les contacteurs d'urgence et d'arrêter l'ensemble du système comme dans le cas de l'arrêt/déconnexion du système, l'action du BMS se concentre sur un arrêt progressif ou un état de veille dans lequel les seuls composants affectés sont isolés. Idéalement, le BMS, tout en maintenant le fonctionnement, devrait remettre ces composants en fonctionnement lorsque l'événement a été supprimé ou corrigé.

Une défaillance totale ou partielle du BMS due à un "bug" logiciel/firmware, à une défaillance matérielle ou à une erreur de conception doit être considérée comme un événement majeur. L'une des causes identifiées dans la série d'incidents en Corée du Sud est **l'insuffisance du système de protection et de gestion intégré** : les systèmes intégrés de protection et de gestion se sont avérés insuffisants avec le système électrochimique. Il a été confirmé par le comité d'enquête que des lacunes dans l'intégration du système de gestion de la batterie (BMS), du système de gestion de l'énergie (EMS) et du système de gestion de l'alimentation (PMS) pouvaient entraîner des conditions susceptibles de provoquer un incendie. Les problèmes d'intégration comprenaient un partage d'informations inadéquat entre les systèmes, la séquence de fonctionnement du système et la vérification des anomalies des batteries après la maintenance du PCS (power conversion system) ou le dépannage. Plus précisément, sont évoqués par des experts sud-coréens lors de réunions d'experts du comité de normalisation TC120 tenues en 2022 dans des rapports internes au comité :

- des paramètres de contrôle insuffisant : déviation de tension, équilibrage des cellules, déviation de température, etc. ;
- la possibilité d'un courant de fuite dans le système stationnaire mis à la terre : la surveillance de l'isolation est une bonne pratique courante pour ces applications. La dégradation de l'isolation, quelle qu'en soit la raison, fait courir un risque de défaillances liées au courant à n'importe quel endroit du système. Cela ne concerne pas seulement l'isolation des câbles, mais aussi l'isolation des composants et l'efficacité de l'isolation de la terre en fonctionnement normal. Ces défauts d'isolement peuvent être, dans certains cas, corrélés avec des problèmes de gestion de conditions environnementales (incidents Arizona et Corée du Sud).

Une barrière importante est la détection redondante des défaillances et l'intelligence du système : c'est sa capacité à déterminer qu'un capteur est défaillant, à s'arrêter ou à continuer à fonctionner en toute sécurité sans ce capteur. Cela peut inclure des sommes de contrôle, des capteurs supplémentaires ou la possibilité d'extraire des données d'autres capteurs.

Cette barrière dépend fortement du capteur en question ainsi que de la conception, de l'architecture et du fonctionnement du système dans son ensemble et de l'évaluation des données recueillies dans les limites du système. La perte d'un capteur de tension au niveau de la cellule pourrait être compensée en comparant les capteurs de tension survivants connus avec la tension totale du module, ce qui permettrait de calculer la tension de la cellule en question. Bien qu'elle ne soit pas idéale, cette méthode pourrait être utilisée pour maintenir le système en ligne dans des situations d'urgence. Une opération de maintenance sera toutefois à réaliser dans les plus brefs délais.

La détection de la défaillance d'un capteur (détection de déconnexion, de valeur hors plage, somme de tensions cellules égale à celle du rack, ...) voire de sa dérive (en se basant par exemple sur l'uniformité des températures lorsque la batterie est au repos) est également essentielle.

En outre, l'interface homme-machine peut permettre de surveiller à distance tout ou partie des paramètres BMS, en fonction de la conception. Lors de l'incident de Geelong en Australie, le système de contrôle et d'acquisition des données nécessitait 24h pour établir une connexion avec un nouveau Mégapack afin de fournir une fonctionnalité complète de données de télémétrie et de surveillance à distance vers les opérateurs.

Or celui impacté par l'incendie avait été mise en service depuis 13h ce qui a empêché cette unité de transmettre des données de télémétrie (températures internes, alarmes de défaillance, etc.) au centre de contrôle hors site le matin de l'incendie. Depuis cet incident, ce délai de 24h a été réduit à 1h. En outre, des alarmes supplémentaires aux données télémétriques du système de refroidissement pour identifier et répondre (manuellement ou automatiquement) à une éventuelle fuite de liquide de refroidissement ont été ajoutées.

Dans le cas de l'incident de Liverpool, le report d'alarme ne semble pas avoir été remonté au centre de pilotage implanté au Danemark, ce sont les riverains qui ont donné l'alerte.

Une fréquence rapprochée des reports des données est également essentielle pour prévenir et agir dès l'alerte d'une défaillance. Les données stockées en local sont plus complètes et enregistrés à des fréquences de l'ordre du Hz, alors que celles déporté au centre de supervision sont moins complètes et sont enregistrés toutes les minutes environ.

Un guide de bonnes pratiques publié par DNV GL¹⁴ comporte une section dédiée à la sécurité des systèmes de stockage d'énergie. L'une des sections comporte des recommandations en matière de protection contre les cyber-attaques. Le rapport comporte une liste d'exigences en termes de contrôle d'accès d'utilisateur, de communication sécurisée, de contrôle du réseau, de contrôle du système et du dispositif de surveillance, etc. Selon le cabinet de consultants US Deloitte, le risque de cyber attaque dans le secteur énergétique est en augmentation et ne se limite pas au risque d'interruption de service ou aux risques financiers¹⁵.

3.1.4. Protection passive des circuits

La protection passive des circuits comprend les disjoncteurs, fusibles ou autres éléments passifs de protection contre les surtensions qui peuvent ouvrir le circuit en cas de défaillance et la résistance générale de la conception pour supporter des conditions électriques défavorables.

Les considérations relatives à la conception des circuits passifs à ce niveau visent à minimiser les voies d'accès entre les modules ou les racks dans lesquelles l'énergie d'un module peut s'infiltrer dans un autre en cas de défaillance. Les éléments passifs sous cette barrière sont axés sur le courant, uniquement capables de protéger contre les surintensités et les courts-circuits au moyen de disjoncteurs et de fusibles. Les considérations de conception passive à ce niveau peuvent inclure la conception du circuit de sorte que la défaillance d'un BMS dans un module n'entraîne pas de défaillance dans les autres.

Un exemple peut être un BMS dont le système d'équilibrage est défaillant, entraînant des courts-circuits. Un système mal conçu peut permettre qu'une énergie excessive soit dissipée par ce court-circuit en ayant une masse commune qui permet à l'énergie des autres modules d'être également dissipée par cette défaillance.

Ce mode de défaillance a été identifié comme une cause des incendies survenus en Corée du Sud en 2018 et 2019. À la suite d'une défaillance de conception au niveau du rack, un défaut de mise à la terre dans le rack déchargeait l'ensemble du système en série, faisant passer des milliers d'ampères dans un système conçu pour quelques centaines d'ampères. Ainsi la protection de la batterie contre les courts-circuits s'est révélée insuffisante : les systèmes n'étaient pas en mesure de se protéger correctement contre les risques électriques dus à des défauts à la terre ou à des courts-circuits. Lorsque de fortes surintensités ont été imposées au système batterie, le fusible n'a pas été en mesure d'interrompre rapidement le courant, ce qui a entraîné des défaillances sur les bus bars, et a initié un incendie.

3.1.5. Processus de certification des systèmes de stockage et conformité aux normes

L'évaluation des risques et la sécurité fonctionnelle sont des processus clés pour un déploiement sûr des systèmes stationnaires. Les normes développées en soutien à l'évaluation de la sécurité des systèmes de stockages stationnaires peuvent être classées selon leur approche :

- **normes de méthodologies d'évaluation des risques** : il s'agit d'identifier et de hiérarchiser les risques potentiels associés aux systèmes de stockage (feu, explosion, chocs électriques, dangers physiques, etc.) et à leur environnement, de déterminer les mesures de maîtrise des risques, d'analyser les modes de défaillances et de leurs effets (FMEA) ou encore l'analyse du niveau d'intégrité de la sécurité (SIL). Nous pouvons citer l'IEC 60812, IEC 61882, IEC 61025, IEC 61511-3, ...
- **normes de tests de sécurité/abusifs et/ou tests de performance** qui consistent essentiellement à décrire des procédures d'essais que doivent subir les systèmes électrochimiques généralement en satisfaisant des critères d'évaluation prédéfinis. Certaines de ces normes ou protocoles d'essais peuvent présenter un caractère réglementaire (par exemple pour autoriser le transport des batteries Li-ion sous le numéro UN3480). Elles peuvent également décrire des exigences générales de sécurité. Nous pouvons citer l'IEC 62619, l'UL 1973, et l'UL9540 A. Cette dernière permet d'évaluer le risque d'incendie d'un système de stockage d'énergie lors d'un emballage thermique et les effets de propagation. L'UL 9540A comporte des essais à différentes échelles ; la réalisation des essais à chaque échelle étant conditionnée par les résultats et observations obtenues à l'échelle précédente,
- **normes pour évaluer la sécurité des stockages d'énergie électrique (SEE) avec une approche systémique** ; elles sont à portée plus générale puisqu'elles visent à évaluer la sécurité de l'ensemble du système et non pas uniquement le système physique de stockage d'énergie convertible en électricité selon les besoins de l'application tel que la batterie. Par exemple, le standard UL 9540 couvre tous les types de systèmes de stockage d'énergie (mécanique, chimique, électrochimique, thermique) incluant les batteries mais il concerne essentiellement les systèmes intégrés aux réseaux distribués ou îlotés. Ce périmètre développé aux USA est également celui de l'IEC TC120² sur les systèmes de stockage d'énergie électrique. La Technical Specification TS 62933-5-1 publiée en 2017 (actuellement en cours de révision pour acquérir le statut de norme internationale (IS)) issue du groupe de travail 5 du TC 120, porte sur les considérations générales de sécurité des systèmes de stockage d'énergie électrique (toutes technologies de stockage physique d'énergie confondues) intégrés au réseau. La norme 62933-5-2 ed1 (2020), en cours de révision pour édition 2 (stade CD), porte plus spécifiquement sur les exigences supplémentaires de sécurité de tels systèmes de stockage d'énergie électrique lorsque le sous-système de stockage d'énergie est de type électrochimique (tous types de batteries rechargeables, classées par grandes catégories). Le projet de norme 62933-5-4 en cours porte spécifiquement sur les systèmes de stockage d'énergie Li-ion et sur les essais sur site permettant de vérifier la sécurité système de telles installations, en sus des vérifications faites en lien avec la norme 62933-5-2. Ces normes (UL 9540, TS 62933-5-1, IEC 62933-5-2, 62933-5-4) ne sont pas uniquement basées sur des exigences exprimées en termes de critères d'essais ; ils incluent également des recommandations en termes de construction, d'installation, d'instructions pour les utilisateurs/intégrateurs et de marquage,
- développement de normes dites harmonisées en cours d'élaboration sous l'égide du CENELEC : En lien avec l'adoption attendues dans les premières semaines de 2023 du projet de nouveau règlement de mise sur le marché des batteries, après deux ans de discussion entre les parties prenantes, un développement normatif a été confié par mandat officiel émanant de la Commission Européenne au CENELEC, en appui aux exigences renforcés en matière de durabilité, circularité et sécurité des batteries sur le marché européen : ces futures normes feront foi en matière de respect des exigences essentielles exprimées en la matière par ce nouveau règlement.

² IEC TC 120: Technical Committee "Electrical Energy Storage (EES) Systems" pour lequel l'INERIS a coordonné le Working Group 5 relatif à la sécurité puis en a pris la présidence depuis le 1^{er} avril 2019

Bien que les normes de produits elles-mêmes couvrent généralement les exigences minimales de sécurité, l'analyse requise par la norme peut servir de base à un examen supplémentaire et peut indiquer des modes de défaillance supplémentaires non testés dans les normes.

La conformité à ces normes y est requise pour l'exploitation d'un système stationnaire et, bien que la conformité à ces normes ne garantisse pas des barrières solides mais plutôt un niveau minimal à atteindre, les exigences décrites et les données des essais obtenus peuvent être utilisées pour éclairer cette analyse et constitueront à termes de nouvelles mesures de prévention.

En parallèle et probablement suite aux incidents, un cadre réglementaire spécifique aux installations stationnaires se met progressivement en place dans de nombreux pays. Par exemple, des règlements sont en cours d'élaboration aux Pays-Bas, au Royaume-Uni, en France, ... Un arrêté est déjà en vigueur en Corée du Sud.

3.2. Barrières de sécurité visant la protection du système

3.2.1. Dispositifs de détection

La performance des systèmes de détection (comme tout autre barrière) dépend des critères d'efficacité, de temps de réponse, de niveau de confiance et de maintenabilité¹⁶. La chaîne de sécurité est composée d'une détection, d'un traitement et d'une action. L'action associée à cette détection peut être la déconnexion de la batterie, le déclenchement d'un dispositif d'extinction, d'une action de ventilation manuelle ou automatique, etc. La précocité d'une détection (qui va conditionner le temps de réponse d'une action de mitigation et le(s) type(s) de phénomène détectable) constituent des éléments de réflexion clé pour une bonne conception des systèmes de détection. Par exemple, lors de l'accident en Arizona, l'agent extincteur a été déclenché 30 s après l'alarme incendie. D'autres paramètres, agencement interne et niveau d'encombrement des containers, aéraulique, ... doivent également être pris en compte.

Les systèmes conteneurisés Li-ion dispose généralement de détecteurs qui peuvent être des détecteurs de fumées, des détecteurs thermiques, ou encore ou des détecteurs thermo- vélocimétrique.

Lorsque les détecteurs traditionnels (détecteur de fumées et de chaleur ponctuels) s'activent, l'emballlement thermique d'une batterie lithium-ion est déjà bien entamé. Ceci a été confirmé lors d'essais récents réalisés par UL à l'échelle d'un container rempli partiellement de modules Li-ion¹⁷ pour lesquelles les détecteurs de fumées se sont déclenchés entre 47 s et 1 min après l'emballlement thermique et pour l'un des essais, après l'explosion du volume partiel et après l'embrasement soutenu des gaz de la batterie et des boîtiers en plastique des modules. Cette méthode de détection semble ainsi plutôt tardive pour espérer éteindre l'incendie et préserver le système.

L'imagerie thermique (ou les détecteurs de flammes) est couramment utilisée à l'extérieur pour surveiller plusieurs unités en cas d'incendie ou d'augmentation des températures provenant des bouches d'évacuation HVAC. L'imagerie thermique fournit une alerte précoce supplémentaire lorsqu'elle est combinée à d'autres méthodes de détection dans chaque unité.

Des gaz peuvent être émis avant l'occurrence d'un incendie. La détection suffisamment précoce de ces gaz pourrait éventuellement permettre une réponse précoce et éviter un phénomène d'incendie ou d'explosion¹⁸.

Lors d'essai abusifs (électrique type surcharge / thermique type emballlement) réalisés sur des batteries Li-ion, il a été noté que les principaux gaz détectés dans les fumées de décomposition et/ou de combustion des seuls éléments constitutifs des cellules Li-ion étaient le CO₂, le CO, des hydrocarbures comprenant CH₄, C₂H₄, C₂H₂, etc. et les carbonates organiques (DMC, EMC...), de l'H₂, le HF et le POF₃¹⁹. Le formaldéhyde (CH₂O), l'HCl et le monoxyde d'azote (NO) peuvent également être détectés. Ces fumées contiennent ainsi des gaz de nature :

- inflammable (CO, CH₄, C₂H₄, C₂H₂, H₂, carbonates organiques) ;
- toxique, c'est-à-dire des substances pour lesquelles des seuils de toxicité aigüe existent (CO, HF, HCl, CH₂O, NO, CO₂ à forte concentration). A notre connaissance, il n'existe pas de données consolidées sur la toxicité du POF₃ (fluorure de phosphoryle). Dans une approche conservatrice, il est toutefois possible de considérer le seuil de toxicité aigüe du fluorure d'hydrogène (HF).

La nature et la quantité des gaz inflammables et toxiques émis dépendent de nombreux paramètres tels que la composition de la cellule (cathode²⁰, solvants et sels d'électrolyte^{21,22}, additifs...), de l'état de charge²³, du mode de défaillance, de l'inflammation ou non des gaz émis, etc. Les gaz mentionnés dans le paragraphe ci-dessus ne constituent pas une liste exhaustive des substances pouvant être détectées dans les fumées de combustion et/ou de décomposition provenant d'une défaillance des batteries Li-ion.

Les détecteurs de gaz sont généralement conçus soit pour la détection de gaz inflammables, soit pour la détection de gaz toxiques.

Pour un système stationnaire batterie Li-ion, il serait recommandé d'installer plusieurs types de détecteurs de gaz au sein du container afin de détecter une émission de gaz de manière précoce.

Le rapport de RISE²³ mentionne que deux types de détecteurs pourraient être sélectionnés, l'un pour détecter les hydrocarbures (carbonates organiques, ...) et l'autre pour les gaz toxiques (HF par exemple). Alors que la réglementation néerlandaise « pour le stockage sûr de l'électricité dans les systèmes de stockage d'énergie » en cours d'élaboration²⁴ préconise des détecteurs CO et H₂.

D'après les résultats de la série d'essais menés par UL à grande échelle¹⁷, les détecteurs de gaz inflammables à capteur catalytique et les détecteurs d'hydrogène à cellule électrochimique couramment disponibles sont efficaces pour indiquer qu'un phénomène d'emballement thermique s'est produit. Les détecteurs de CO, gaz inflammables et H₂ positionnés dans le container se sont déclenchés dans les 30 s suivant l'emballement thermique.

Cependant, d'après cette étude, **pour une évaluation en continue**, les détecteurs de gaz couramment disponibles ne sont pas toujours un indicateur fiable de l'ampleur du danger ou de la présence d'un environnement combustible. Les performances des détecteurs de gaz sont mises à l'épreuve par l'environnement de fonctionnement difficile d'un emballement thermique en cascade. Cet environnement difficile comprend la chaleur, de grandes quantités de particules, une concentration réduite d'oxygène, de fortes concentrations de gaz de batterie, et éventuellement de l'eau ou d'autres agents d'extinction. Les problématiques suivantes sont notamment soulevées :

- les suies produites de manière importante lors d'un incendie de batteries Li-ion peuvent se déposer sur les surfaces des éléments sensibles des détecteurs,
- les détecteurs de gaz inflammables à capteur catalytique sont étalonnés pour un hydrocarbure dans l'air (le méthane par exemple) et ne sont pas conçus pour mesurer des mélanges d'hydrocarbures émis lors de l'emballement thermique des batteries Li-ion,
- certains agents d'extinction à base d'halocarbures, comme le NOVEC 1230 peuvent empoisonner les détecteurs de gaz inflammables à capteur catalytique en fonction de la durée d'exposition,
- le détecteur H₂ électrochimique a montré une sensibilité croisée au monoxyde de carbone et une vulnérabilité aux dommages causés par l'exposition au Novec 1230 et au stress thermique.

Il existe également d'autres technologies innovantes permettant – semble-t-il – de garantir une détection rapide, par exemple, avec une détection intégrée de gaz et de fumée qui échantillonne en continu l'air pour détecter la présence de gaz ou de particules de fumée au sein du système²⁵.

La position du (ou des) détecteur(s) est également très importante. Ils doivent être positionnés aux endroits où les gaz sont susceptibles d'être émis ou de s'accumuler. Quelques essais montrent que certains gaz émis en début d'emballement thermique (carbonates organiques par exemple) sont plus lourds que l'air et peuvent s'accumuler en partie basse et participer à une stratification des fumées²⁶. Ce qui a été confirmé lors de l'un des essais menés par UL¹⁷ pour lequel le détecteur de gaz inflammable situé au niveau du sol était saturé dans les 30 s suivant l'emballement thermique initial indiquant la présence d'une atmosphère explosive alors que ceux situés à mi-hauteur de la paroi et au plafond n'avaient pas réagi. Les systèmes conteneurisés actuellement installés disposent de détecteurs positionnés au plafond ; ce qui, au vu des résultats des études recensées ne permet pas une détection précoce d'un emballement thermique.

3.3. Dispositifs d'extinction des systèmes conteneurisés Li-ion

Cette barrière a pour objectif d'agir sur un incendie survenant au sein du système de stockage stationnaire.

3.3.1. Systèmes gazeux

Des systèmes d'extinction en phase gazeuse ont été installés, souvent en usine, dans un certain nombre de systèmes déployés dans le monde. Une ou plusieurs buses d'injection sont réparties au plafond dans le container. Il peut s'agir de :

- gaz inertants tels que l'azote ou un mélange azote/argon (argonite) qui agissent en abaissant la concentration de l'oxygène de l'air ambiant pour arrêter la réaction de combustion, ou
- de gaz inhibiteurs à base d'halocarbures tels que le Novec 1230, ou le FM-200,qui agissent principalement par le mécanisme physique d'absorption de la chaleur et par l'inhibition de la réaction en chaîne responsable de la combustion, sans abaisser la teneur en oxygène de l'air.

Les agents gazeux sont traditionnellement préférés pour les systèmes électriques en raison de leur faible conductivité et du dépôt négligeable de résidus sur les composants électriques²⁷. Un système d'extinction par injection de gaz peut inerte ou interrompre la réaction chimique de certain type de feu (systèmes électriques par exemple) pendant la durée d'injection (décharge en 10 s et maintien dans le container pendant environ 10 min en considérant les fuites d'un container traditionnel) et tant que la concentration en gaz inerte reste suffisante (i.e. que la concentration en oxygène est suffisamment faible). La durée de l'emballage thermique des batteries dans un système conteneurisé dépend de la vitesse de propagation et de la taille de l'installation, mais pourrait potentiellement être de l'ordre de dizaines d'heures. La différence d'échelle temporelle de l'événement contribue à l'efficacité limitée du Novec 1230 pour atténuer les risques thermiques lors d'un emballement thermique de batteries Li-ion dans un container¹⁷.

Le guide FM Global²⁸ mentionne dans la section 3.3 qu'il n'y a aucune garantie que la protection par injection de gaz est efficace pour éteindre ou contrôler un incendie impliquant des systèmes de stockage d'énergie. Ce type d'agent extincteur ne permet pas, en l'état actuel des connaissances, de refroidir les cellules en cours d'emballage ; le facteur de refroidissement n'est pas aussi efficace que celui des agents d'extinction aqueux, et n'empêche pas la propagation de l'emballage thermique aux modules/racks voisins¹⁷. D'autre part, les agents à base d'halocarbures présentent l'inconvénient majeur de former des produits secondaires toxiques et corrosifs lorsqu'ils sont exposés à des températures élevées²⁹. L'installation de ces systèmes a persisté même après que les premières données d'essai et études^{30,31} aient suggéré qu'ils ne pouvaient pas traiter correctement les incendies dans les batteries elles-mêmes et dans leurs configurations actuelles¹¹.

L'accidentologie montre que dans plusieurs cas, les agents gazeux n'ont pas permis d'éviter un incendie ou une propagation de l'incendie (Drogenbos 2017, Arizona 2019, ...). Dans le cas de l'incident de Liverpool, le système d'extinction Novec 1230 s'est déclenché tardivement probablement sous l'effet de la déflagration ou de l'effet thermique de l'incendie.

En l'absence de tests d'incendie à grande échelle, les agents en phase gazeuse ne doivent pas être considérés comme une barrière efficace contre les incendies de batteries. Cependant, ils devraient fonctionner de manière adéquate contre d'autres types d'incendie dans le container (incendie d'origine électrique par exemple onduleur, moteur de la ventilation, HVAC...) et peuvent prévenir le risque de propagation d'un incendie d'origine électrique vers les batteries.

Un autre problème posé par des agents en phase gazeuse est le risque de backdraft³ qu'ils présentent. La suppression de la combustion à l'aide d'un agent de suppression en phase gazeuse sans contrôler la propagation de l'emballage thermique permet la génération de gaz résiduels tout en réduisant les niveaux d'oxygène.

³ Explosion de fumées dans un local clos provoquée par une entrée d'air frais, typiquement lors de l'ouverture d'une fenêtre ou d'une porte.

Les batteries touchées, qui peuvent rester chaudes pendant des heures, peuvent constituer une source d'inflammation si l'oxygène est réintroduit dans l'espace. Il est possible que ce scénario se soit produit lors de l'incident en Arizona.

3.3.2. Aérosols solides

Il existe également des aérosols solides dont le mode d'action est l'inhibition chimique par l'interruption des réactions chimiques en chaîne au niveau moléculaire. Certains systèmes de stockage actuels sont équipés de ce type d'extinction qui agit par une diffusion rapide (décharge en 10 s) de l'agent à base de sels de potassium par des boîtiers disposés au plafond du container. Dans le cas des batteries, les réactions chimiques sont complexes et, en fonction de la chimie de la batterie Li-ion, de l'oxygène peut être libéré par la cathode alimentant le phénomène de combustion. Le rapport de l'accident de Perles et Castelet³² mentionne que le système d'extinction automatique à base de sel de potassium qui équipait le container, tel que dimensionné, s'est avéré inefficace. Il est également précisé que l'efficacité d'un tel système peut être notablement diminuée si, dans le même temps, la détection incendie n'entraîne pas l'arrêt de la ventilation interne, celle-ci assurant le renouvellement ou la filtration de l'air intérieur et l'élimination des agents extincteurs. Précisons que, dans le cas de Perles et Castelet, cet asservissement était bien prévu ce qui renforce le caractère inopérant de l'extinction à poudre dans un tel cas.

3.3.3. Systèmes à base d'eau

Les systèmes d'extinction à base d'eau comprennent les systèmes à brouillard d'eau, systèmes de type sprinklers et les systèmes déluge.

Quelques études et essais d'extinction sur des systèmes batteries ont été réalisés avec des systèmes à brouillard d'eau et des sprinklers. Les principaux résultats de ces études et essais sont résumés dans les paragraphes ci-après.

- **Systèmes à brouillard d'eau**

Le brouillard d'eau comprend une gamme de tailles de gouttelettes inférieures à 1000 µm, bien inférieure à celles d'un sprinklage. Les gouttelettes plus fines ont un rapport surface/volume plus grand, ce qui entraîne une plus grande absorption de l'énergie thermique de l'air chaud pour le même volume d'eau.

Certaines sources indiquent ainsi que le brouillard d'eau est très efficace pour absorber la chaleur, en se transformant en vapeur et en absorbant la chaleur d'un incendie ou la chaleur produite pendant le processus d'emballage thermique. Le brouillard d'eau offre une couverture "tridimensionnelle", ce qui lui permet d'imprégner l'ensemble de l'espace et d'atteindre même les feux masqués, ce qu'un système de sprinklers traditionnel ne peut pas offrir. Des essais d'extinction par brouillard d'eau à l'échelle cellule ont été menés par plusieurs équipes de recherche^{33,34,35,36}. Les résultats montrent une bonne efficacité de refroidissement selon certaines conditions (volume d'eau suffisant, influence de la taille des gouttelettes, du débit...) avec une réduction de la propagation de cellules en cellules. Il a également été démontré que l'effet extincteur du brouillard d'eau peut être amélioré en ajoutant des additifs et des tensioactifs³⁷. Il est important de noter que ces essais ont été réalisés à petite échelle. Des essais à grande échelle sont nécessaires pour évaluer l'efficacité du brouillard d'eau sur un feu de modules ou racks en condition réelle d'intégration.

- **Système de type sprinkler**

Les gouttelettes d'un système de type sprinkler pénètrent dans le panache de feu et refroidissent les surfaces. En s'évaporant, la vapeur d'eau déplace l'oxygène de l'air et limite ainsi la puissance du foyer.

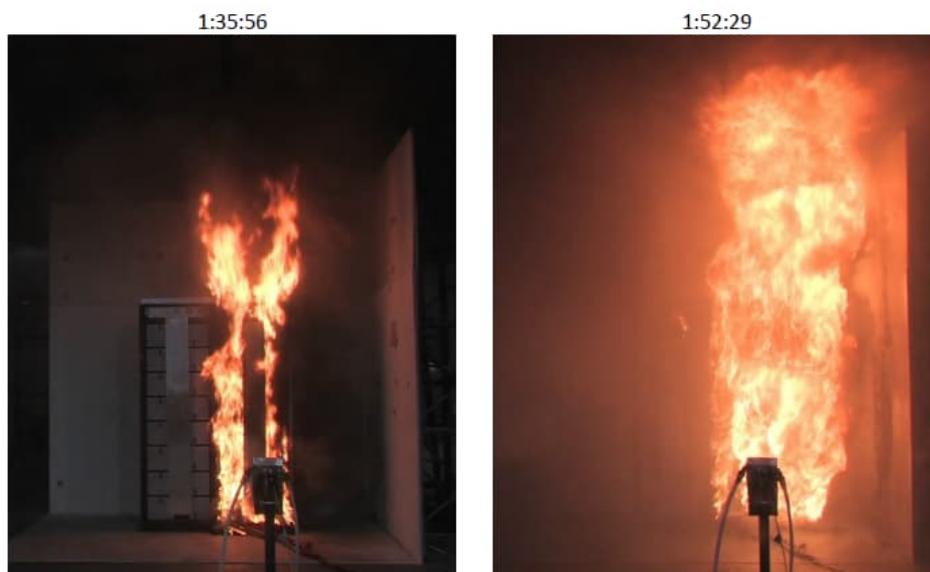
Des tests effectués par FM Global puis UL en lien avec la protection des systèmes de stockage d'énergie par batteries Li-ion ont montré que, si le sprinkler n'a pas éteint l'incendie, il a protégé les murs et systèmes voisins³⁸.

Ces essais d'extinction menés à relativement grande échelle (rack/baie de 16 modules) ont également montré l'influence de la chimie des batteries Li-ion avec une réactivité plus importante sur la chimie NMC par rapport au LFP et des besoins en eau plus importants pour les batteries NMC (Figure 7 et Figure 8). Le sprinklage n'a pas empêché la propagation de l'incendie d'un seul module à l'ensemble des modules d'un rack, quel que soit la chimie. Pour les batteries NMC, l'incendie s'est également propagé au rack adjacent malgré le sprinklage.

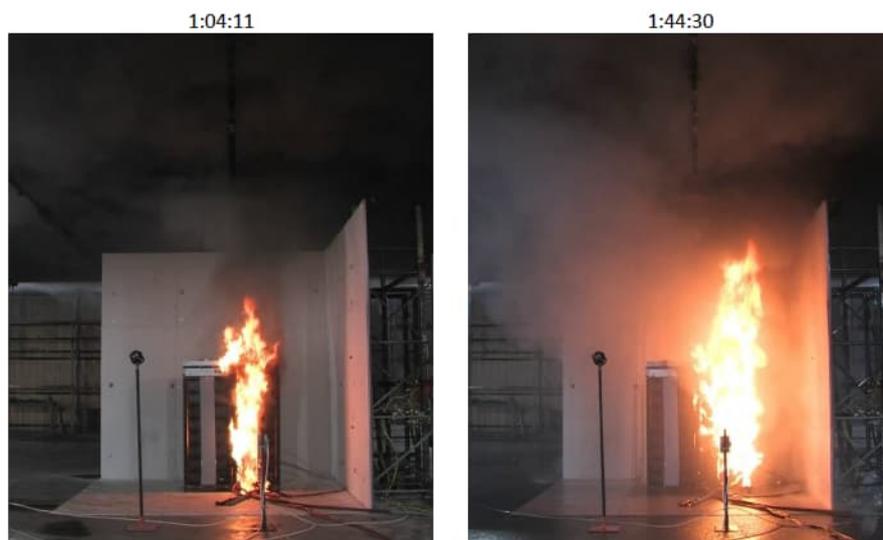
Le fait que le feu se soit propagé au rack adjacent pour la chimie NMC signifie que tous les racks installés côte à côte dans une rangée peuvent éventuellement être impliqués dans l'incendie. L'inflammation du rack adjacent s'est produite pendant le déclin du feu initial indiquant que la demande en sprinklage doit être basée sur la surface de la pièce où le système NMC est installé.

En outre, bien que cela n'ait pas encore été démontré par des tests supplémentaires à grande échelle, les résultats des tests préliminaires indiquent que l'extinction de type sprinklage peut être plus efficace pour gérer les incendies de stockage d'énergie lorsqu'elle est utilisée conjointement avec une ventilation efficace.

Les études menées par FM Global et UL recommandent de procéder à des essais d'incendie à grande échelle pour déterminer l'efficacité d'une conception particulière de protection contre l'incendie, comprenant la configuration du système de pulvérisation d'eau et l'espacement des équipements, pour évaluer la protection contre la propagation des emballages thermiques et l'endommagement des matériaux combustibles à proximité.



Photos des essais sur le système NMC lors du premier déclenchement du sprinklage (à gauche) et lors du pic maximal de puissance (à droite)



Photos des essais sur le système LFP lors du premier déclenchement du sprinklage (à gauche) et lors du pic maximal de puissance (à droite)

Figure 7 : Photos prises lors des essais feu avec sprinklage réalisés sur les systèmes NMC et LFP

Sprinkler Performance

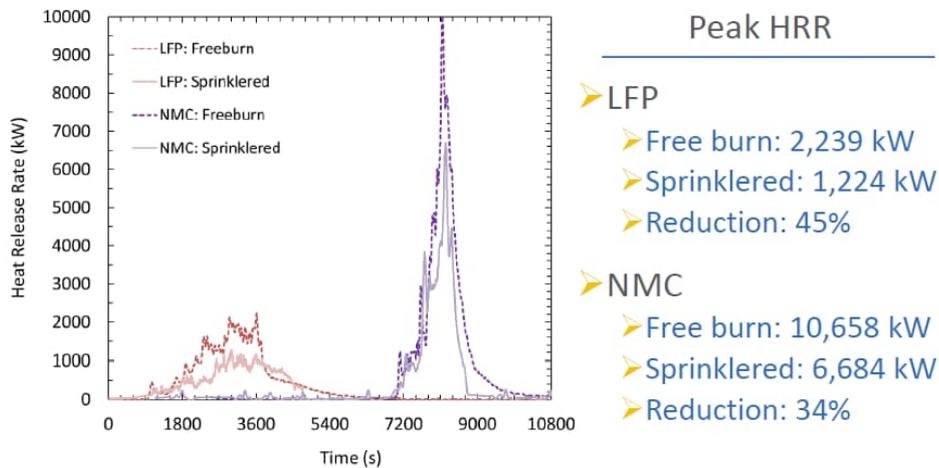


Figure 8 : Comparaison de la puissance dégagée (HRR) lors des essais d'incendie et de sprinklage sur les systèmes LFP et NMC. Les durées sont décalées afin de grouper les données sur LFP et NMC³⁹

L'efficacité des systèmes d'extinction à l'eau (sprinklage, brouillard d'eau...) intégrés dans des systèmes stationnaires dépend fortement de la capacité de l'eau à refroidir « à cœur » les batteries. La chaleur résultante des réactions en chaîne d'emballement thermique, la production de gaz, la nature profonde du feu et la structure serrée, dense et protégée des systèmes rendent l'extinction difficile. Lorsque les buses sont réparties au niveau du plafond du container, l'eau d'extinction n'atteint pas directement les modules, et encore moins les cellules, provoquant des ré-inflammations lorsque le sprinklage est arrêté ; comme l'ont montré les essais de sprinklage menés par FM, Global et UL. D'autre part, en cas d'emballement limité à quelques modules, l'application d'eau dans l'ensemble du container peut entraîner des dommages collatéraux avec un risque de mise en court-circuit de modules à priori sains.

C'est pourquoi des conceptions récentes font apparaître des dispositifs de sprinklage localisé au niveau de chaque module asservi à un fusible thermique. En cas de surchauffe du module, le fusible claque à une certaine température, et l'eau est injectée sur le module concerné. Lors de l'incident de Moss Landing (09/2021), les dispositifs de sécurité de l'installation ont fonctionné comme prévu, détectant que des modules batteries fonctionnaient à une température supérieure aux limites opérationnelles et déclenchant un sprinklage localisé aux modules concernés. La surchauffe a été maîtrisée et contenue. A noter toutefois que cette conception doit être maîtrisée afin d'éviter le déclenchement intempestif du dispositif de sprinklage localisé sur un module non défaillant, ce qui pourrait entraîner un court-circuit au niveau de ce module et un possible emballement thermique.

Il convient également de noter que l'application d'eau sur un incendie de batteries Li-ion modifie la composition des gaz ; une augmentation de la concentration en CO, H₂ et HF et une diminution de la concentration en CO₂ sont constatés lors des essais avec extinction ; ce qui peut conduire à une modification du profil de risques (explosion par exemple).

Bien qu'elle ne soit pas efficace à 100 %, l'eau s'avère être l'agent extincteur le plus efficace pour gérer un incendie de batterie Li-ion de manière générale⁴⁰. Toutefois, la plupart des études mentionnent que les données d'essais à grande échelle sont actuellement insuffisantes pour démontrer l'efficacité globale des systèmes à base d'eau pour l'extinction des incendies des systèmes stationnaires Li-ion.

3.3.4. Couplage système extinction gaz/aérosol et extinction à eau

Certaines conceptions récentes intègrent les 2 systèmes d'extinction :

- le déclenchement d'un système à base de gaz/aérosol, qui peuvent être efficaces contre les incendies dans l'ensemble du système et en dehors des batteries. L'injection se fait dans la globalité du container sur détection de fumées, chaleur ou température ;
- le déclenchement d'un système d'extinction à eau localisé sur détection thermique (fusible), permettant d'asperger le ou les modules concernés. Cette conception permet d'être au plus près du module et évite d'asperger l'ensemble des modules/racks avec le risque de mettre en court-circuit des cellules/modules supplémentaires ou créer des dommages collatéraux au reste du système jugé suffisamment protégé.

3.4. Dispositifs de protection contre l'explosion

3.4.1. Ventilation en cas d'emballlement thermique

L'une des barrières de protection possible contre l'explosion lors de l'emballlement thermique d'une batterie stationnaire est la ventilation avec l'objectif d'évacuer les gaz inflammables en dehors du container.

2 approches sont possibles :

- activation d'une ventilation forcée automatique dès la détection de présence de gaz inflammables ou autre type de détection, ce qui permettrait de limiter l'étendue et la durée d'un volume explosif potentiellement formé dans le container suite à l'emballlement thermique d'une batterie,
- activation d'une ventilation d'urgence pour les intervenants de secours pouvant être actionnée manuellement (déportée de préférence) avant l'ouverture de la porte du container après un emballlement thermique. Cette approche peut être associée à un report de signal, indiquant la présence d'une ATEX ou alors il peut s'agir d'une mesure organisationnelle à appliquer systématiquement avant l'ouverture de la porte. En effet, lors de l'accident en Arizona (2019), l'équipe intervenant a ouvert la porte du container, et quelques minutes après, une explosion s'est produite. Des équipements de pompiers, des débris et la porte ont été projetés. 4 intervenants de secours ont été blessés pendant l'incident. Les gaz inflammables libérés par l'emballlement thermique des cellules/modules se sont accumulés dans le container. **L'ouverture de la porte a entraîné un apport d'oxygène suffisant pour que le mélange combustible rentre dans sa zone d'inflammabilité**, une violente explosion s'est produite au contact de points chauds (du métal fondu resolidifié a été retrouvé sur le sol près du rack initiateur) accompagnée d'une boule de feu. Il convient de noter qu'avant l'arrivée des pompiers, le dispositif d'extinction automatique du système de stockage électrochimique a été déclenché (décharge de l'agent NOVEC 1230) 30 secondes après la détection de fumées (conformément à la conception).

Il existe toutefois des limites à la ventilation :

- comme décrit précédemment, les gaz inflammables émis lors d'une défaillance d'une batterie Li-ion sont susceptibles de se stratifier en fonction du mode de défaillance, de la température et de l'efficacité de la ventilation. Il convient donc de noter que même avec la ventilation, les confins étroits d'un container batterie peuvent créer des zones de faible circulation d'air, et des explosions localisées dans un système sont possibles lorsque de petites poches de gaz s'accumulent à partir de la défaillance d'une seule cellule,
- la ventilation doit être traitée avec précaution: le mélange gazeux peut se situer au-dessus de la limite supérieure d'inflammabilité et l'afflux rapide d'air par une ventilation manuelle ou mécanique peut conduire à une phase transitoire se situant dans la plage d'inflammabilité du mélange gazeux conduisant à un risque d'explosion.

Des concepts innovants se développent comme celui mis au point par des scientifiques du PNNL pour des containers batteries de type armoire. Le concept consiste en une ouverture automatique des portes sur détection de fumées, gaz, ou chaleur. Cette fonctionnalité permet une dilution passive des gaz inflammables accumulés, minimisant ainsi le potentiel d'explosion et réduisant le risque de blessure pour les intervenants. Le système peut faire en sorte que toutes les portes s'ouvrent automatiquement, simultanément et immédiatement si nécessaire (Figure 9).

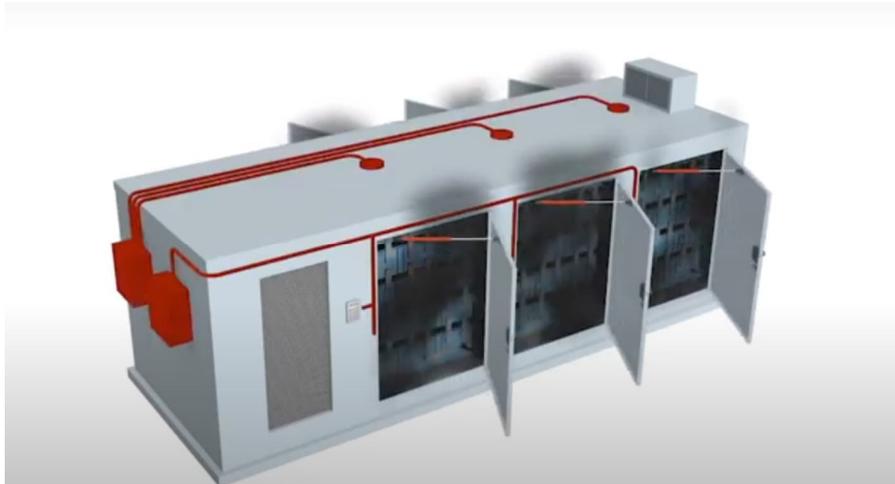


Figure 9 : concept innovant d'ouverture automatique des portes sur détection⁴¹

3.4.2. Event de surpression et trappes anti-explosion

Les containers batteries Li-ion peuvent être équipés d'une soupape/évent qui peut s'ouvrir en cas de surpression lié à l'injection d'un gaz inertant ou lié à une accumulation de gaz suite à un emballement thermique des batteries. Ces événements de surpression peuvent être situés sur les parois latérales du container (Figure 10 a) ou sur le toit (Figure 10 b), avec dans ce cas l'objectif de diriger les gaz, les fumées, voire les flammes vers le haut.

Event de surpression



a)



b)

Figure 10 : conception avec événement de surpression latérale a) et conception avec événement de surpression sur le toit b)

Généralement ces événements ne sont pas dimensionnés pour contenir une explosion liée à l'inflammation d'un nuage de gaz émis par les batteries. Une accumulation de gaz inflammable se produit dans le container puis rencontre une source d'inflammation dans le container qui provoque une explosion du nuage dans le container et pouvant conduire à une seconde explosion se propageant dans l'environnement.

L'accident de Liverpool montre que les effets liés à cette explosion peuvent être violents puisque plusieurs éléments ont été éjectés de l'unité, notamment un composant d'une des unités de refroidissement d'air a été trouvé à 22,5 m du container.

En conséquence, de nombreux codes de prévention des incendies aux Etats-Unis mais aussi les règlements en vigueur dans d'autres pays (Pays-Bas par exemple) exigent désormais une protection contre les déflagrations conçue à partir de calculs de dimensionnement et/ou de résultats d'essais spécifiques au système provenant de tests de normes de produits tels que la norme UL 9540A. Des conceptions récentes de container prévoient des trappes anti-explosion sur le toit du container, dimensionnées pour s'ouvrir en cas d'explosion d'un nuage de gaz provenant des batteries (Figure 11).



Figure 11 : Conception avec trappes anti-explosion sur le toit

3.5. Règles de conception/installation visant la limitation de la propagation d'un événement accidentel

Les règles de conception visant la limitation de la propagation d'un événement accidentel incluent toutes les protections entre les modules et/ou les racks de batteries qui limiteraient la propagation d'un incendie vers l'extérieur, vers d'autres modules/racks, et protégeraient également les modules/racks en cas d'incendie externe (ou interne) qui pourrait toucher les batteries. Il ne s'agit pas de systèmes d'extinction actifs, mais plutôt de barrières et de matériaux passifs, de plaques ininflammables (isolants thermiques entre cellules, modules ou racks), de matériaux intumescents et de conceptions intelligentes qui incluent l'acheminement des gaz et d'autres caractéristiques de conception qui gèrent le dégagement et l'absorption de chaleur.

Dans l'objectif de ralentir la propagation d'un feu, tous les systèmes doivent démontrer soit (1) que la défaillance d'une cellule seule ne peut pas se propager aux cellules voisines au sein d'un module ou (2) que la conception du module comporte une protection au feu externe adéquate pour contenir la chaleur et les flammes à ce module. En ce sens, le périmètre de la norme UL 9540A « Test Method for Evaluating Thermal Runaway Fire Propagation in Battery Energy Storage Systems (BESS) » est d'évaluer les caractéristiques de l'incendie d'un système de stockage d'énergie lors d'un emballement thermique. Les données obtenues sont utilisées pour déterminer la protection incendie et explosion requise pour l'installation d'un système de stockage d'énergie. La méthodologie de test de cette norme comporte des essais à différentes échelles, la réalisation des essais à chaque échelle étant conditionnée par les résultats et observations obtenues à l'échelle précédente.

La réglementation néerlandaise demande que le système soit protégé contre la propagation du feu, au moins au niveau module, par exemple sur la base de l'UL9540A.

La limitation de la propagation au sein du container est importante mais également entre containers dans le cas où la conception interne n'aurait pas permis de contenir les effets. **La distance d'éloignement entre containers est ainsi un critère déterminant pour la sécurité** afin d'éviter la propagation thermique entre les containers batteries eux-mêmes, et entre le container batteries en proie à l'incendie et les équipements tiers (exemple : transformateur, bâtiment, stockage de matières combustible...).

En substitution à la distance d'éloignement, la mise en place de murs coupe-feu REI120 suffisamment haut peut également être envisagée.

Certains fabricants comme Tesla ont opté pour une isolation thermique par l'utilisation de panneaux d'acier verticaux extérieurs entre les Mégapacks, réduisant ainsi la distance entre eux à 15 cm sur les côtés et à l'arrière de chaque unité (validé par les tests UL9540A), avec des allées de 2,4 m devant chaque Mégapack. Lors de l'incident de Geelong en 2021, la propagation du feu d'un Mégapack à l'autre s'est produite par le toit ; les conditions de vent ont poussé les flammes vers le container voisin, enflammant les événements de surpression en plastique (Figure 12). Cet incident montre que la mise en œuvre d'une distance suffisante entre les containers ou en substitution à la distance d'éloignement, la mise en place de murs coupe-feu d'une hauteur suffisante est une barrière importante pour empêcher la propagation d'un incendie d'un container à l'autre.



Figure 12 : image de l'incendie de Geelong en 2021

L'empilement des containers n'est pas recommandé. Il est même interdit dans la réglementation néerlandaise, le standard américain NFPA 855 et les normes révisés IEC 62933-5-1/5-2. En effet le rapport d'enquête du BEA-RI de l'incendie de Perles et Castelet (container batterie superposé au container conversion-Figure 13) mentionne que la superposition des containers doit être évitée compte-tenu de la mauvaise stabilité au feu des structures métalliques. Cet agencement rend également difficile l'intervention des secours.



Figure 13 : Vue de l'installation de Perles et Castelet durant l'incendie à l'arrivée des services d'incendie et de secours

3.6. Plan d'intervention d'urgence et intervention

Un plan d'intervention d'urgence doit être établi pour gérer tous les événements d'urgence pouvant survenir sur une installation. De tels plans font partie des exigences récemment mises en place dans les normes publiées ou en cours de rédaction du comité de normalisation IEC TC120 (systèmes de stockage d'énergie électrique : TS 62933-5-1 (2017, en cours de révision), 62933-5-2 (2020) (en cours de révision)). L'efficacité de ce plan dépend du niveau de formation des experts en la matière et des premiers intervenants, de la connaissance du système d'alimentation électrique en panne, de la coordination avec les pompiers, etc.

L'exploitation de l'accidentologie montre que dans de nombreux cas (Liverpool, Drogenbos, Arizona, Perles et Castelet...), il n'y avait pas de plan d'urgence correctement établi.

Les premiers intervenants peuvent être le personnel du site, les employés de l'entreprise, les techniciens locaux et les experts en la matière qui peuvent être les premiers à détecter ou à réagir à une défaillance ou à un défaut du système et à alerter les services d'incendie. Dans ce cas, le terme "premiers intervenants" ne fait pas référence aux pompiers ou à d'autres membres du personnel des services d'incendie, mais à ceux qui signaleront l'événement ou dirigeront les services d'incendie en ce qui concerne les risques posés par le système. Les conseils de ces personnes, ainsi que les informations contenues dans le plan d'intervention d'urgence, serviront de réponse humaine initiale à l'incident et auront les meilleures chances de contenir l'incident, s'il peut être contenu, à un état réduit. En fonction du temps de détection, du temps de la première réponse et de l'intervention des pompiers, l'incident peut avoir progressé par de multiples voies de conséquences, car la défaillance d'une seule cellule peut se propager aux modules adjacents en l'espace de quelques minutes.

Le plan d'intervention d'urgence doit aborder la manière dont ces premiers intervenants, réagissent aux urgences au sein du système. Cela peut inclure un plan de gestion des alarmes distinct pour déterminer quelles informations sont essentielles pour les intervenants, les seuils critiques des paramètres et les dangers potentiels indiqués par les alarmes. La familiarité du premier intervenant avec le document ainsi que l'efficacité globale du document peuvent permettre de gagner du temps sur l'intervention. Par conséquent, le plan d'intervention d'urgence ainsi que la compétence des experts doivent être évalués en fonction de leur efficacité à interagir avec le service d'incendie.

Les premiers intervenants peuvent manquer d'expérience à la fois en matière de technologie et d'intervention d'urgence, et l'industrie ne dispose pas actuellement des meilleures pratiques en matière de formation formelle et de programme standard.

En ce qui concerne les pompiers, l'efficacité est basée sur le niveau de connaissance et de formation du service pour répondre efficacement de manière offensive et défensive lors d'un incident. Cette barrière comprend tous les aspects de l'intervention du service d'incendie, y compris le personnel, les ressources, les connaissances et le niveau de confort général apporté sur les lieux. La formation actuelle de l'industrie et la planification des interventions d'urgence laissent entrevoir l'envoi automatique de plusieurs camions ou services/stations en cas d'urgence ou d'alarmes multiples dans certaines juridictions. Dans ces cas, un commandement clair de l'incident est nécessaire pour s'assurer que les services correctement formés au système sont en mesure de diriger l'intervention. De plus, l'intervention des services d'incendie sera soutenue par des experts, dont les connaissances peuvent avoir un impact considérable sur l'intervention des services d'incendie. Enfin, la connaissance de la situation (par exemple, les systèmes de détection / panneau contrôle incendie) agira comme le multiplicateur final, entraînant des décisions qui peuvent sauver les systèmes actuellement touchés ou adjacents ou entraîner la perte de l'ensemble du projet.

4. Conclusion

La présente note a permis de recenser les principaux dispositifs généralement déployés dans les containers batteries Li-ion visant une maîtrise des risques d'incendie et d'explosion, en s'appuyant sur les rapports d'accidents, les données disponibles dans la littérature et les collaborations de l'Ineris avec des partenaires externes.

Lors de la conception et de la mise en œuvre d'un système de stockage conteneurisé Li-ion, il convient de tenir compte de certaines considérations importantes 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 issus de la batterie ;
- une intervention sûre et efficace des services d'urgence soit possible.

Ainsi des barrières performantes et efficaces « multicouches » doivent être mises en place à toutes les échelles (cellules, modules, racks, systèmes, parc batteries) afin de minimiser la propagation en cascade d'un emballement thermique à partir d'une cellule ou module et d'atténuer les conséquences associées à un incendie, un dégagement de gaz toxique ou une explosion potentielle. Il s'agit de barrières de sécurité préventives et de protection. Ces barrières sont représentées dans la Figure 14.

Les barrières préventives comprennent la qualité de fabrication/conception des cellules, la maîtrise des conditions environnementales, les fonctions de sécurité assurées par le BMS, la détection redondante des défaillances et l'intelligence du système, le report des alertes/alarmes en temps réel dès la mise en service du système ou encore 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 a été défaillante dans au moins un incident impliquant un système de stockage stationnaire.

Les barrières de protection comprennent notamment la détection, 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 container mais aussi de container en container, l'élaboration de plan d'intervention d'urgences et l'intervention. L'analyse de l'accidentologie montre que soit la barrière de protection a été inefficace (dispositif d'extinction par exemple), soit le système de stockage ne disposait pas de cette barrière (trappes anti-explosion par exemple).

Cette note montre que la conception du système et des barrières de prévention, le choix des barrières de protection (technologies de détecteurs, de systèmes d'extinction et de protection contre l'explosion), le report des alarmes et des défauts représentent un ensemble de barrières interconnectés multi-niveaux. A titre d'exemple, une détection précoce et rapide est essentielle pour déclencher les actions associées.

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). Toutefois, des essais et des données supplémentaires à grande échelle sont nécessaires pour déterminer les exigences efficaces et normatives en matière d'extinction.

De nombreux systèmes sur le marché aujourd'hui n'ont pas la capacité de se protéger contre l'accumulation de gaz explosifs. Compte tenu des retours d'expérience de l'accidentologie, des conceptions récentes de container prévoient des trappes anti-explosion sur le toit du container dimensionné pour s'ouvrir en cas d'explosion d'un nuage de gaz provenant des batteries ainsi que des dispositifs de ventilation pouvant être actionnée 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 intervenants de secours extérieurs est essentielle pour assurer une intervention sûre lors d'un évènement sur un système de stockage stationnaire Li-ion.

Enfin, des évolutions importantes en matière d'encadrement normatif (à l'international) et réglementaire (en France, en Angleterre, en Europe,...) sont en cours dans le but de renforcer les dispositions, d'améliorer la sécurité des systèmes de stockages stationnaires et de protéger efficacement les installations et les personnes ; elles permettront de consolider les mesures de prévention et de protection évoquées dans ce rapport.

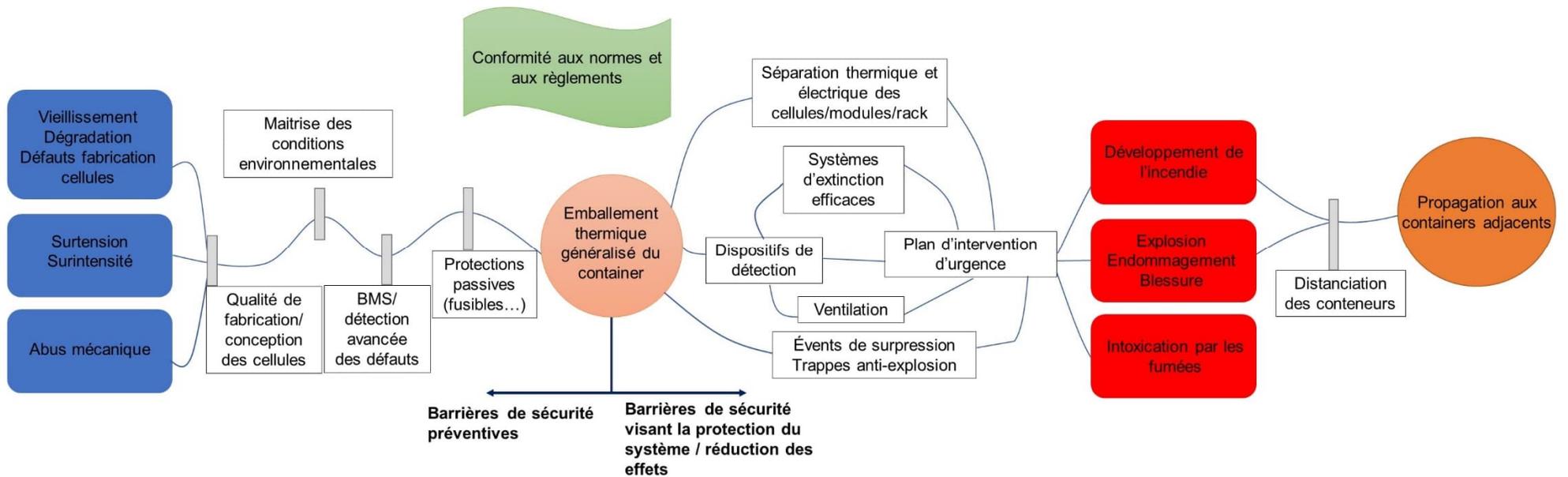


Figure 14 : Schéma représentant les barrières de sécurité préventives et de protection des systèmes de stockage stationnaires Li-ion conteneurisés – librement inspiré des références ²⁷ et ⁴²

-
- ¹ Choi and al. Li-ion battery technology for grid application Journal of Power Sources 511 (2021) 230419
- ² Victoria Hutchison, LI-ION BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEMS: Effect of Separation Distances based on a radiation Heat Transfer Analysis, WPI June 2017
- ³ Brian M. Barnett, TIAX LLC, présentation PowerPoint at 3rd International Symposium on large Lithium Ion battery Technology and Applications, « Understanding Safety of Lithium-ion Batteries », May 2007
- ⁴ Paul Christensen – Electric vehicles & risks to first responders' by Paul Christensen from Newcastle University – FABIG 21.09.22
- ⁵ Schéma adapté de S. Cummings, L. Florence, C. Foster, NFPA Standard 855 and the International Fire Code. Energy storage association. Webinar presentation. 28/06/2018
- ⁶ <https://www.batteriesinternational.com/2020/12/04/2020-year-of-the-lithium-battery-fire/>
- ⁷ <https://www.energy-storage.news/news/overheating-reports-prompt-lg-energy-solution-battery-recall>
- ⁸ <https://www.bestmag.co.uk/content/lg-chem-extends-ess-recall-after-concerns-over-heating-lithium-ion-batteries>
- ⁹ <https://www.batteriesinternational.com/2020/12/04/2020-year-of-the-lithium-battery-fire/>
- ¹⁰ Jan SWART, APS McMicken Progress Report, Exponent, 30 July 2020
- ¹¹ M. Rosen. Energy Storage Integration Council (ESIC) Energy Storage Reference Fire Hazard Mitigation Analysis. 3002023089. Décembre 2021
- ¹² ANDY BLUM, REPORT OF TECHNICAL FINDINGS, Victorian Big Battery Fire : July 30th, 2021
- ¹³ Rapport Ineris - 201651 - 2712965 - v1.0 : BMS : Fonctions importantes pour la sécurité des systèmes de stockage d'énergie électrochimique Lithium-Ion pour les usages stockage stationnaire et e-mobilité. 10.06.2021. <https://www.ineris.fr/fr/roles-systemes-gestion-batterie-battery-management-systems-securite-packs>
- ¹⁴ DNV-GL-RP-0043. Recommended practice. Safety, operation and performance of grid-connected energy storage systems, Ed. September 2017.
- ¹⁵ <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/us/Documents/consulting/us-five-in-5-cybersecurity-in-the-energy-sector.pdf>
- ¹⁶ Rapport Ineris référence DRA-17-164432-10199B. Evaluation de la performance des barrières techniques de sécurité Oméga 10. 23/05/2018. https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/DRA-17-164432-10199B_OMEGA10_VF_.pdf
- ¹⁷ UL Fire Research and development report. UL 9540A Installation Level tests with outdoor Lithium-ion Energy Storage System Mockups. Avril 2021.
- ¹⁸ Petra Andersson, Johan Wikman, Magnus Arvidson, Fredrik Larsson, Ola Willstrand. Safe introduction of battery propulsion at sea. SP Rapport 2017:34
- ¹⁹ Fernandes, Y. ; Bry, A. ; S. de Persis. Identification and quantification of gases emitted during abuse tests by overcharge of a commercial Li-ion battery. Journal of Power Sources 389, 106-119 (2018)
- ²⁰ Fernandes, Y. ; Bry, A. ; S. de Persis. Identification and quantification of gases emitted during abuse tests by overcharge of a commercial Li-ion battery. Journal of Power Sources 389, 106-119 (2018)
- ²¹ Ribière, P.; Grugeon, S.; Morcrette, M.; Boyanov, S.; Laruelle, S.; Marlair, G. Investigation on the fire-induced hazards of Li-ion battery cells by fire calorimetry. Energy Environ. Sci., 2012, 5, 5271
- ²² Eshetu G.G., Bertrand, J-P. ; Lecocq. A.; Grugeon, S.; Laruelle, S.; Armand, M.; Marlair, G. Fire behavior of carbonates-based electrolytes used in Li-ion rechargeable batteries with a focus on the role of the LiPF₆ and LiFSI salts. Journal of Power Sources 269 (2014) 804-811
- ²³ Lecocq. A.; Eshetu G.G., Grugeon, S.; Martin, N.; Laruelle, S.; Marlair, G. Scenario-based prediction of Li-ion batteries fire-induced toxicity. Journal of Power Sources 316 (2016) 197e206
- ²⁴ Règlement néerlandais pour le stockage sûr de l'électricité dans les systèmes de stockage d'énergie.
- ²⁵ Fire safety products and systems. Brochure Siemens. <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:e9135bcc-effa-4395-9d68-72943f124301/lithium-ion-battery-storage-systems-brochure.pdf>

-
- ²⁶ DNV-GL Report N° 2019-1025, Rev 4. Technical Reference for Li-ion Battery Explosion Risk and Fire suppression. 01.11.2019
- ²⁷ R. Stokes & al. Mitigating the hazards and risks associated with Li-ion battery Energy Storage. Fabig Newsletter. Issue 084. October 2022.
- ²⁸ FM Global Property Loss Prevention Data Sheets 5-33. Electrical Energy Storage Systems - January 2017 Interim Revision July 2020
- ²⁹ Wang, Q., Mao, B., Stolarov, S.I., et al., "A review of lithium ion battery failure mechanisms and fire prevention strategies," March 2019, Progress in Energy and Combustion Science.
- ³⁰ Amed O. Said, Analysis of effectiveness of suppression of lithium ion battery fires with a clean agent Fire Safety Journal 121 (2021) 103296
- ³¹ Federal Aviation Administration. Extinguishment of lithium-ion and lithium metal battery fires. DOT/FAA/TC-13/53. Janvier 2014.
- ³² Rapport d'Enquête sur l'incendie d'un container de stockage de batteries au sein du poste de transformation RTE de Perles et Castelet (09) le 1er décembre 2020. 27/07/2021
- ³³ Tong Liu. Cooling control effect of water mist on thermal runaway propagation in lithium ion battery modules. Applied Energy 267 (2020) 115087
- ³⁴ Xu, J. The enhanced cooling effect of water mist with additives on inhibiting lithium ion battery thermal runaway. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 77 (2022) 104784
- ³⁵ Zhang L. Experimental investigation of water spray on suppressing lithium-ion battery fires Fire Safety Journal 120 (2021) 103117
- ³⁶ Ji. C. Simulation Investigation of Water Spray on Suppressing Lithium-Ion Battery Fires. Fire Technology. <https://doi.org/10.1007/s10694-022-01302-6>
- ³⁷ Mohammadmahdi, G., et al., "A Review of Lithium-Ion Battery Fire Suppression," Energies 2020, 13(19), 5117; <https://doi.org/10.3390/en13195117>
- ³⁸ Benjamin Ditch, Dong Zeng. Development of Sprinkler Protection Guidance for Lithium Ion Based Energy Storage Systems. Research Technical Report. FM Global. Juin 2019
- ³⁹ Benjamin Ditch. Prestation "Update: development of sprinkler protection for LIB energy storage systems. SFPE Europe Conference Fire Safety Engineering. 22-23 May 2019. Malaga, Spain
- ⁴⁰ Rapport Ineris DRA-18-172844-09674A. Programme DRA06-Opération II.3. : stockage électrochimique – moyens d'extinction. Pour MTES. Juillet 2019.
- ⁴¹ <https://www.pnnl.gov/available-technologies/intellivent>
- ⁴² Stokes R. Overview of Li-ion battery energy storage system failures and risk management considerations. Process Saf Prog. 2022;41:437–439.

