ARMATEURS DE FRANCE

MINISTÈRE CHARGÉ DE LA MER ET DE LA PÊCHE
*Liberté*
*Égalité*
*Fraternité*

MARINS-POMPIERS DE MARSEILLE

# RAPPORT ANALYTIQUE

## PROCÉDURES OPÉRATIONNELLES, MATÉRIELS ET SYSTÈMES DE LUTTE CONTRE L'EMBALLEMENT THERMIQUE DES BATTERIES LI-ION DANS LES VÉHICULES ÉLECTRIQUES ET HYBRIDES TRANSPORTÉS À BORD DES NAVIRES: **SOLUTIONS POUR LE MONDE MARITIME.**



## PRÉAMBULE

Ce rapport, rédigé dans le cadre du groupe de travail national relatif aux feux de véhicules, d'engins électriques et de batteries lithium-ion à bord des navires, catégorise les solutions existantes en trois piliers stratégiques : les mesures de prévention pré-événement (gestion thermique active, gestion de la charge, équilibrage, etc.), les méthodes d'atténuation post-défaillance (barrières passives, actives, et dispositifs du pack batterie), et l'approche opérationnelle. L'analyse révèle une évolution technologique constante, passant des systèmes de refroidissement par air, aujourd'hui jugés moins performants, aux systèmes de refroidissement liquide qui dominent le marché. L'émergence de technologies comme le refroidissement par immersion se positionne comme une avancée qui permettrait de renforcer le niveau de sécurité en limitant le risque d'apparition et de propagation d'un emballement thermique. Parallèlement, l'intégration de barrières passives permettant de faire face à des situations d'urgence telles que les aérogels et de polymères ignifuges contribue à une stratégie de sécurité multicouche. L'industrie est de plus en plus encadrée par des normes sophistiquées comme l'amendement à l'ISO 6469-1, qui mettent l'accent sur l'évaluation des performances de sécurité plutôt que sur de simples critères de conformité. Ce rapport démontre qu'une approche holistique, combinant des innovations technologiques, une ingénierie de pointe et une préparation opérationnelle rigoureuse, est essentielle pour renforcer la sécurité du transport maritime confronté au développement de l'électromobilité.

**SOMMAIRE**


**1. COMPRENDRE L'ENJEU DE L'EMBALLEMENT THERMIQUE 6**
1.1. Définition et processus fondamental de l'emballement thermique 6
1.2. Facteurs déclencheurs et conséquences critiques 6
1.2.1. Abus électriques 6
1.2.2. Abus mécaniques 6
1.2.3. Abus thermiques 6
1.2.4. Défauts de fabrication et vieillissement 7
1.2.5. Conséquences 7
1.3. Mécanismes et progression de l'emballement thermique 7
1.4. Rôle critique des composants 8
1.5. Dégagement de gaz toxiques et inflammables 8
1.6. Synthèse des causes et manifestations de l'emballement thermique des batteries Li-Ion 9

**2. ÉLÉMENTS DE DOCTRINE, APPROCHE SYSTEMIQUE « SOURCE-FLUX-CIBLE » 9**
2.1. Agir sur la source 10
2.2. Catalogue des solutions de prévention et d'atténuation 10
2.2.1. Gestion thermique active : systèmes de refroidissement intégrés 10
2.2.1.1. Refroidissement par air 10
2.2.1.2. Refroidissement par liquide 11
2.2.1.3. Refroidissement par pompe à chaleur 11
2.2.1.4. Refroidissement par immersion (technologie émergente) 11
2.2.1.5. Synthèse 12
2.3. Barrières et matériaux passifs : limiter la propagation 12
2.3.1. Les aérogels 12
2.3.2. Les matériaux à changement de phase 12
2.3.3. Les polymères retardateurs de flamme 13
2.4. Les systèmes de détection prédictive 13
2.4.1. Dispositifs basés sur des capteurs physiques 13
2.4.1.1. Surveillance de la température (surchauffe) 14
2.4.1.2. Surveillance des gaz et de la pression (dégazage) 14
2.4.1.3. Surveillance Électrique 14
2.4.2. Systèmes de modélisation et prédiction (Intelligence Artificielle) 15
2.4.3. Synthèse des enjeux Clés 16

**3. APPROCHE OPÉRATIONNELLE 16**
3.1. Agir sur les Flux 16
3.1.1. Confinement et ségrégation 16
3.1.2. Gestion des gaz et fumées 17
3.1.3. Techniques de lutte adaptées 17
3.2. Agir sur les cibles 17
3.2.1. Évacuation et sécurité des passagers et équipages 17
3.2.2. Protection des équipes d'intervention du bord 17
3.2.3. Protection des biens et de l'environnement 17
3.3. Rappel environnemental 18
3.3.1. Les navires rouliers (RO-RO, RO-PAX, PCTC) 18

3.3.2. Chargement en conteneurs 18
3.4. Fiches opérationnelles 19
3.5. Logigramme d'aide à la décision 21
3.6. Guidelines 22
3.7. Les installations fixes 24
3.7.1. Les dispositifs à eau basse pression 24
3.7.1.1. Fonctionnement 24
3.7.2. Les dispositifs haute pression 24
3.7.2.1. Fonctionnement 24
3.7.3. Les dispositifs à $CO_2$ 25
3.7.3.1. Fonctionnement 25
3.8. Les dispositifs mobiles 26
3.8.1. Lances traditionnelles à haut débit 26
3.8.1.1. Efficacité vis-à-vis de la batterie 26
3.8.1.2. Intérêt majeur à bord des navires 26
3.8.1.3. Recommandations opérationnelles 27
3.8.2. Les dispositifs de refroidissement sous-châssis 27
3.8.2.1. Principe 28
3.8.2.2. Intérêt par rapport aux lances perforantes 29
3.8.2.3. Limite fondamentale 29
3.8.2.4. Essais et maturité 29
3.8.3. Avantages et inconvénients du refroidissement par le dessous 30
3.9. Les dispositifs de perforation basse pression 30
3.9.1. Principe de fonctionnement 30
3.9.2. Avantages 31
3.9.3. Limites 31
3.9.4. Problème doctrinal majeur 31
3.9.5. Positionnement opérationnel 31
3.10. Les dispositifs de perforation haute pression 32
3.10.1. Principe 32
3.10.2. Maturité technologique (TRL) 32
3.10.3. Retour d'expérience Cobra 33
3.10.4. Risques 33
3.10.5. Intérêt maritime 33
3.10.6. Recommandation 34
3.11. Dispositif de perforation commandé à distance 34
3.12. Le système « *Battery Briner* » 35
3.12.1. Principe 35
3.12.2. Objectif 36
3.12.3. Niveau de maturité technologique 36
3.12.4. Performances annoncées 37
3.12.5. Elément important pour une doctrine opérationnelle 37
3.12.6. Etat de la réglementation et de la certification 37
3.12.7. Ce qui est démontré/ce qui reste à démontrer 38
3.12.8. Synthèse 38
3.13. Tableau comparatif d'efficacité des matériels 39

3.14. Les dispositifs de turbines à brouillard d'eau 40
3.14.1. Identification du dispositif 40
3.14.2. Description et principe de fonctionnement 40
3.14.3. Application maritime 40
3.15. Extincteurs portatifs et leurs agents extincteurs 41
3.15.1. Dispersion aqueuse de vermiculite (DAV) 41
3.15.1.1. Identification et agent extincteur 41
3.15.1.2. Principe de fonctionnement 42
3.15.1.3. Domaine d'application (portatif) 42
3.15.2. Type à hydrogel (agents gélifiants) 42
3.15.2.1. Identification et agent extincteur 42
3.15.2.2. Principe de fonctionnement 42
3.15.2.3. Domaine d'Application (portatif) 42
3.15.3. Conclusion pour les navires 43
3.16. Les couvertures anti-feu 43
3.16.1. Types 43
3.16.1.1. Principe de fonctionnement 44
3.16.2. Avantages et inconvénients en milieu maritime 44

**4. CADRE RÉGLEMENTAIRE ET NORMES DE SÉCURITÉ 45**
4.1. Normes de conception et d'essais 45
4.2. Normes de transport et de stockage 46

**5. ÉTAT DE L'ART ET PERSPECTIVES 46**
5.1. État de l'art et feuille de route technologique 46
5.2. Recommandations 46

**6. SOURCES 46**
6.1. INERIS – Référence française 46
6.2. RISE – Essais de projection d'eau 46
6.3. RISE – Essais grandeur réelle sur ferry Ro-Ro 47
6.4. EMSA / Bureau Veritas / RISE – STARRS 47
6.5. EMSA – Guidance AFV 47
6.6. Chen et al. – Brouillard d'eau 47
6.7. Hal open science 47

# 1. COMPRENDRE L'ENJEU DE L'EMBALLEMENT THERMIQUE

## 1.1. Définition et processus fondamental de l'emballement thermique

L'emballement thermique d'une batterie lithium-ion est une réaction en chaîne exothermique auto-alimentée, qui se déclenche lorsque la température de la batterie atteint un seuil critique. Contrairement à une idée reçue, l'incendie n'est pas forcément l'événement initial, mais aussi la résultante d'un processus complexe de dégradation. Le phénomène débute souvent par un dysfonctionnement interne, tel qu'un court-circuit ou à une défaillance du séparateur poreux en polyéthylène ou polypropylène qui sépare l'anode et la cathode.

La compréhension de ce processus est d'autant plus cruciale que le risque ne se limite pas à la cellule d'origine, mais réside dans sa capacité à se propager aux cellules adjacentes, créant un effet domino au niveau du pack. La propagation thermique se produit par plusieurs voies distinctes. La conduction de cellule à cellule est la voie la plus directe, où la chaleur se transfère par contact physique. La convection naturelle intervient lorsque les gaz chauds, éjectés lors de la combustion, se propagent rapidement à travers les espaces d'air du module, chauffant directement les cellules voisines. Enfin, le flux radiatif ainsi que l'éjection de particules enflammées sont des voies de propagation violentes et érosive, où des fragments de matière riches en combustible sont expulsés, réagissant violemment avec l'air ambiant et déclenchant directement d'autres cellules. La multiplicité de ces vecteurs de propagation souligne qu'une seule stratégie pour limiter la propagation est insuffisante. Il est à noter que l'action de lutte/refroidissement est rendue difficile par les différents modes de propagation et aussi par la nature des gaz libérés et la production d'oxygène par les composants de la batterie. Ainsi, une approche de sécurité efficace doit être un ensemble de mesures, ciblant non seulement la prévention de l'événement initial, mais aussi le confinement de sa propagation par toutes les voies possibles.

## 1.2. Facteurs déclencheurs et conséquences critiques

L'emballement thermique peut être initié par diverses défaillances internes ou conditions externes, généralement classées comme des « conditions d'abus ».

### *1.2.1. Abus électriques*

- Surcharge : l'application d'une tension ou d'un courant excessif au-delà des limites de conception de la batterie entraîne un échauffement Joule important, ce qui peut déstabiliser la batterie et la rendre très sensible aux problèmes de sécurité thermique. Une surcharge prolongée peut également provoquer le dépôt de lithium métallique, augmentant la résistance interne et la génération de chaleur.
- Court-circuit interne/externe : les courts-circuits internes, le plus souvent dus à une défaillance du séparateur, sont généralement considérés comme la cause principale de l'emballement thermique. Les courts-circuits externes, bien que moins directs, peuvent également endommager la batterie et initier le processus.
- Surcharge/décharge excessive : la surcharge et la décharge excessive sont identifiées comme des conditions d'abus électriques pouvant déclencher des réactions parasitaires et exothermiques.

### *1.2.2. Abus mécaniques*

Des dommages physiques tels qu'une collision, un écrasement, un pincement ou une perforation peuvent compromettre l'intégrité structurelle de la batterie, entraînant des courts-circuits internes et un emballement thermique subséquent. Une préoccupation croissante et significative est l'élimination inappropriée, où les batteries sont écrasées dans des installations de traitement des déchets ou de recyclage, provoquant directement des incendies et des explosions.

### *1.2.3. Abus thermiques*

L'exposition à des températures ambiantes excessivement élevées ou à une surchauffe externe peut entraîner la fusion du séparateur, déclenchant des courts-circuits internes et le début de l'emballement thermique. Il est crucial de noter que tenter de refroidir une batterie Li-Ion en surchauffe en la plaçant

dans un réfrigérateur ou un congélateur est extrêmement dangereux, car cela peut exacerber le risque d'explosion et d'incendie.

### *1.2.4. Défauts de fabrication et vieillissement*

Des défauts de conception, des matériaux de mauvaise qualité ou des erreurs lors des processus de fabrication et d'assemblage peuvent créer des défaillances internes latentes qui se manifestent par un emballement thermique. De plus, le processus de vieillissement naturel d'une batterie peut dégrader ses composants, augmentant la probabilité de courts-circuits internes ou d'autres défaillances au fil du temps.

Le comportement des utilisateurs, en particulier les pratiques de charge inappropriées et l'élimination incorrecte, constitue un facteur critique, souvent négligé et pourtant hautement évitable, dans un nombre significatif d'incidents impliquant des batteries Li-Ion. La surcharge est une cause directe d'emballement thermique, et de nombreux incidents se produisent pendant la charge. L'élimination inappropriée des batteries conduit à leur écrasement dans les installations de traitement des déchets, provoquant des incendies. Il existe un important manque de sensibilisation du public concernant la sécurité des batteries Li-Ion, et de nombreuses personnes « ne savent pas comment gérer ces technologies et appareils émergents en toute sécurité ». Cela signifie que, si les défauts de fabrication et la chimie inhérente des batteries contribuent au risque, une partie substantielle des incidents découle d'actions humaines évitables ou d'un manque de connaissances. Cela souligne que les solutions techniques seules sont insuffisantes ; l'éducation des utilisateurs est une composante vitale de l'atténuation des risques. Il est donc urgent de mener des campagnes de sensibilisation du public et des équipages généralisées, insistant sur les pratiques de charge sûres (par exemple, « ne jamais charger sans surveillance », « débrancher après la charge »), la manipulation correcte (par exemple, « ne pas mettre au congélateur »), et les méthodes d'élimination appropriées. De telles campagnes compléteraient les dispositifs de sécurité techniques et les efforts réglementaires, créant un écosystème de sécurité plus robuste.

### *1.2.5. Conséquences*

Les conséquences d'un emballement thermique sont particulièrement graves et représentent des risques majeurs pour la sécurité. Au-delà des flammes et de la chaleur extrême qui peut dépasser mille degrés Celsius, une des menaces les plus importantes est le dégagement de gaz toxiques, y compris l'acide fluorhydrique qui est extrêmement corrosif et dangereux en cas d'inhalation. De plus, l'accumulation de gaz dans un espace confiné peut entraîner une explosion, un risque accru dans des environnements tels que les ponts garages, cales et conteneurs. Une autre conséquence critique est le risque de ré-inflammation de la batterie. Le dégagement de chaleur peut continuer pendant des heures, voire des jours, et des tests ont montré qu'une batterie peut se ré-enflammer jusqu'à 24 heures après le début d'un incident, ce qui rend la surveillance post-extinction impérative pour les services de secours et les équipages. Ces multiples dangers soulignent la nécessité d'une réponse de sécurité globale, qui intègre la prévention, l'atténuation et une intervention d'urgence bien coordonnée.

## 1.3. Mécanismes et progression de l'emballement thermique

Le processus classique de l'emballement thermique peut être décrit en quatre phases principales.

- Phase 1 : l'amorce/auto-échauffement : cette phase initiale implique une augmentation progressive de la température à partir des conditions ambiantes, atteignant environ 80-150 °C. Au cours de cette étape, la couche d'interphase électrolyte solide (IES), qui protège normalement l'anode, commence à se décomposer (généralement entre 80 et 120 °C), libérant des gaz tels que C2H4, $CO_2$, $O_2$ et $H_2$. Cette décomposition est une réaction exothermique, contribuant à un auto-échauffement supplémentaire.
- Phase 2 : rampe ou accélération : à mesure que les températures continuent d'augmenter, la décomposition de l'IES expose le matériau de l'anode hautement réactif à l'électrolyte, déclenchant des réactions exothermiques plus importantes. Simultanément, le séparateur poreux, crucial pour empêcher le contact direct entre les électrodes, commence à fondre et à se décomposer (polyéthylène à ~127 °C, polypropylène à ~165 °C), entraînant des micro-courts-circuits. Cette phase est caractérisée par une augmentation notable du taux d'auto-échauffement (par exemple, >0,2 °C/minute), et des signes observables tels que le dégazage et la fumée peuvent apparaître. Il

est crucial de noter qu'une intervention rapide pendant cette phase *pourrait* encore empêcher l'escalade complète vers la Phase 3.

- Phase 3 : emballement/auto-inflammation : c'est le point de non-retour. L'effondrement complet du séparateur entraîne un court-circuit franc et direct entre l'anode et la cathode, provoquant une décharge incontrôlée de l'énergie stockée dans la batterie. Les températures augmentent rapidement, atteignant souvent l'auto-inflammation autour de 200 °C, entraînant une combustion rapide et vigoureuse. Le taux d'auto-échauffement dépasse généralement 10 °C/minute. Une fois cette phase atteinte, l'emballement thermique devient inévitable et ne peut être arrêté. Si la batterie fait partie d'un bloc plus grand, la chaleur et la pression intenses peuvent se propager aux cellules adjacentes, initiant une réaction en chaîne.
- Phase 4 : destruction/fin de la combustion : cette dernière phase implique la destruction totale de la ou des cellules affectées. La combustion se poursuit jusqu'à ce que tous les composants réactifs de la batterie soient consommés, ou que l'incendie soit éteint avec succès. Un défi important dans cette phase est le risque de ré-inflammation, même après la suppression des flammes initiales, en raison de la chaleur résiduelle dans le cœur de la batterie.

### 1.4. Rôle critique des composants

- Électrolyte : la majorité des électrolytes organiques liquides sont hautement combustibles et participent à des réactions exothermiques avec les matériaux des électrodes. Leur décomposition et leur évaporation à des températures élevées libèrent des gaz hautement inflammables.
- Séparateur : l'intégrité du séparateur poreux est primordiale. Sa défaillance (fusion, perforation ou décomposition) est le principal déclencheur des courts-circuits internes, qui initient directement l'emballement thermique.
- Électrodes (cathode et anode) : à des températures élevées, le matériau de la cathode se décompose, libérant de l'oxygène. Cet oxygène généré en interne alimente la combustion de l'électrolyte et de l'anode, créant un incendie auto-entretenu difficile à maîtriser. Les réactions entre l'anode et l'électrolyte produisent également des hydrocarbures inflammables.

### 1.5. Dégagement de gaz toxiques et inflammables

Les événements d'emballement thermique s'accompagnent de la libération d'une quantité substantielle de chaleur et d'une variété de gaz nocifs, posant de graves risques pour la santé, l'incendie et la sécurité. Ces gaz comprennent le C2H4, le $CO_2$, l'$O_2$, le $H_2$, le C3H6, le C2H2, le CH4, le CO, et, de manière significative, le fluorure d'hydrogène (HF). Le fluorure d'hydrogène est extrêmement toxique et peut être fatal s'il est inhalé, même à de faibles concentrations. La détection de ces gaz, en particulier aux premiers stades, peut fournir une alerte précoce cruciale d'un événement d'emballement thermique imminent.

Les réactions chimiques spécifiques et l'évolution des gaz pendant l'emballement thermique présentent des dangers uniques et graves au-delà de la combustion typique, ce qui modifie fondamentalement les principes de suppression des incendies et exige une formation et un équipement spécialisés pour les équipages et les services d'incendie et de secours. L'emballement thermique des batteries Li-Ion implique la décomposition de composants internes (IES, électrolyte, cathode). Cette décomposition libère non seulement des gaz inflammables (hydrocarbures, H2) mais aussi de l'oxygène provenant du matériau de la cathode. La génération interne d'oxygène signifie que l'incendie est « auto-entretenu » et peut brûler même dans des environnements à faible teneur en oxygène, rendant la suppression par gaz inerte (par exemple, $CO_2$) inefficace. Une accumulation rapide de pression à l'intérieur de la cellule conduit à un dégazage ou à une rupture, avec un potentiel de force explosive. Cette combinaison de facteurs implique que les tactiques de lutte contre les incendies de batteries Li-Ion ne peuvent pas reposer uniquement sur la privation d'oxygène ou les agents extincteurs standard de classe A/B. Les objectifs principaux se déplacent vers un refroidissement rapide pour empêcher la propagation, la gestion des fumées toxiques et la protection du personnel contre les phénomènes explosifs. Cela exige un changement de paradigme dans la doctrine d'intervention d'urgence, nécessitant des équipements de protection individuelle (EPI) spécialisés, une formation avancée sur les dangers chimiques et des approches tactiques adaptées qui privilégient le refroidissement et la limitation des effets plutôt que les méthodes d'extinction traditionnelles. Cela souligne également l'importance de la détection de gaz pour l'alerte précoce et la sécurité du site après l'incident.

### 1.6. Synthèse des causes et manifestations de l'emballement thermique des batteries Li-Ion

| Catégorie de cause | Exemples de déclencheurs | Mécanismes clés | Manifestations observables |
|---|---|---|---|
| **Abus électriques** | Surcharge, court-circuit (interne/externe), décharge excessive. | Auto-échauffement, décomposition IES, réactions électrode-électrolyte, court-circuit interne, génération de gaz ($H_2$, $CO_2$). | Gonflement de la batterie, fuite d'électrolyte, fumée, forte chaleur, bruits secs (« pop »), arcs électriques. |
| **Abus mécaniques** | Choc, perforation, écrasement. | Rupture du séparateur, court-circuit interne, auto-échauffement, propagation cellule-à-cellule. | Déformation/perforation de la batterie, fumée, dégagement de gaz toxiques/inflammables, flammes intenses, projections, explosions. |
| **Abus thermiques** | Exposition à hautes températures, surchauffe externe. | Fusion/décomposition du séparateur, auto-inflammation, réactions électrode-électrolyte, génération de gaz ($O_2$, HF). | Forte chaleur, fumée, dégagement de gaz toxiques/inflammables, flammes intenses, explosions. |
| **Défauts de fabrication/ vieillissement** | Défauts de conception, qualité de fabrication, vieillissement des composants. | Défaillance progressive des composants, court-circuit interne latent, décomposition IES, réactions exothermiques. | Déformation/gonflement de la batterie, fuite d'électrolyte, fumée, chaleur anormale (peut être subtile au début). |

## 2. ÉLÉMENTS DE DOCTRINE, APPROCHE SYSTEMIQUE « SOURCE-FLUX-CIBLE »

Le modèle « Source, Flux, Cibles » est un cadre d'analyse des risques largement utilisé en sécurité incendie et en gestion des risques environnementaux, permettant une évaluation systématique des impacts potentiels des dangers. Il décompose le système d'incendie en trois éléments interconnectés :

- source : la source désigne l'origine ou le point de libération du danger. L'identification et la caractérisation de la source sont essentielles pour comprendre la nature et l'importance du danger, et pour prioriser les efforts de gestion des risques. Pour une batterie Li-Ion, la source est la cellule ou le pack qui subit l'emballement thermique, avec ses caractéristiques intrinsèques (chimie, énergie stockée) et les facteurs déclencheurs (surcharge, dommage mécanique, défaut de fabrication). Des dispositions techniques spécifiques sont prises en amont et détaillées dans le catalogue des solutions de prévention et d'atténuation au paragraphe 2.2. **;**
- flux : le flux décrit la voie ou le mécanisme par lequel le danger se déplace de la source vers les récepteurs potentiels. Dans le cas d'un incendie, cela inclut le mouvement des fumées chaudes, des gaz toxiques, de la chaleur rayonnante, des projections de flammes et de particules, ainsi que l'apport d'air frais qui alimente la combustion. L'évaluation des flux implique l'analyse des processus physiques et chimiques qui régissent le mouvement et la transformation des sous-produits de l'incendie dans l'environnement **;**
- cibles : les cibles désignent les organismes, les écosystèmes ou les populations humaines qui peuvent être exposés au danger et potentiellement affectés par sa présence. Pour un incendie, les cibles comprennent les victimes (passagers, équipages, pompiers), les biens (véhicules adjacents, chargement, navire), et l'environnement (contamination des sols, de l'air, du milieu marin). L'évaluation des cibles implique l'identification et la caractérisation de leurs vulnérabilités, sensibilités et voies d'exposition.

Ce modèle est un outil d'aide à la décision pour les équipages de navires et les services d'incendie et de secours, pratique et compréhensible. Le chapitre 3 détaille les différents modes d'actions envisagées sur les flux et les cibles.

## 2.1. Agir sur la source

La stratégie la plus efficace consiste à agir directement sur l'origine du danger. Pour les batteries Li-Ion, cela implique des dispositions préventives des causes de l'emballement thermique sur le cycle de vie des batteries.

- Conception et fabrication : encourager l'utilisation de chimies plus stables et l'intégration de systèmes de gestion de batterie (*battery management system* **(**BMS**)**) avancés. Le BMS doit être conçu pour prévenir la surcharge, la décharge excessive, les courts-circuits et la surchauffe. Des vannes antidéflagrantes peuvent également être intégrées pour couper le circuit en cas de pression anormale.
- Qualité et conformité : assurer la qualité des matériaux et des processus d'assemblage pour minimiser les défauts de fabrication. Les rappels de produits défectueux, comme ceux observés en France pour des batteries de bateaux, sont cruciaux.
- Conditions d'utilisation et de charge : sensibiliser les équipages et le public aux bonnes pratiques de charge (ne jamais laisser charger sans surveillance, débrancher après charge), éviter les chocs mécaniques et l'exposition à des températures extrêmes.
- Gestion de fin de Vie : promouvoir l'élimination correcte des batteries usagées dans des installations dédiées aux déchets dangereux, afin d'éviter les incendies dans les centres de tri et de recyclage.

## 2.2. Catalogue des solutions de prévention et d'atténuation

### *2.2.1. Gestion thermique active : systèmes de refroidissement intégrés*

Les systèmes de gestion thermique active (BMS) sont des solutions dynamiques intégrées au pack de batteries, conçues pour maintenir la température dans une plage optimale de fonctionnement, généralement autour de 25 °C, et pour évacuer rapidement l'excès de chaleur généré, notamment lors de la charge rapide et de l'utilisation intensive.

- Avantages : c'est la première ligne de prévention contre l'emballement thermique. Il optimise la performance, l'autonomie et la longévité de la batterie.
- Inconvénients : les systèmes liquides sont complexes et ajoutent du poids. Ils peuvent être endommagés lors d'un accident, entraînant une défaillance de la protection.

#### *2.2.1.1. Refroidissement par air*

Le refroidissement par air, l'une des premières méthodes de gestion thermique utilisées, se base sur la circulation d'air ambiant ou d'air pulsé par des ventilateurs à travers le pack de batteries. Cette technologie est simple et a été mise en œuvre dans des modèles historiques tels que les premières générations de la Renault Zoé et de la Nissan Leaf.

- Avantages : la simplicité de ce système le rend moins coûteux à fabriquer et à entretenir que les solutions liquides. Il est également plus léger, ce qui est un atout pour l'efficacité énergétique du véhicule. L'absence de liquide élimine tout risque de fuite, simplifiant la conception et réduisant les problèmes de sécurité associés aux fluides.
- Inconvénients : son efficacité est limitée et fortement dépendante de la température ambiante. Par temps chaud, l'air n'est pas suffisamment frais pour dissiper la chaleur de manière adéquate, ce qui peut entraîner une surchauffe et une dégradation de la batterie. De plus, le refroidissement par air ne permet pas une distribution uniforme de la température au IESn du pack, ce qui peut créer des points chauds et réduire la durée de vie des cellules. Cette méthode est particulièrement inadaptée pour les charges rapides à haute puissance qui génèrent une quantité de chaleur considérable sur une courte période. L'évolution des attentes des consommateurs, qui exigent des temps de charge réduits et une autonomie accrue, a rendu cette technologie de plus en plus obsolète.

#### *2.2.1.2. Refroidissement par liquide*

Le refroidissement par liquide est la solution de gestion thermique la plus répandue dans les véhicules électriques (VE) modernes. Elle implique la circulation d'un liquide de refroidissement (souvent de l'eau glycolée) dans des canaux ou des plaques froides qui sont montés en contact direct avec les modules ou les cellules de la batterie. La chaleur est absorbée par le liquide, qui est ensuite pompé vers un échangeur de chaleur ou un radiateur externe pour être dissipée.

- Avantages : cette méthode offre une efficacité de refroidissement nettement supérieure et une distribution de la température plus homogène que le refroidissement par air, ce qui est essentiel pour prolonger la durée de vie de la batterie et maintenir ses performances, notamment lors des charges rapides. Les liquides de refroidissement peuvent être formulés avec des propriétés spécifiques, comme une faible conductance électrique et une protection contre la corrosion, afin d'assurer la sécurité et l'intégrité du système.
- Inconvénients : le système de refroidissement liquide est plus complexe et plus coûteux à produire en raison de la présence de pompes, de radiateurs et de réseaux de tuyauterie. Le poids du système est également supérieur à celui d'un système à air. Enfin, bien que le risque soit faible, il existe une possibilité de fuites de liquide, ce qui représente un défi d'ingénierie supplémentaire.

#### *2.2.1.3. Refroidissement par pompe à chaleur*

La pompe à chaleur est une technologie de gestion thermique bidirectionnelle qui peut à la fois chauffer et refroidir la batterie et l'habitacle. Contrairement aux systèmes de chauffage à résistance qui convertissent l'énergie électrique en chaleur et sollicitent fortement la batterie, la pompe à chaleur transfère des calories d'un point à un autre.

- Avantages : le principal atout de cette technologie est son efficacité énergétique exceptionnelle. En transférant la chaleur de l'air ambiant vers l'habitacle ou la batterie, elle consomme beaucoup moins d'énergie électrique, ce qui peut augmenter l'autonomie du véhicule de 25 à 30 %, particulièrement par temps froid. La pompe à chaleur permet également un pré-conditionnement de la batterie pendant la conduite, optimisant sa température pour la prochaine charge rapide et améliorant ainsi la vitesse de recharge.
- Inconvénients : l’efficacité peut diminuer de manière significative par des températures extrêmement basses, nécessitant parfois l'activation d'un chauffage d'appoint à résistance pour maintenir le confort thermique.

#### *2.2.1.4. Refroidissement par immersion (technologie émergente)*

Le refroidissement par immersion est une technologie émergente et prometteuse qui pourrait redéfinir la gestion thermique des batteries. Au lieu de faire circuler un liquide dans des plaques ou des canaux, cette méthode submerge directement les cellules de la batterie dans un liquide diélectrique non-conducteur et non-inflammable.

- Avantages : l'efficacité thermique de cette solution est jusqu'à 20 fois supérieure à celle des plaques froides traditionnelles. Ce contact direct avec le fluide permet une dissipation de la chaleur radicalement plus rapide et homogène, éliminant les points chauds et ouvrant la voie à des charges ultra-rapides en moins de 10 minutes, un temps de recharge qui se rapproche de celui d'un plein d'essence. Cette efficacité accrue améliore la sécurité en prévenant la propagation thermique et prolonge la durée de vie de la batterie de manière significative. La technologie permet également de concevoir des packs de batteries plus compacts et plus légers.
- Inconvénients : le refroidissement par immersion est encore une technologie en phase de développement et de commercialisation. Elle présente des défis complexes en matière d'ingénierie, notamment la nécessité d'une étanchéité parfaite et la sélection de matériaux durables pour les composants en contact avec le fluide. L'adoption à grande échelle est freinée par ces défis et par des coûts potentiellement plus élevés, bien que ces coûts devraient diminuer avec la massification.

*2.2.1.5. Synthèse*

| Type de système | Efficacité | Complexité | Efficacité pour charge rapide | Durée de vie de la batterie | Exemples d'application |
|---|---|---|---|---|---|
| **Refroidissement par air** | Faible | Faible | Inadéquate | Limitée | Anciens modèles de Nissan Leaf, Renault Zoé. |
| **Refroidissement par liquide** | Élevée | Moyenne | Efficace | Prolongée | La plupart des VE modernes. |
| **Refroidissement par pompe à chaleur** | Élevée | Élevée | Efficace | Prolongée | Nombreux modèles haut de gamme. |
| **Refroidissement par immersion** | Exceptionnelle | Élevée | Optimale | Très prolongée | En phase de R&D et d'émergence. |

## 2.3. Barrières et matériaux passifs : limiter la propagation

Les matériaux de protection passive sont des solutions de confinement intégrées au pack de batteries, conçues pour ralentir ou stopper la propagation de l'emballement thermique d'une cellule défaillante vers les cellules adjacentes. Elles complètent les systèmes de gestion thermique active pour une approche de sécurité complète.

### *2.3.1. Les aérogels*

Les aérogels sont des matériaux synthétiques nanoporeux extrêmement légers, composés à 99% d'air, ce qui en fait les meilleurs isolants thermiques au monde. Sous forme de feuilles ou de rembourrages, ils sont placés entre les cellules de la batterie.

- Avantages : l'aérogel agit comme une barrière thermique et mécanique de pointe, offrant une résistance thermique supérieure dans un format ultra-mince et léger. Il peut résister à des températures allant jusqu'à 650 °C, fournissant de précieuses minutes pour permettre aux passagers d'évacuer le véhicule et aux systèmes d'intervention de se déclencher. Sa flexibilité lui permet de s'adapter au gonflement naturel des batteries au fil de leur vieillissement. L'utilisation de ces barrières est une réponse directe à la voie de propagation par conduction de cellule à cellule, un des principaux mécanismes de l'emballement thermique. En s'attaquant à cette voie, les ingénieurs peuvent se concentrer sur la maîtrise des autres mécanismes comme la convection des gaz chauds.
- Inconvénients : le coût des aérogels, bien que de plus en plus accessible avec la production de masse, reste un facteur.

### *2.3.2. Les matériaux à changement de phase*

Les matériaux à changement de phase (MCP) sont des substances qui absorbent et stockent de grandes quantités de chaleur latente lors d'une transition de phase (par exemple, de solide à liquide). Ils sont intégrés au pack de batteries pour réguler passivement la température.

- Avantages : les MCP ont la capacité d'emmagasiner une énergie thermique considérable dans un volume réduit. Leur fonctionnement passif, sans pièces mobiles ni contrôles complexes, les rend fiables, peu coûteux et faciles à intégrer.
- Inconvénients : un inconvénient majeur des MCP est leur faible conductivité thermique intrinsèque, qui limite la vitesse à laquelle ils peuvent absorber ou libérer de la chaleur. Cette lenteur d'échange peut réduire l'efficacité du système dans des conditions de charge ou de décharge rapides.

### *2.3.3. Les polymères retardateurs de flamme*

Ces polymères sont des matériaux de construction de l'enveloppe du pack de batteries qui ont été modifiés pour résister au feu. Ils contiennent des additifs qui les rendent ininflammables ou autoextinguibles.

- Avantages : l'utilisation de polymères ignifuges augmente la sécurité passive du pack de batteries et garantit la conformité aux réglementations d'inflammabilité. Ils sont une première ligne de défense contre la propagation externe de l'incendie.
- Inconvénients : l'efficacité de ces additifs a longtemps été associée à des composés bromés (RFB), qui sont désormais réglementés en raison de leur toxicité, de leur persistance et de leur tendance à la bioaccumulation dans l'environnement. La nécessité de remplacer ces composés a conduit l'industrie à se tourner vers des alternatives plus sûres, comme les polymères organophosphorés, qui présentent un impact environnemental moindre tout en conservant leur efficacité. La sécurité d'un véhicule électrique doit être envisagée de manière holistique, incluant non seulement les performances opérationnelles, mais aussi les implications environnementales et sanitaires des matériaux utilisés.

| Matériau | Type de protection | Avantages | Inconvénients | Coût d'intégration |
|---|---|---|---|---|
| **Aérogels** | Barrière thermique (conduction) | Ultraléger, excellente isolation, protection mécanique, flexibilité. | Coût initial potentiellement élevé. | Moyen-Élevé |
| **MCP** | Stockage de chaleur | Fonctionnement passif, stockage d'énergie thermique élevé. | Faible conductivité thermique, vitesse de décharge limitée. | Faible-Moyen |
| **Polymères ignifuges** | Ignifugation | Sécurité passive, conformité aux normes. | Potentiel de toxicité (composés bromés). | Faible-Moyen |

## 2.4. Les systèmes de détection prédictive

Les systèmes de détection prédictive de l'emballement thermique (TR - *Emballement thermique*) dans les batteries lithium-ion des VE et hybrides sont cruciaux, car ils offrent une fenêtre d'avertissement (souvent de l'ordre de quelques minutes) avant l'embrasement.

Ces dispositifs sont généralement intégrés au système de gestion de batterie (BMS) du véhicule et se basent sur la surveillance de multiples paramètres.

### *2.4.1. Dispositifs basés sur des capteurs physiques*

Ces systèmes s'appuient sur la mesure directe des grandeurs physiques qui sont les premiers indicateurs de la défaillance d'une cellule.

*2.4.1.1. Surveillance de la température (surchauffe)*

| Dispositifs | Principe de fonctionnement | Avantages | Inconvénients |
|---|---|---|---|
| **Capteurs de température (thermistances)** | Mesure en temps réel de la température de surface des cellules ou des modules. Une augmentation anormale et rapide de la température est le signe d'une réaction exothermique interne. | Simplicité/coût : technologie éprouvée et peu coûteuse. Facile à intégrer au BMS. | Détection tardive : mesure la température de *surface*. Ne détecte pas toujours les variations de température internes qui initient l'emballement, ce qui peut entraîner un délai de détection. |
| **Sondes à fibre optique** | Capteurs de température intégrés directement à l'intérieur des cellules ou des modules. Utilisation de la lumière pour une mesure très précise. | Précision/rapidité : détection de la température au cœur de la cellule, offrant le signal d'alerte le plus précoce possible pour une élévation locale. | Coût/Complexité : technologie onéreuse et très complexe à intégrer lors de la fabrication de la batterie. Sensible aux vibrations et aux contraintes mécaniques du pack. |

*2.4.1.2. Surveillance des gaz et de la pression (dégazage)*

| Dispositifs | Principe de fonctionnement | Avantages | Inconvénients |
|---|---|---|---|
| **Capteurs de gaz/fumée** | Détection de l'échappement des gaz toxiques et inflammables (CO, $CO_2$, hydrogène, hydrocarbures) libérés lorsque l'électrolyte se décompose, souvent entre 70 °C et 120 °C (étape initiale de l'emballement thermique). | Détection très précoce : le dégazage est l'un des premiers signes de l'emballement thermique, souvent avant l'augmentation critique de la température de surface. | Faux positifs : sensibilité aux variations d'humidité ou à d'autres gaz présents. Nécessite une étanchéité du pack batterie pour une mesure fiable. |
| **Capteurs de pression** | Mesure de l'augmentation de la pression interne du pack ou du module due au volume de gaz libéré lors de la décomposition de l'électrolyte. | Réponse rapide et spécifique : une forte surpression est un indicateur quasi-certain d'une défaillance cellulaire majeure. | Intégration : doivent être placés de manière stratégique dans des zones confinées du pack pour une détection efficace. |

*2.4.1.3. Surveillance Électrique*

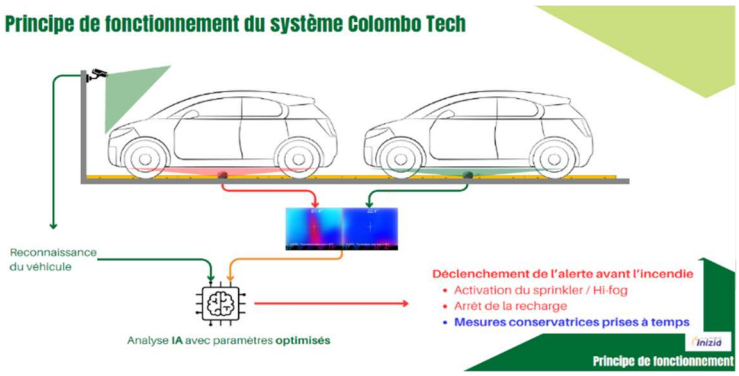
| Dispositif | Principe de fonctionnement | Avantages | Inconvénients |
|---|---|---|---|
| **Surveillance de la tension/impédance** | Le BMS surveille la chute de tension ou l'augmentation de la résistance interne (impédance) d'une cellule. Un court-circuit interne (fonte du séparateur) est précédé par ces variations. | Économique : utilise les capteurs de tension déjà présents dans le BMS. Aide à l'équilibrage et à la gestion globale de l'énergie. | Défi de la détection : la variation du signal de tension due à une défaillance peut être masquée par le bruit électrique ou les dynamiques normales de la batterie, rendant la détection précoce des |

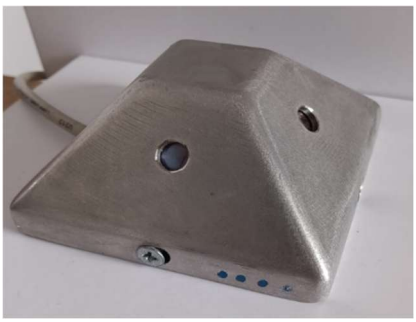
| | | | |
|---|---|---|---|
| | | | anomalies difficile sans filtrage avancé. |

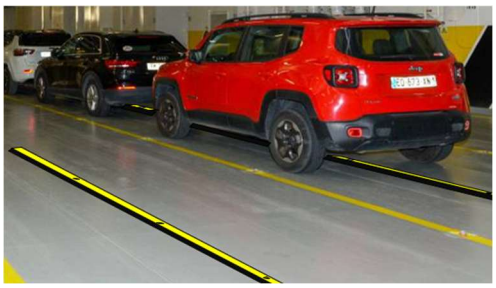
### *2.4.2. Systèmes de modélisation et prédiction (Intelligence Artificielle)*

Ces systèmes ne dépendent pas d'un seul capteur, mais de l'analyse conjointe et prédictive de toutes les données recueillies.

| Dispositifs | Principe de fonctionnement | Avantages | Inconvénients |
|---|---|---|---|
| **Algorithmes de machine *learning* (IA)** | Utilisation d'algorithmes sophistiqués qui analysent en temps réel des flux de données multi-capteurs (température, tension, impédance, état de charge - SOC) pour identifier des modèles précurseurs subtils de défaillance. | Prédictibilité maximale : permet de détecter les anomalies plus tôt et plus précisément que les systèmes basés sur des seuils fixes, réduisant le taux de faux positifs et augmentant le temps d'alerte. | Complexité/Ressources : nécessite des processeurs puissants et une grande quantité de données réelles (scénarios à haut risque) pour l'apprentissage et l'étalonnage. |
| **Modélisation électrothermique (jumeaux numériques)** | Utilisation de modèles mathématiques pour simuler et comparer le comportement attendu de chaque cellule ou module avec le comportement observé. | Robustesse : permet de déterminer l'état de santé (*State of Heath*, SOH) et de prédire la durée avant l'emballement (*Time-to-Fault*), souvent avec une bonne précision (secondes). | Dépendance au modèle : la précision dépend fortement de la qualité du modèle mathématique, qui doit être mis à jour en fonction du vieillissement et des conditions d'utilisation. |





### *2.4.3. Synthèse des enjeux Clés*

| Enjeu | Description |
|---|---|
| **Temps d'avertissement (*pre-warning time*)** | L'objectif premier est de dépasser les 5 minutes d'avertissement requis par certaines réglementations (notamment pour l'évacuation des passagers). Les solutions basées sur les gaz et l'IA sont les plus efficaces pour maximiser ce délai. |
| **Faux positifs** | Un défi majeur est d'éviter les alarmes inutiles. Les systèmes basés sur l'IA, en fusionnant plusieurs signaux (température, tension, gaz), sont mieux équipés pour distinguer une anomalie réelle d'un simple bruit de fonctionnement. |
| **Localisation** | La détection doit permettre de localiser précisément la cellule défaillante afin d'isoler le problème, d'activer le refroidissement ciblé et de ralentir la propagation de la défaillance thermique aux cellules adjacentes. |

## 3. APPROCHE OPÉRATIONNELLE

Les propriétés chimiques et thermiques uniques des incendies de batteries Li-Ion rendent les tactiques de lutte conventionnelles insuffisantes, voire contre-productives, ce qui nécessite un changement de paradigme dans la doctrine d'intervention.

La nature auto-entretenue de l'emballement thermique représente un défi majeur, car les composants internes de la batterie (cathode) libèrent de l'oxygène, permettant au feu de persister même dans des environnements à faible teneur en oxygène. Par conséquent, les gaz inertes (tels que le $CO_2$, le $N_2$, l'argon), les inhibiteurs chimiques (comme les HFC ou le NOVEC 1230) et les poudres extinctrices sont largement inefficaces en raison de leur incapacité à traiter l'approvisionnement interne en oxygène et de leur pouvoir de refroidissement relativement faible.

Ces sinistres nécessitent d'énormes quantités d'eau pour le refroidissement, mais cette eau peut également produire de l'hydrogène gazeux inflammable. De plus, les incendies sont profonds et sujets à la ré-inflammation.

Cette combinaison de facteurs signifie que les approches standard de lutte contre les incendies sont inadéquates. L'objectif principal passe de l'extinction de la flamme au refroidissement de la masse de la batterie pour empêcher un nouvel emballement thermique et à la gestion des sous-produits dangereux (gaz toxiques, potentiel de ré-inflammation). L'INERIS souligne notamment que l'extinction des feux de batteries Li-Ion de véhicules électriques est rendue difficile par l'inaccessibilité des composants actifs, intégrés dans les modules et dans le pack batterie.

Cela exige une formation spécialisée, le développement de nouveaux équipements spécifiques et une compréhension révisée du comportement du feu pour les capitaines de navires, les commandants d'opérations et les équipes opérationnelles. Cela souligne également l'importance d'une surveillance prolongée et de protocoles de sécurité post-incident en raison du risque persistant de ré-inflammation.

Les travaux récents de l'EMSA, de RISE, du Bureau Veritas et de l'INERIS confirment que les moyens fixes, la détection précoce, la limitation de la propagation, la maîtrise de la ré-inflammation et les procédures opérationnelles constituent encore des axes majeurs de recherche et d'amélioration.

### 3.1. Agir sur les Flux

Cette approche vise à mettre en place des barrières de sécurité entre le danger et les récepteurs, ou à contrôler la propagation des sous-produits de l'incendie. Pour les incendies de batteries Li-Ion, cela englobe :

#### *3.1.1. Confinement et ségrégation*

- Isolation thermique : utiliser des matériaux isolants tels que les coussinets d'isolation thermique en aérogel entre les cellules et les modules pour ralentir la propagation de l'emballement thermique de cellule à cellule (dispositions constructives).

- Stockage sécurisé : réserver une zone dédiée aux véhicules électriques (VE) embarqués à bord des navires rouliers, ségréger les conteneurs transportant des VE en pontée en les éloignant des marchandises dangereuses, séparer les batteries Li-Ion des autres matériaux combustibles.
- Dispositifs de confinement : en aviation, l'utilisation de sacs de confinement thermique (*burn bags*) est une pratique pour isoler les appareils en surchauffe. La norme UL 5 800 a été développée pour les solutions de confinement d'incendie d'avion.

#### *3.1.2. Gestion des gaz et fumées*

- Ventilation contrôlée : dans les espaces de chargement (pont garage, cale), la gestion des fumées et des gaz toxiques (HF, CO, etc.) est primordiale. Le transport de véhicules électriques en conteneurs ne permet pas ce contrôle de la ventilation. Les dernières études réalisées par le CNRS notamment mettent en avant un risque réel d'explosion lors d'emballement thermique en milieu sous ventilé.
- Détection précoce des gaz : l'utilisation de capteurs de détection de gaz peut fournir une alerte précoce d'un emballement thermique imminent, avant l'apparition des flammes.

#### *3.1.3. Techniques de lutte adaptées*

- Refroidissement massif à l'eau : l'eau est l'agent de refroidissement le plus efficace pour les batteries Li-Ion, mais elle doit être appliquée en grandes quantités et avec des techniques spécifiques (jet diffusé) pour maximiser le refroidissement et minimiser la production d'hydrogène.
- Surveillance prolongée : en raison du risque de ré-inflammation, une surveillance thermique prolongée et un refroidissement continu sont nécessaires, parfois pendant des jours.

### 3.2. Agir sur les cibles

Cette stratégie vise à protéger les personnes, les biens et l'environnement marin qui pourraient être affectés par le danger. Pour les incendies de batteries Li-Ion, cela comprend :

#### *3.2.1. Évacuation et sécurité des passagers et équipages*

- Systèmes d'alarme incendie : assurer une détection précoce et une notification rapide pour permettre l'évacuation des personnes présentes à bord du navire.
- Formation des équipages : veiller à ce que les équipages reçoivent une formation adaptée afin de pouvoir agir le plus efficacement possible sur les effets d'un emballement thermique. Analyser et comprendre les signes précurseurs d'un emballement thermique. Appliquer une doctrine d'intervention adaptée et mettre en œuvre de techniques spécifiques.
- Sensibilisation des passagers : sensibiliser le public aux bonnes pratiques à bord d'un navire. Identifier les signes d'une batterie endommagée (gonflement, fuite, déformation) et aux actions à entreprendre.

#### *3.2.2. Protection des équipes d'intervention du bord*

- EPI : fournir des EPI adaptés aux dangers spécifiques (chaleur extrême, gaz toxiques, projections de particules enflammées, …).
- Formation spécialisée : former les équipes aux tactiques d'intervention spécifiques aux batteries Li-Ion, y compris la gestion des fumées toxiques, le refroidissement prolongé et le risque d'explosion.
- Accès et moyens de secours : assurer un accès facile aux zones de stockage et de charge, et disposer de moyens de secours appropriés aux risques.

#### *3.2.3. Protection des biens et de l'environnement*

- Planification d'urgence : élaborer des plans d'intervention d'urgence détaillés pour les installations stockant des batteries Li-Ion, incluant la gestion des eaux d'extinction contaminées.
- Écrans thermiques : utiliser des obstacles physiques pour réduire le flux thermique reçu par les cibles à proximité.

En résumé, le modèle « Source-Flux-Cibles » offre un cadre holistique pour évaluer et gérer les risques liés aux batteries Li-Ion. En agissant à chaque niveau, en réduisant la probabilité et la gravité de

l'emballement thermique à la source, en contrôlant la propagation du feu et de ses sous-produits via les flux, et en protégeant les personnes et les biens qui sont les cibles, il est possible de développer des stratégies de prévention et d'intervention plus robustes et adaptées à la complexité de ces incendies.

## 3.3. Rappel environnemental

### *3.3.1. Les navires rouliers (RO-RO, RO-PAX, PCTC)*

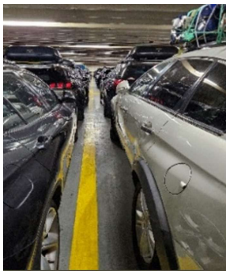
Dans un espace roulier, cette problématique est aggravée par :

- le confinement ;
- la proximité immédiate d'autres véhicules ;
- l'accès parfois difficile au-dessous du véhicule ;
- la limitation des possibilités de déplacement du véhicule sinistré ;
- la nécessité de protéger rapidement la structure du navire et les véhicules voisins ;
- la problématique de l'évacuation et de la gestion des eaux d'extinction ;
- la nécessité d'assurer une surveillance thermique prolongée.

Les ponts garages s'étendent de l'avant à l'arrière du navire sans recoupement transversal. Une fois chargés, les véhicules sont très proches les uns des autres. L'espace résiduel est faible réduisant ainsi les possibilités d'évolution.







### *3.3.2. Chargement en conteneurs*

Cette solution ne permet pas un accès direct aux véhicules. En cas de sinistre et dans la mesure du possible, il sera nécessaire de perforer la paroi accessible du ou des conteneurs afin de pouvoir projeter un agent extincteur à l'intérieur.





### 3.4. Fiches opérationnelles

| FICHE OPÉRATIONNELLE 1/2 | TRANSPORT DE VÉHICULES ÉLECTRIQUES ET HYBRIDES À BORD DES NAVIRES | ROPAX RO-RO PCTC |
|---|---|---|

| CHAMP D'APPLICATION | SOURCES/RÉFÉRENCES | DERNIÈRE ACTUALISATION |
|---|---|---|
| Navires rouliers mixtes à passagers (ROPAX). | DGAMPA - BMPM - Armateurs de France - Recommandations pour le transport de véhicules électriques et hybrides à bord des navires (mars 2025) | Groupe de travail national feux de VE - doctrine en cours de consolidation (portage OMI prévu en 2026) |

***Rappel*** *— un véhicule électrique (VE) désigne, au sens des présentes recommandations, tout véhicule alimenté par batteries lithium-ion (ONU 3556), lithium-métal (ONU 3557) ou sodium-ion (ONU 3558) ; aucune distinction n'est faite entre véhicule 100 % électrique et hybride rechargeable.*

| EMBARQUEMENT – CHARGEMENT | PRÉCONISATIONS |
|---|---|
| - Regrouper et embarquer les véhicules électriques dans des zones dédiées.<br>- Identifier et baliser les zones.<br>- Faciliter l'accès des zones par les équipes d'intervention.<br>- Préconiser une charge dite « de sécurité » pour tous les véhicules, comprise entre 30 et 40 % de la charge complète.<br>- Interdire la charge en mer.<br>- Sensibiliser les chargeurs à une déclaration précise des véhicules électriques transportés, au regard des enjeux propres à un navire à passagers. | - Mettre en place un isolement des zones par un moyen hydraulique (fixe ou semi-fixe).<br>- Assurer une détection dédiée aux zones (chaleur, fumée et/ou optique) avec prise en compte immédiate.<br>- Prévoir un moyen d'intervention grand débit aux abords accessibles des zones.<br>- Assurer le fonctionnement libre des dalots en tout temps.<br>- Dimensionner le dalotage et l'assèchement pour un débit supérieur à la capacité combinée du sprinklage et des lances, en anticipant la collecte et le retraitement des eaux d'extinction. |
| **SURVEILLANCE** | **INTERVENTION** |
| - Des rondes dédiées aux zones doivent être mises en place ;<br>- Fréquence déterminée par le bord, une ronde toutes les 3 heures constituant un minimum ;<br>- Le rondier devra être porteur d'une caméra à imagerie thermique et d'un enregistreur d'images.<br>- Mise en place de détection thermo-vélocimétrique fixe asservie.<br>- Étudier la mise en place d'un système de détection prédictive. | - Sur double détection de la zone, le moyen hydraulique pré-positionné devra être mis en œuvre sans délai.<br>- L'équipe d'attaque du bord devra intervenir avec un moyen grand débit en continu au plus près du véhicule concerné.<br>- Priorité à la protection des véhicules non touchés par l'incendie, pour éviter la propagation.<br>- Information immédiate des autorités terrestres.<br>- Anticiper l'incidence de la présence de passagers sur la gestion de l'évacuation et la coordination avec l'équipage. |

**Chaîne d'alerte immédiate**
**Navire en mer :** Rondier ou détection → Commandant du navire → CROSS/MRCC → EEI (eaux françaises) → Armateur
**Navire à quai :** Rondier ou détection → Commandant du navire → Autorité portuaire → SIS territorialement compétent → Armateur

| FICHE OPÉRATIONNELLE 2/2 | TRANSPORT DE VÉHICULES ÉLECTRIQUES ET HYBRIDES À BORD DES NAVIRES | PORTE-CONTENEURS |
|---|---|---|

| CHAMP D'APPLICATION | SOURCES/RÉFÉRENCES | DERNIÈRE ACTUALISATION |
|---|---|---|
| Navires porte-conteneurs transportant des véhicules électriques en conteneurs. | DGAMPA - BMPM - Armateurs de France - Recommandations pour le transport de véhicules électriques et hybrides à bord des navires (mars 2025) | Groupe de travail national feux de VE - doctrine en cours de consolidation (portage OMI prévu en 2026) |

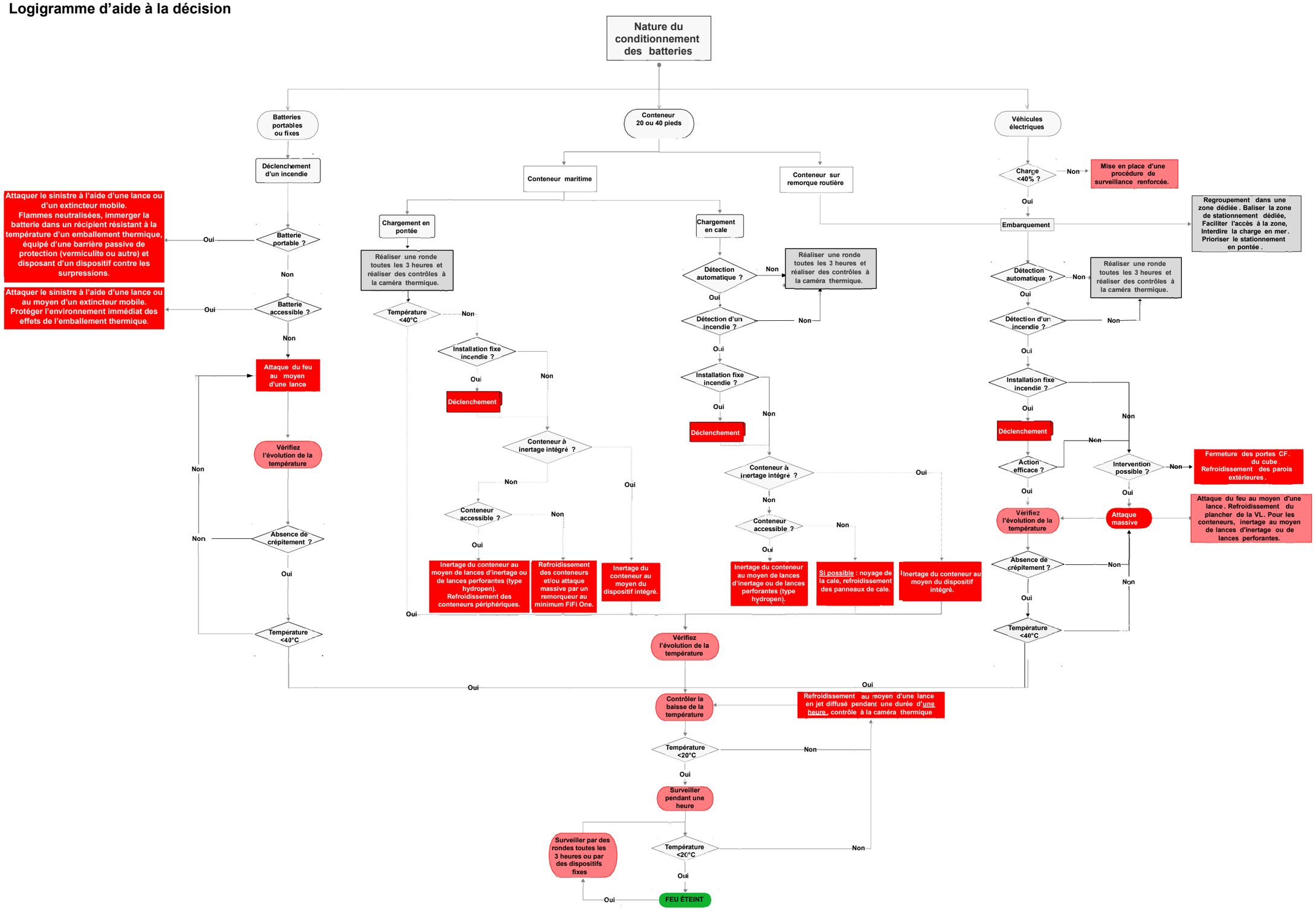
***Rappel —*** *un véhicule électrique (VE) désigne, au sens des présentes recommandations, tout véhicule alimenté par batteries lithium-ion (ONU 3556), lithium-métal (ONU 3557) ou sodium-ion (ONU 3558) ; aucune distinction n'est faite entre véhicule 100 % électrique et hybride rechargeable.*

| EMBARQUEMENT – CHARGEMENT | PRÉCONISATIONS |
|---|---|
| - Respecter des règles de ségrégation spécifiques au transport de véhicules électriques et de batteries en conteneurs.<br>- Identifier les conteneurs concernés sur le manifeste de chargement.<br>- Identifier visuellement les conteneurs.<br>- Faciliter l'accès de la zone par les équipes d'intervention.<br>- Proposer une charge dite « de sécurité » pour tous les véhicules en conteneurs, 40 % de la charge maximale constituant le seuil à ne pas dépasser.<br>- Disposer ces conteneurs en extérieur dans la mesure du possible.<br>- Prévoir un monitoring du ou des conteneurs, ou un conteneur spécifique pré-équipé au noyage, avec un système de déploiement dédié à proximité immédiate des véhicules électriques transportés en conteneur. | - Mettre en place un isolement des zones par un moyen hydraulique (fixe ou semi-fixe).<br>- Assurer une détection dédiée aux zones (chaleur, fumée et/ou optique) avec prise en compte immédiate.<br>- Prévoir un moyen d'intervention grand débit et perforant (type Hydropen) aux abords des conteneurs.<br>- Mettre en place une détection dédiée à ce type de conteneurs. |

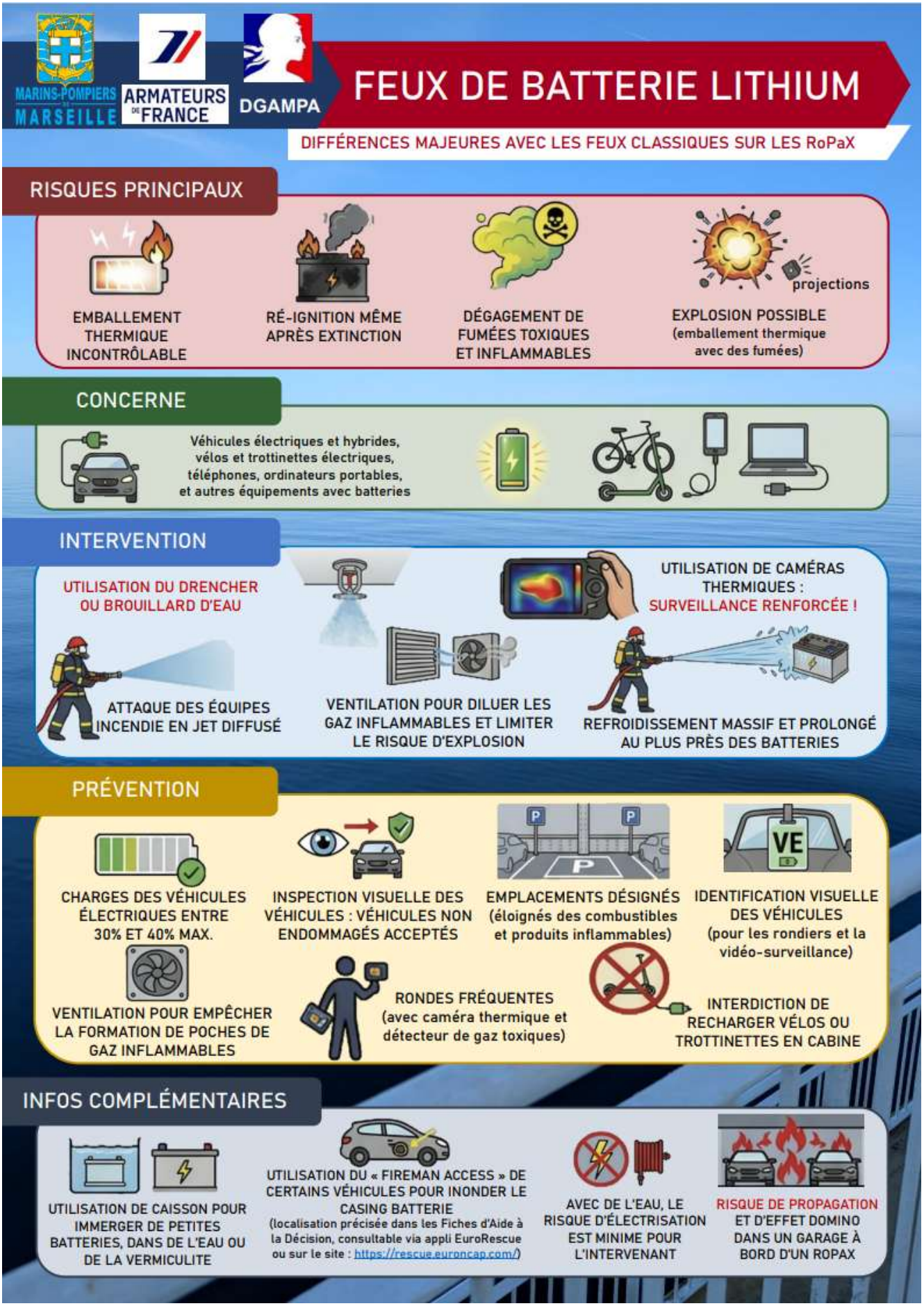
| SURVEILLANCE | INTERVENTION |
|---|---|
| - Des rondes dédiées à la zone doivent être mises en place ; une vérification thermique régulière est impérative.<br>- Le rondier devra être porteur d'une caméra à imagerie thermique et d'un enregistreur d'images.<br>- Mise en place de détection thermo-vélocimétrique fixe asservie.<br>- Étudier la mise en place d'un système de détection prédictive. | - L'équipe d'attaque du bord devra intervenir avec un moyen grand débit en continu et perforant.<br>- Information immédiate des autorités terrestres.<br>- Priorité à la protection des conteneurs non touchés par l'incendie, pour éviter la propagation. |

**Chaîne d'alerte immédiate**
**Navire en mer :** Rondier ou détection → Commandant du navire → CROSS/MRCC → EEI (eaux françaises) → Armateur
**Navire à quai :** Rondier ou détection → Commandant du navire → Autorité portuaire → SIS territorialement compétent → Armateur

## 3.5. Logigramme d'aide à la décision



### 3.6. Guidelines



MARINS-POMPIERS DE MARSEILLE · ARMATEURS DE FRANCE · DGAMPA

# LITHIUM-ION BATTERY FIRES

Major differences compared to conventional fire on RoPax vessels

## MAIN RISKS



UNCONTROLLED THERMAL RUNAWAY



RE-IGNITION EVEN AFTER EXTINCTION



RELEASE OF TOXIC AND FLAMMABLE GASES




RISK OF EXPLOSION (thermal runaway with smoke)

## APPLIES TO



Electric and hybrid vehicles, e-bikes and e-scooters, smartphones, laptops and other battery powered equipment



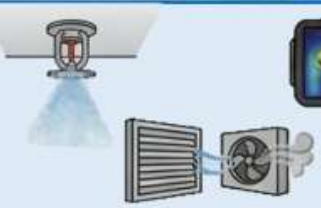


## EMERGENCY RESPONSE

USE DRENCHER SYSTEMS OR WATER MIST



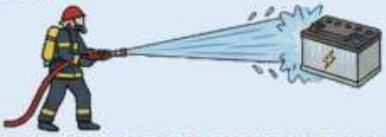
APPLY WATER IN SPRAY MODE



VENTILATION TO DILUTE FLAMMABLE GASES AND LIMIT EXPLOSION RISK



USE OF THERMAL CAMERAS: INCREASED MONITORING!



MASSIVE AND PROLONGED COOLING AS CLOSE AS POSSIBLE TO THE BATTERIES

## PREVENTION



VEHICLES SHOULD BE TRANSPORTED WITH A STATE OF CHARGE NOT EXCEEDING 40%



VISUAL INSPECTION: ONLY UNDAMMAGED VEHICLES ACCEPTED




SPECIFIC DESIGNATED AREAS (away from combustible and flammables materials)




VISUAL IDENTIFICATION OF VEHICLES (for fire patrols and CCTV monitoring)



VENTILATION TO PREVENT THE ACCUMULATION OF FLAMMABLE GASES



REGULAR PATROLS (with thermal cameras and gas detectors)



STRICLY PROHIBITED TO CHARGE E-BIKES OR E-SCOOTERS IN CABINS

## ADDITIONAL INFORMATION



SMALL BATTERIES TO BE IMMERSED IN WATER OR VERMICULITE USING CONTAINMENT BOXES



USE OF « FIREMAN ACCESS » ON CERTAIN VEHICLES TO FLOOD THE BATTERY PACK (location specified in Emergency Response Guide available via the EuroRescue app or on the website: https://rescue.euroncap.com/)



LOW RISK OF ELECTRIC SHOCK WHEN USING WATER ON ELECTRIC VEHICLE FIRES



RISK OF FIRE SPREAD AND DOMINO EFFECT ON A ROPAX VEHICLE DECKS

## 3.7. Les installations fixes

### *3.7.1. Les dispositifs à eau basse pression*

#### *3.7.1.1. Fonctionnement*

Le système de type déluge (drencher) est conçu pour noyer rapidement une zone étendue avec de grandes quantités d'eau, généralement par le biais de diffuseurs ouverts (têtes d'extinction sans élément thermosensible).

- Action sur le sinistre : l'eau pulvérisée agit principalement par refroidissement du foyer et des structures environnantes, empêchant ainsi la propagation de l'incendie et la déformation des matériaux.
- Blocage du rayonnement thermique : la forte densité du jet et le grand débit permettent de maîtriser rapidement l'incendie sur une large zone. L'eau pulvérisée peut aussi créer un écran thermique pour isoler des zones adjacentes.

| Avantages | Inconvénients |
|---|---|
| Maîtrise d'incendie sur de grandes surfaces, essentielle dans les ponts garages ouverts. | Risque de dommages importants par l'eau sur la cargaison non touchée par le feu. |
| Mise en œuvre rapide et massive sur une ou plusieurs zones permettant de limiter la propagation horizontale | Le système noie l'ensemble de la zone protégée, même si l'incendie est localisé, entraînant un gaspillage d'eau et des dégâts collatéraux. |
| Simplicité du système de têtes ouvertes et faible risque de colmatage des buses par rapport à certains dispositifs de brouillard d'eau. | Nécessite un grand débit et une source d'eau conséquente (pompes puissantes et réserves), car les débits sont élevés. |
| Refroidissement efficace des structures métalliques du navire pour prévenir la perte de stabilité structurelle et la propagation par conduction. | Les navires rouliers modernes doivent aussi gérer les eaux d'extinction (rejet ou confinement) pour des raisons de pollution, ce qui est complexe avec de gros volumes. |
| Non exposition du personnel à l'incendie. | Les systèmes peuvent être moins efficaces pour pénétrer le cœur des feux 3D ou des feux masqués (par exemple sous les véhicules) que d'autres agents. |

### *3.7.2. Les dispositifs haute pression*

#### *3.7.2.1. Fonctionnement*

Le brouillard d'eau (comme le système HI-FOG) agit sur le feu par trois mécanismes :

- Refroidissement : lorsque les microgouttelettes entrent en contact avec la chaleur extrême, elles s'évaporent instantanément en absorbant une quantité massive d'énergie (chaleur latente de vaporisation), refroidissant ainsi l'environnement immédiat.
- Inertage : l'eau se transforme en vapeur, occupant un volume environ 1700 fois supérieur. Cette expansion déplace localement l'oxygène autour du foyer, ralentissant ou stoppant la combustion de surface.
- Blocage du rayonnement thermique : la densité du brouillard d'eau forme une barrière qui limite la transmission de la chaleur radiante, empêchant la propagation aux cellules adjacentes (l'effet domino de l'emballement thermique).

| Avantages | Inconvénients |
|---|---|
| Refroidissement rapide et efficace : le meilleur mécanisme pour abaisser rapidement la température de la batterie en feu. | Efficacité limitée sur les batteries encapsulées : le brouillard d'eau pulvérisé par le dessus ou les côtés a du mal à pénétrer l'enveloppe de la batterie (souvent sous le châssis du VE) pour refroidir directement les cellules. |
| Faible consommation d'eau : utilise jusqu'à 90 % moins d'eau que les systèmes traditionnels, minimisant les dommages collatéraux et les problèmes de carène liquide sur les navires (encombrement des cales). | Installation complexe : les systèmes fixes haute pression (HP) nécessitent des pompes et des réseaux de tuyauterie spécifiques (inox). |
| Sécurité pour l'opérateur : permet l'attaque du feu et le refroidissement à distance. | Inertage insuffisant : l'emballement thermique est une réaction interne qui ne nécessite pas d'oxygène pour se poursuivre. L'effet d'étouffement est donc moins efficace que l'effet de refroidissement. |



### *3.7.3. Les dispositifs à $CO_2$*

#### *3.7.3.1. Fonctionnement*

Le dispositif fixe d'extinction par $CO_2$ dans les ponts garages des navires rouliers fonctionne par noyage total, visant à étouffer l'incendie en réduisant drastiquement la concentration en oxygène dans le volume protégé.

| Avantages | Inconvénients |
|---|---|
| Absence de résidus et de dommages matériels non liés au feu. | Inefficacité sur l'emballement thermique (réaction chimique interne qui produit son propre oxygène). |
| Inertage rapide du volume si le confinement est efficace. | Même si les flammes peuvent être temporairement abaissées, le risques de ré-ignition est total. |
| Efficace sur les feux de surface. | Lors de l'emballement thermique, des gaz toxiques comme le fluor d'hydrogène sont produits. Le $CO_2$ ne neutralise pas ces gaz. L'atmosphère du volume reste donc dangereuse après la décharge. |

## 3.8. Les dispositifs mobiles

### *3.8.1. Lances traditionnelles à haut débit*

Les lances à eau classiques constituent le moyen d'intervention de base dont disposent les équipages des navires et les services d'incendie.





Elles permettent principalement :

- l'extinction du feu extérieur du véhicule ;
- le refroidissement de la carrosserie ;
- le refroidissement des éléments périphériques du véhicule ;
- la protection des véhicules voisins ;
- la réduction du rayonnement thermique ;
- la création de conditions permettant une approche du véhicule ;
- le maintien d'un refroidissement après extinction apparente.

Lors des essais RISE réalisés dans une configuration de car deck, la lance conventionnelle a notamment été utilisée en première phase pour maîtriser l'incendie de l'habitacle avant la mise en œuvre d'une technique de refroidissement plus ciblée.

#### *3.8.1.1. Efficacité vis-à-vis de la batterie*

L'eau demeure l'agent de refroidissement de référence pour une batterie Li-Ion.

La principale limite de la lance classique est cependant l'accès indirect aux cellules.

L'eau projetée depuis l'extérieur refroidit principalement :

- la carrosserie ;
- les pneumatiques et éléments du châssis ;
- le carter batterie ;
- les flammes extérieures ;
- les surfaces environnantes.

Elle ne permet pas nécessairement d'évacuer suffisamment rapidement l'énergie thermique contenue dans les cellules déjà engagées dans un emballement thermique.

L'INERIS identifie précisément cette difficulté d'accès au cœur du pack comme l'une des principales limites des moyens d'extinction conventionnels.

#### *3.8.1.2. Intérêt majeur à bord des navires*

Malgré cette limite, la lance classique doit être considérée comme un **moyen fondamental de la doctrine de première intervention**.

Elle présente quatre avantages essentiels :

1. disponibilité immédiate ;
2. simplicité de mise en œuvre ;
3. polyvalence ;
4. capacité à protéger simultanément le véhicule sinistré et son environnement.

Les essais RISE montrent que les systèmes de projection d'eau peuvent contrôler le feu d'un véhicule électrique, réduire les températures des gaz et des surfaces voisines, diminuer le rayonnement et limiter la propagation.

#### *3.8.1.3. Recommandations opérationnelles*

**Pour les équipages**

La lance classique doit rester le **premier moyen d'attaque et de protection**, notamment pour :

- contenir le feu ;
- refroidir l'environnement immédiat ;
- protéger les véhicules voisins ;
- permettre l'engagement d'un moyen spécialisé ;
- assurer un refroidissement prolongé.

Elle ne doit toutefois pas être considérée comme la garantie d'arrêt de l'emballement thermique.

**Pour les services d'incendie et de secours**

La lance classique doit être utilisée prioritairement pour :

**feu extérieur → protection de l'environnement → refroidissement → reconnaissance thermique → choix éventuel d'un moyen spécialisé.**

| Avantages | Inconvénients |
|---|---|
| **Disponibilité et familiarité :** équipement standard sur tous les navires, l'équipage est formé à leur utilisation. | **Volume d'eau important :** l'extinction complète peut nécessiter l'application de dizaines de milliers de litres d'eau sur une longue période (jusqu'à plusieurs heures). Ceci représente un risque critique pour la stabilité du navire (carène liquide), car l'eau s'accumule sur le pont garage ou dans les cales. |
| **Protection et confinement :** efficace pour refroidir la carrosserie du véhicule en feu et, surtout, pour éviter la propagation thermique aux VE adjacents, empêchant l'effet domino de l'emballement. | **Inefficacité sur la source :** la coque de la batterie protège les cellules. Le refroidissement est indirect et ne stoppe pas rapidement la réaction interne de l'emballement thermique. |
| **Atténuation des fumées :** le jet d'eau massif aide à rabattre une partie des fumées et gaz toxiques. | |

### *3.8.2. Les dispositifs de refroidissement sous-châssis*






*Drencher inversé de type "Corsica Linéa"*




*Drencher inversé de type « DFDS »*







*Drencher inversé de type « Lashfire »*



*Autre*

### *3.8.2.1. Principe*

Les dispositifs de refroidissement sous châssis cherchent à rapprocher l'eau de la batterie sans nécessiter la perforation du pack.

Deux grandes familles peuvent être distinguées :

**Dispositifs mobiles**

Une lance ou une rampe est positionnée sous le véhicule et projette l'eau vers le dessous du plancher.

**Dispositifs fixes**

Des buses ou rampes sont intégrées au sol du garage ou du car deck afin de projeter automatiquement de l'eau vers le dessous des véhicules.

Cette seconde architecture peut être associée à :

- une détection thermique ;
- une détection incendie ;
- un déclenchement automatique ;
- un système drencher ;
- des buses latérales ;
- une surveillance vidéo ou thermique.

Le document source identifie cette évolution vers des systèmes fixes comme l'une des voies technologiques les plus prometteuses.

*3.8.2.2. Intérêt par rapport aux lances perforantes*

L'avantage fondamental est l'absence de perforation.

Le mécanisme recherché est :

**eau → carter batterie → structure du pack → cellules**

plutôt que :

**eau → perforation → cellules.**

Cette approche réduit potentiellement :
- le risque électrique ;
- le risque d'arc ;
- le risque mécanique ;
- le risque de projection ;
- le risque de provoquer un emballement thermique supplémentaire par endommagement mécanique.

*3.8.2.3. Limite fondamentale*

Le refroidissement reste indirect.

Le carter batterie constitue une barrière thermique. L'eau doit donc :
1. atteindre le carter ;
2. refroidir celui-ci ;
3. transférer la chaleur à travers le carter ;
4. atteindre thermiquement les modules et cellules.

Le dispositif peut donc être moins rapide qu'une injection directe dans le pack.

Il n'est pas démontré qu'un système sous véhicule puisse arrêter systématiquement un emballement thermique développé.

*3.8.2.4. Essais et maturité*

Les essais RISE réalisés dans des configurations reproduisant un car deck de ferry ont étudié notamment le drencher, le brouillard d'eau, les rideaux d'eau, les lances et les dispositifs de perforation. Plusieurs de ces solutions permettent de limiter la propagation et de refroidir le pack après extinction de l'habitacle.

Une étude publiée en 2026[1] sur le brouillard d'eau montre également l'intérêt d'une combinaison des applications supérieure et inférieure. Les essais mettent en évidence l'importance de la disposition des buses et de l'application sous le véhicule.

**2.6. Intérêt pour le monde maritime**

L'intérêt est particulièrement important pour les navires Ro-Ro/Ro-Pax/PCTC.

Une architecture associant :

**détection thermique → drencher → arrosage sous véhicule → surveillance thermique**

permettrait de traiter simultanément :
- le feu extérieur ;
- le rayonnement ;
- les véhicules voisins ;
- le dessous du véhicule ;
- le pack batterie.

[1] HAL open science, Performance of Extinguishing Agents against Lithium-Ion Battery Fires – HAL Id : hal-05520928 – https://halscience/hal-05520928v1.

Cette approche graduée est cohérente avec les orientations actuelles de l'EMSA concernant la sécurité du transport des véhicules à carburants alternatifs dans les espaces Ro-Ro.

### *3.8.3. Avantages et inconvénients du refroidissement par le dessous*

En conclusion, le refroidissement par le dessous est considéré comme une des meilleures pratiques pour les services d'urgence, car il offre un bon compromis entre l'efficacité du refroidissement de la source de chaleur et la sécurité des intervenants, en comparaison avec les risques du perçage direct.

| Caractéristique | Avantages | Inconvénients |
|---|---|---|
| **Sécurité des intervenants** | Risque réduit : l'opérateur peut se tenir à une distance de sécurité par rapport aux évents (sorties de gaz chauds) et aux flammes, car l'outil est positionné par le dessous. | Complexité de mise en place : nécessite un accès clair sous le véhicule. Sur un véhicule accidenté ou fortement déformé, le positionnement de l'outil ou du tapis peut être difficile, voire impossible. |
| **Efficacité du refroidissement** | Refroidissement ciblé : il cible la zone de transmission de chaleur (le boîtier de la batterie), là où les cellules en emballement thermique sont les plus chaudes. L'eau absorbe la chaleur par conduction. | Efficacité limitée par la conception : le refroidissement est indirect (à travers le boîtier). La vitesse de transfert thermique est ralentie par l'épaisseur du boîtier de la batterie et le joint d'étanchéité, nécessitant un temps de refroidissement prolongé (plusieurs heures). |
| **Contrôle de l'eau** | L'eau est utilisée de manière plus ciblée que le refroidissement général du véhicule, permettant potentiellement de mieux contrôler le ruissellement et la quantité nécessaire. | Quantité d'eau potentiellement massive : bien que plus ciblé, stopper l'emballement thermique peut nécessiter des quantités très importantes d'eau (souvent plusieurs milliers de litres) appliquées sur une longue période. |
| **Prévention de la propagation** | La baisse rapide de la température de l'enveloppe prévient la propagation de l'emballement aux cellules adjacentes, cassant la réaction en chaîne. | Pas d'extinction directe des flammes : la méthode refroidit la batterie mais n'éteint pas nécessairement les flammes visibles (gaz inflammables éjectés) qui doivent être traitées par ailleurs. |
| **Intervention non destructive** | Ne nécessite pas de perforation de la batterie, ce qui évite la libération soudaine de gaz toxiques sous pression, contrairement à la méthode de la lance à poinçon. | Risque de ré-inflammation : si le refroidissement est interrompu trop tôt, la température interne peut remonter et provoquer une nouvelle reprise de feu. |

## 3.9. Les dispositifs de perforation basse pression

### *3.9.1. Principe de fonctionnement*

Les lances perforantes manuelles basse pression permettent de réaliser mécaniquement une ouverture dans le carter du pack puis d'injecter de l'eau directement dans celui-ci.







Le principe est :

**Perforation → accès au pack → injection d'eau → refroidissement interne.**

Un exemple représentatif est la lance e-fire de Murer Feuerschutz, annoncée avec un débit d'environ 25 L/min et une isolation électrique jusqu'à 1 000 V. La perforation est réalisée mécaniquement.

### *3.9.2. Avantages*

La principale qualité est la faible consommation d'eau.

À 25 L/min, la consommation théorique est :

| Durée | Volume |
|---|---|
| 5 min | 125 L |
| 10 min | 250 L |
| 20 min | 500 L |
| 30 min | 750 L |

Lorsque la perforation est réussie, le refroidissement interne peut être très efficace.

Des essais français ont notamment montré, dans certaines configurations, une chute très rapide de la température du pack, de l'ordre de 400 °C à 40 °C en quelques secondes. Cependant, un essai réalisé en 2025 n'a pas permis de pénétrer le pack.

### *3.9.3. Limites*

La principale faiblesse est l'exposition du personnel.

La séquence est :

**pompier → positionnement → frappe → perforation → injection.**

L'intervenant se retrouve donc à très faible distance du véhicule et potentiellement du pack en emballement thermique.

Les risques identifiés comprennent :
- arc électrique ;
- électrisation ;
- jet de flamme ;
- projection de matériaux ;
- dégagement de gaz chauds ;
- déclenchement d'un emballement thermique sur des cellules saines ;
- difficulté à connaître l'architecture interne du pack.

### *3.9.4. Problème doctrinal majeur*

La capacité à perforer ne signifie pas que la perforation est tactiquement pertinente.

Le pompier peut :

**scénario favorable :** percer → atteindre une zone chaude → injecter de l'eau → réduire la propagation ;

mais également :

**scénario défavorable** : percer → endommager une cellule saine → provoquer un nouvel emballement thermique → augmenter l'énergie thermique.

Cette difficulté est explicitement mise en évidence dans les travaux analysés par l'INERIS.

### *3.9.5. Positionnement opérationnel*

La lance perforante basse pression ne doit pas être considérée comme un moyen de première intention.

Elle peut être envisagée lorsque :

- le véhicule est stabilisé ;
- le pack est identifié ;
- la zone de perforation est accessible ;
- la température et l'évolution du phénomène sont connues ;
- les intervenants disposent d'une protection suffisante ;
- la ventilation est maîtrisée ;
- la possibilité de retrait rapide est garantie.

Dans un car deck très confiné, fortement enfumé ou présentant des jets de flamme, son emploi devient particulièrement défavorable.

## 3.10. Les dispositifs de perforation haute pression

### *3.10.1. Principe*

Les systèmes PyroLance et Cold Cut Cobra utilisent un jet d'eau sous pression associé à un abrasif permettant de perforer une carrosserie, une paroi métallique ou une enveloppe puis de produire un brouillard d'eau à l'intérieur du volume.






Ils permettent une attaque depuis l'extérieur et limitent ainsi l'engagement direct du personnel.

Le Cobra fonctionne typiquement autour de 300 bars ; la PyroLance se situe autour de 83 à 103 bar selon configuration, avec un débit annoncé d'environ 38 L/min.

### *3.10.2. Maturité technologique (TRL)[2]*

Il convient de distinguer :

**Lutte incendie générale**

- Cobra : TRL 9 ;
- PyroLance : TRL 8–9.

[2] L'échelle TRL (Technology Readness Level), ou niveau de maturité technologique) est un outil de mesure en 9 niveaux créé par la NASA. Elle permet d'évaluer l'état d'avancement d'une technologie, depuis la recherche fondamentale jusqu'à son industrialisation complète et sa commercialisation.

**Application aux batteries Li-Ion**

- Cobra : environ TRL 7–8 ;
- PyroLance : environ TRL 6–7.

Cette différence s'explique par le fait que la technologie de perforation est ancienne et largement éprouvée, alors que son application spécifique aux packs Li-Ion demeure beaucoup moins documentée.

### *3.10.3. Retour d'expérience Cobra*

Un essai grandeur réelle sur un véhicule électrique a suivi la séquence :

1. incendie généralisé ;
2. extinction initiale de l'habitacle ;
3. reconnaissance thermique ;
4. perforation ;
5. perforation du boîtier batterie ;
6. injection d'eau ;
7. surveillance thermique.

La température de surface a été ramenée sous 50 °C en environ dix minutes. Dans cet essai, aucune ré-inflammation n'a été observée après une série de manipulations mécaniques puis deux jours de quarantaine.

La consommation totale rapportée était d'environ 750 L, dont environ 240 L avec Cobra et 510 L avec la lance conventionnelle. Cette valeur ne doit toutefois pas être considérée comme une consommation universelle pour tous les VE.

### *3.10.4. Risques*

L'accès direct au pack constitue simultanément la force et la faiblesse de cette technologie.

L'INERIS relève notamment, dans certaines configurations :

- rupture ou destruction du pack ;
- projection de cellules ;
- arc électrique ;
- choc électrique ;
- jet de flamme ;
- déclenchement de cellules supplémentaires ;
- difficulté à déterminer l'endroit optimal de perforation.

L'INERIS indique également que, dans les conditions d'essais analysées, les services d'incendie français et allemands ne recommandaient pas l'utilisation de ce type de lance directement sur les batteries. Cette conclusion doit être interprétée dans le contexte précis des essais et ne constitue pas une interdiction générale de la technologie.

### *3.10.5. Intérêt maritime*

Le Cobra présente néanmoins un intérêt particulier pour le monde maritime car il est déjà utilisé dans des applications incendie navire.

Il constitue donc un outil transversal :

- feux de locaux machines ;
- espaces confinés ;
- conteneurs ;
- structures ;
- feux difficiles d'accès ;
- véhicules électriques ;

- batteries et systèmes de stockage.

Le document source considère ainsi le Cobra comme une technologie particulièrement intéressante à expérimenter dans le cadre du BMPM.

### *3.10.6. Recommandation*

La perforation haute pression doit être considérée comme une **technique spécialisée**, et non comme une solution systématique.

La décision de perforer doit intégrer :

- l'état du véhicule ;
- la thermographie ;
- l'accessibilité ;
- la connaissance du pack ;
- la dynamique du emballement thermique ;
- le risque électrique ;
- la possibilité de projection ;
- la présence de véhicules adjacents ;
- la configuration du car deck.

## 3.11. Dispositif de perforation commandé à distance





Comme pour lances perforantes manuelles, ces dispositifs sont équipés d'une pointe perforante résistante dotée d'un diffuseur.

Une unité de commande déportée permet aux opérateurs de déclencher la perforation à une distance de sécurité.

| Avantages | Inconvénients |
|---|---|
| Protection des intervenants | Encombrement. |
| Economie d'eau. | Complexité d'accès au pack batteries. |
| Refroidissement interne du pack batteries. | Risques de création de court-circuit lors du percement. |
| Dilution des gaz toxiques. | Coût et formation. Cet équipement onéreux et technique nécessite une formation rigoureuse des équipes afin de cibler correctement la batterie sans endommager d'autres composants critiques (câbles à haute tension) |

En résumé, ces dispositifs de perforation peuvent dans certaines situations être une stratégie de dernier recours pour une intervention offensive ciblée sans pour autant empêcher une ré-ignition si la pénétration n'est pas effectuée correctement ou si le refroidissement n'est pas suffisant.

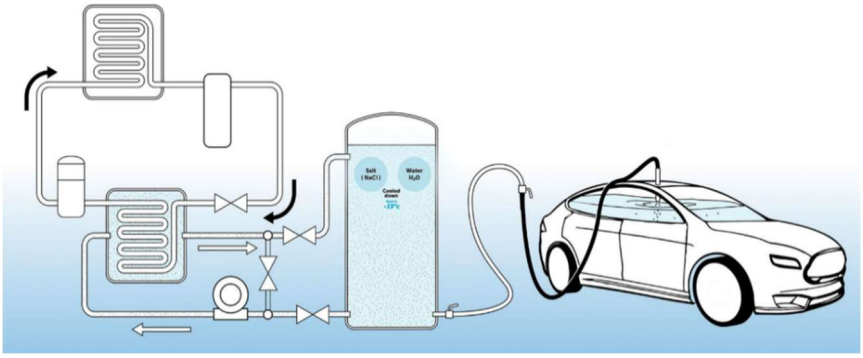
Quelle que soit la solution mise en œuvre, il existe un risque accru pour les intervenants.

Il est également à noter que les constructeurs de véhicules électriques, ne recommandent pas la perforation des « packs » batteries avec de tels dispositifs.

### 3.12. Le système « *Battery Briner* »

#### *3.12.1. Principe*

Le « *Battery Briner* » adopte une approche différente. Son principe peut s'avérer intéressant pour le domaine maritime. Il permet injecter directement dans un véhicule en feu une saumure fortement concentrée et fortement refroidie, afin d'extraire très rapidement l'énergie thermique de la batterie et de tenter d'interrompre la propagation de l'emballement thermique.







La saumure est essentiellement une solution concentrée de NaCl + eau. À environ 23,3 % massique de NaCl, son point eutectique est proche de –21,1 °C. Le système utilise donc une saumure maintenue à très basse température puis la fait parvenir directement à l'intérieur du véhicule.

Il utilise une saumure fortement concentrée et fortement refroidie afin d'extraire rapidement l'énergie thermique du véhicule et de sa batterie.

Le système comprend notamment :

- réservoir de saumure ;
- système frigorifique ;
- circulation ;
- pompes ;
- conduites ;
- flexibles ;
- raccordements ;
- système d'injection.

La saumure peut être maintenue à très basse température et injectée directement dans le véhicule.

### *3.12.2. Objectif*

L'objectif n'est pas simplement l'extinction des flammes.

Il consiste à :

1. réduire rapidement la température des cellules ;
2. limiter la propagation cellule à cellule ;
3. limiter la propagation au pack ;
4. réduire le risque de ré-inflammation ;
5. réduire le flux thermique transmis aux véhicules voisins.

Le dispositif est donc particulièrement intéressant dans un espace confiné de type garage Ro-Ro/Ro-Pax.

### *3.12.3. Niveau de maturité technologique*

À ce jour, le TRL du *Battery Briner* est de 7 à 8 (démonstration en environnement opérationnel / pré-industrialisation) avec une nuance importante : le niveau de maturité technique semble supérieur au niveau de maturité réglementaire.

| Domaine | État actuel |
|---|---|
| Principe physique | 🟢 Démontré |
| Essais sur batteries | 🟢 Réalisés |
| Essais grandeur réelle | 🟢 Réalisés |
| Démonstration sur véhicule électrique | 🟢 Réalisée |
| Intégration à bord d'un navire | 🟢 Réalisée |
| Utilisation par équipage/secours | 🟢 Possible |
| Industrialisation | 🟠 En développement |
| Déploiement multi-navires | 🟠 Encore limité |
| Certification/règles internationales spécifiques | 🟠 À consolider |
| Retour d'expérience réel sur sinistres EV | 🔴 Très limité publiquement |

Cette appréciation est cohérente avec les informations disponibles : le constructeur indique encore travailler avec des partenaires afin d'amener le projet à ses dernières étapes.

Les données publiques disponibles ne permettent pas encore de conclure à une validation opérationnelle complète sur un grand nombre de scénarios réels, ni à une certification maritime internationale spécifique comparable à celle d'un équipement normalisé SOLAS/FSS et n'est pas encore considéré comme une solution largement industrialisée et réglementairement normalisée pour la maîtrise des incendies de batteries Li-Ion.

Le système a franchi le stade du simple concept, il a été installé sur le ferry *Norröna* de Smyril Line, un ROPAX pouvant accueillir 1600 passagers avec leurs véhicules. L'étude technique et réglementaire publiée récemment indique que :

- la saumure est maintenue à environ –19 °C ;
- le système est installé sur le car deck ;
- les raccordements utilisent les infrastructures de lutte contre l'incendie du navire ;
- la saumure peut être délivrée à environ 250 L/min ;
- l'autonomie annoncée est d'environ 1 heure ;
- un dispositif d'injection permet d'introduire la saumure directement dans le véhicule.

Ce point est essentiel : on n'est plus dans une démonstration de laboratoire.

### *3.12.4. Performances annoncées*

Les résultats communiqués, lors des essais sur différents packs montrent que :

- le seuil de l'emballement thermique était atteint entre environ 38 s et 73 s selon la taille du pack ;
- après immersion/refroidissement, la température se stabilisait en dessous de 0 °C ;
- la forte décroissance thermique devait empêcher la propagation aux cellules adjacentes.

Le mécanisme recherché est donc très différent d'une extinction classique.

Extinction classique : flamme → extinction → refroidissement prolongé

*Battery Briner* : détection → accès au véhicule → injection massive de saumure froide → extraction thermique → arrêt/limitation de la propagation de l'emballement thermique.

C'est cette capacité à extraire rapidement l'énergie thermique du pack qui constitue le principal intérêt du dispositif.

### *3.12.5. Elément important pour une doctrine opérationnelle*

Il serait excessif d'affirmer que le *Battery Briner* « éteint une batterie Li-ion » dans tous les cas.

Les propres données disponibles précisent que les cellules déjà engagées dans un processus d'emballement thermique peuvent continuer à produire de la chaleur et à brûler leur énergie résiduelle. L'objectif principal est plutôt de stopper la propagation thermique aux cellules voisines.

Dans ce contexte, il est préférable de parler de maîtrise de l'emballement thermique par refroidissement massif et limitation de la propagation thermique plutôt que d'extinction du feu de batterie.

Cette distinction est importante pour le développement d'une doctrine opérationnelle.

Les navires pour lesquels la technologie semble actuellement la plus mature sont les Ro-Ro / Ro-Pax / PTCT.

La doctrine d'emploi peut se traduire comme suit :

Détection thermique/gaz → confirmation → alarme → eau pulvérisée garage → intervention → injection de saumure froide dans le véhicule.

Le constructeur prévoit un processus opérationnel complété par la mise en œuvre concomitante des outils suivants :

- caméras thermiques ;
- détection de gaz ;
- contrôle infrarouge ;
- sprinkler du garage ;
- système d'injection de saumure à distance.

On obtient ainsi non pas un simple extincteur mais un système intégré de détection–attaque–refroidissement.

### *3.12.6. Etat de la réglementation et de la certification*

C'est probablement le principal point de vigilance à avoir.

Le *Battery Briner* bénéficie d'une protection par brevet/famille de brevets. Le brevet initial EP21201842.8 a notamment donné lieu à une famille internationale comprenant des demandes EP, US, CA et autres. Le dossier européen initial apparaît comme retiré, tandis qu'une nouvelle demande européenne EP22880513.1/EP4415831 est indiquée comme pendante.

Mais cela ne signifie absolument pas que le système est « certifié SOLAS ».

À ce stade, il n'existe pas de source publique démontrant une homologation internationale spécifique du *Battery Briner* en tant que système d'extinction de batteries Li-ion.

L'étude technique et réglementaire récente consacrée aux risques liés aux batteries à bord des navires présente d'ailleurs le *Battery Briner* comme une technologie testée et installée, tout en soulignant plus largement la nécessité de poursuivre les essais et la formation pour les dispositifs d'injection directe.

### *3.12.7. Ce qui est démontré/ce qui reste à démontrer*

| 🟢 **Démontré** | 🟠 **À consolider** | 🔴 **Encore insuffisamment documenté publiquement** |
|---|---|---|
| Faisabilité de la technologie | Efficacité selon les différentes architectures et technologies de batteries (LFP, NMC, NCA, etc. | Statistiques de véritables interventions en exploitation |
| Refroidissement extrêmement rapide | Batteries fortement endommagées | Taux de réussite sur sinistres réels |
| Utilisation de saumure fortement refroidie | Batteries sous charge | Retour d'expérience multi-navires |
| Injection directe dans un véhicule | Véhicules immergés partiellement | Critères d'installation standardisés |
| Essais grandeur réelle | Accès au pack impossible | Doctrine opérationnelle internationale |
| Intégration sur un navire | Véhicules poids lourds/autobus | Certification par une société de classification |
| Capacité de stockage et de distribution importante | Batteries de très forte capacité | Validation complète par les administrations maritimes |
| Compatibilité avec une logique d'intervention des équipages | Effets de la saumure sur les équipements électriques | |
| | Maîtrise des risques électriques lors de l'injection | |
| | Gestion des eaux/saumures contaminées | |
| | Comportement après plusieurs heures | |
| | Prévention de la ré-inflammation | |

### *3.12.8. Synthèse*

Le *Battery Briner* est passé du stade de concept à celui de prototype/démonstrateur maritime opérationnel, avec une installation réelle sur le ROPAX *Norröna*. Il constitue aujourd'hui l'une des solutions les plus intéressantes à examiner pour la maîtrise de l'emballement thermique des VE à bord des navires, mais il manque encore un retour d'expérience opérationnel suffisamment large et une consolidation réglementaire/normalisation pour le considérer comme une technologie pleinement mature.

### 3.13. Tableau comparatif d'efficacité des matériels

| Critère | Lance classique | Sous-châssis/ brouillard | Perforation BP | Cobra | PyroLance | Battery Briner |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Principe | Refroidissement externe | Refroidissement ciblé externe | Injection interne | Perforation + injection | Perforation + injection | Refroidissement massif |
| Perforation | Non | Non | Oui | Oui | Oui | Non* |
| Refroidissement pack batterie | Faible à moyen | Moyen | Élevé si pénétration | Élevé si pénétration | Élevé si pénétration | Très élevé potentiel |
| Risque opérateur | Faible | Faible | Élevé | Moyen | Moyen | Faible |
| Risque électrique | Faible à modéré | Faible à modéré | Élevé | Modéré | Modéré | Modéré |
| Risque mécanique | Faible | Faible | Élevé | Élevé | Élevé | Faible |
| Protection véhicules voisins | Très bonne | Très bonne | Faible | Faible | Faible | Moyenne |
| Automatisation | Oui selon navire | Oui, potentiellement | Non | Non | Non | Oui, potentiellement |
| Consommation d'eau | Élevée | Variable | Faible | Moyenne | Moyenne | Élevée |
| Maturité incendie générale | Très élevée | Élevée | Élevée | Très élevée | Élevée | Émergente |
| Maturité Li-Ion | Limitée | Prometteuse | Moyenne | Moyenne | Moyenne | Prometteuse |
| Maturité maritime | Très élevée | Moyenne | Faible à moyenne | Élevée | Moyenne | Récente |
| Arrêt démontré du runaway | Non | Non | Non généralisable | Non généralisable | Non généralisable | Non généralisable |
| Intérêt car deck | Très élevé | Très élevé | Conditionnel | Élevé | Moyen à élevé | Très élevé |
| Emploi première intention | Oui | Oui si disponible | Non | Non systématique | Non systématique | Non systématique |

* Selon la configuration d'injection.

## 3.14. Les dispositifs de turbines à brouillard d'eau

### *3.14.1. Identification du dispositif*

La turbine à brouillard d'eau (ou *water mist turbine*) est un canon motorisé qui projette un jet puissant et large d'eau pulvérisée en microgouttelettes. Elles sont utilisées comme solutions de lutte contre l'incendie (mobile ou stationnaire) dans des environnements exigeants comme les ponts-garages des navires rouliers transportant des VE.







### *3.14.2. Description et principe de fonctionnement*

Le système utilise la propriété de l'eau à absorber massivement la chaleur lors de sa transformation en vapeur.

- Production de brouillard : l'eau est mise sous haute pression (souvent via un groupe pompe dédié) et forcée à travers des buses spécifiques pour créer des microgouttelettes (généralement) ;
- projection par turbine : ces gouttelettes sont projetées par une turbine (souvent commandée à distance) qui crée un flux d'air puissant. La portée et le volume de couverture sont ainsi largement augmentés ;
- triple action sur le foyer :
  - **refroidissement (dominant) :** la petite taille des gouttelettes permet une évaporation ultra-rapide au contact de l'incendie, absorbant la chaleur latente de vaporisation. C'est essentiel pour contrer l'emballement thermique de la batterie ;
  - **inertage/étouffement :** la vapeur d'eau générée se dilate jusqu'à 1 700 fois son volume, déplaçant l'oxygène dans la zone de combustion et ralentissant, voire arrêtant, le feu (étouffement local) ;
  - **atténuation du rayonnement :** le brouillard d'eau agit comme un écran de vapeur qui bloque la transmission de chaleur radiante vers les VE adjacents, empêchant la propagation.

### *3.14.3. Application maritime*

Sur les navires, ces systèmes peuvent être déployés :

- en poste fixe (automatique) : intégrés à la structure du pont, ils peuvent se déclencher automatiquement à la détection d'un incendie (souvent en complément des systèmes déluge ou sprinkler classiques) pour une attaque immédiate ;
- en unité mobile (semi-automatique) : montés sur un chariot télécommandé ou une base mobile, ils permettent à l'équipage d'intervenir à distance sur un foyer ciblé.

| Caractéristique | Avantages | Inconvénients |
|---|---|---|
| **Efficacité Thermique** | Refroidissement supérieur : absorption de chaleur très efficace due à la grande surface d'échange des microgouttelettes. Essentiel contre les hautes températures de l'emballement thermique. | Efficacité dépendante de la pénétration : le brouillard d'eau peut être moins efficace pour pénétrer les boîtiers de batterie (enveloppes métalliques robustes) et atteindre directement les cellules en feu, comparé à une injection directe dans le pack. |
| **Sécurité/Dommages** | Consommation d'eau réduite : utilise beaucoup moins d'eau (jusqu'à 90% de moins) que les systèmes traditionnels (sprinklers), réduisant le risque de déstabilisation du navire par l'excès d'eau et les dommages matériels. | Sensibilité au confinement : le mécanisme d'inertage est moins efficace dans les grands espaces très ouverts ou ventilés (comme un pont extérieur de navire) car l'effet de déplacement d'oxygène est dilué. |
| **Intervention Maritime** | Léger et compact (HP) : les systèmes haute pression nécessitent des tuyauteries de plus petit diamètre et des réserves d'eau réduites, un avantage crucial en termes de poids et d'encombrement à bord d'un navire. | Risque de ré-inflammation : si le refroidissement n'est pas maintenu suffisamment longtemps ou si la pénétration est insuffisante, la chaleur interne de l'emballement thermique peut provoquer une reprise de feu. |
| **POLYVALENCE** | Non-toxique : utilise de l'eau pure, sans danger pour le personnel et l'environnement marin, contrairement a certains agents chimiques/gazeux. | Gestion des eaux : même avec une faible consommation, la collecte et le retraitement des eaux d'extinction (qui peuvent contenir des résidus toxiques des batteries) doivent être prévus en milieu maritime. |

## 3.15. Extincteurs portatifs et leurs agents extincteurs

L'intervention rapide sur un emballement thermique d'une batterie Lithium-Ion (Li-Ion) à bord d'un navire est cruciale. Les extincteurs portatifs traditionnels (eau, mousse, poudre ABC) sont généralement inefficaces, voire dangereux, car le feu Li-Ion est une réaction chimique interne produisant son propre oxygène et atteignant des températures extrêmes.

Pour les VE, qui contiennent des batteries de forte puissance, les extincteurs portatifs ne suffisent qu'à contenir un début d'incendie de surface, avant l'arrivée de moyens plus lourds.

Voici l'identification et la description des principaux types d'extincteurs portatifs spécialisés, y compris le type « Lith-Ex ».

### *3.15.1. Dispersion aqueuse de vermiculite (DAV)*

C'est l'agent extincteur le plus spécifiquement conçu pour les feux de batteries Li-Ion.

#### *3.15.1.1. Identification et agent extincteur*

- Nom commercial courant : Lith-Ex ;
- agent extincteur : DAV ;
- description de l'agent extincteur : c'est une solution aqueuse qui contient des plaquettes de vermiculite exfoliée (un minéral argileux) en suspension.

#### *3.15.1.2. Principe de fonctionnement*

L'extinction repose sur une double action :

- refroidissement : la teneur en eau refroidit très rapidement la source de chaleur et les flammes externes ;
- étanchéité/isolation : au contact de la chaleur, l'eau s'évapore et les plaquettes de vermiculite se déposent pour former un film continu, non-conducteur et ignifuge sur la source du feu. Ce film agit comme une barrière physique contre l'oxygène et la chaleur, encapsulant la source de combustible.

#### *3.15.1.3. Domaine d'application (portatif)*

Les modèles portatifs (1 L, 2 L, 6 L, 9 L) sont principalement adaptés aux petits appareils électroniques, aux batteries de vélos/trottinettes électriques ou aux débuts d'incendie de modules isolés dans un VE, surtout en espace confiné.

### *3.15.2. Type à hydrogel (agents gélifiants)*

Ce type d'extincteur utilise des agents à base d'eau, modifiés par des additifs pour augmenter leurs performances.

#### *3.15.2.1. Identification et agent extincteur*

- Nom commercial courant : variés (ex. Aqua Lithium, HydroGel, etc.) ;
- agent extincteur : eau pulvérisée avec additif gélifiant/à faible tension superficielle.

#### *3.15.2.2. Principe de fonctionnement*

- Refroidissement amélioré : l'additif (souvent sans fluor) réduit la tension superficielle de l'eau, permettant une meilleure pénétration dans la structure du combustible et un effet de refroidissement accru ;
- gélification : l'agent crée un film épais et gélifié au contact de la chaleur. Ce film permet d'isoler temporairement les cellules et de bloquer le rayonnement thermique pour prévenir la propagation à d'autres cellules ou véhicules.

#### *3.15.2.3. Domaine d'Application (portatif)*

Similaire à la DAV, ils sont utilisés pour maîtriser les flammes et refroidir la zone en surface, mais leur capacité à créer une barrière isolante est souvent considérée comme moindre que la DAV. Ils nécessitent d'être appliqués le plus directement possible sur la batterie.

| Caractéristiques | Avantages (DAV/Hydrogel) | Inconvénients (DAV/Hydrogel) |
|---|---|---|
| **Efficacité Spécifique** | Aucun pour les batteries de véhicules électriques.<br>Ils peuvent représenter un intérêt pour les batteries de faible puissance. | Les modèles portatifs (jusqu'à 9L) sont insuffisants pour éteindre une batterie de VE entièrement en feu (pouvant atteindre 60 kWh et plus). |
| **Sécurité/Propriétés** | Non-toxique et écologique : la DAV est écologique et non-toxique pour les personnes, un avantage crucial à bord. Il est non-conducteur d'électricité. | **Pénétration difficile** : le carter de protection des batteries de VE ne permet pas d'atteindre les cellules internes en emballement thermique. L'action n'est que superficielle. |

| Caractéristiques | Avantages (DAV/Hydrogel) | Inconvénients (DAV/Hydrogel) |
|---|---|---|
| **Application Maritime** | Homologation Marine (MED) : plusieurs modèles d'extincteurs Li-Ion sont homologués MED (*Marine Equipment Directive*), requis pour une utilisation à bord des navires. | Durée d'action courte : le temps de décharge (quelques dizaines de secondes) est très court par rapport à la durée potentielle de l'emballement thermique (qui peut durer des heures). |
| **Polyvalence** | Feux de classe A (solides) et D (métaux) : La DAV est souvent également efficace sur ces types de feux. | La batterie doit être refroidie par des moyens lourds (type turbine ou lance) pour garantir l'arrêt de l'emballement thermique. |

### *3.15.3. Conclusion pour les navires*

Les extincteurs portatifs spécialisés (DAV/Hydrogel) sont des outils de première intervention essentiels pour maîtriser, contrôler et retarder la propagation d'un début d'incendie de petite batterie Li-Ion ou pour prévenir l'embrasement des matériaux environnants. Cependant, ils ne remplacent pas les systèmes d'extinction fixes (brouillard d'eau haute pression) ou mobiles lourds qui sont nécessaires pour refroidir efficacement et durablement le pack batterie d'un véhicule électrique complet.

## 3.16. Les couvertures anti-feu

Ne sont pas conçues pour éteindre le feu par elles-mêmes, mais pour le contenir, l'isoler et empêcher sa propagation en attendant l'intervention des équipes de secours et des systèmes fixes du navire.








### *3.16.1. Types*

Les couvertures anti-feu spécialisées pour les feux Li-Ion se distinguent par leur capacité à résister à des températures extrêmes et par leur composition conçue pour confiner à la fois la chaleur, les flammes et les fumées toxiques.

| Type de Couverture | Matériau principal | Description et résistance Thermique |
|---|---|---|
| **Couverture en fibre de verre haute performance** | Fibres de verre (revêtues ou non). | Matériau textile ignifuge standard. Résiste généralement à des températures supérieures à. Revêtements en silicone ou autres polymères sont souvent ajoutés pour une meilleure résistance chimique et thermique. |
| **Couverture en fibre de silice ou minérale** | Fibres de silice (ou matériaux d'origine minérale avancée). | Offre une résistance thermique supérieure, souvent au-delà de et parfois jusqu'à. Conçue pour les incendies les plus intenses, comme ceux des grandes batteries de VE. |
| **Couverture imprégnée de DAV** | Fibre de verre ou composite + DAV (Aqueous Vermiculite Dispersion). | Combinaison de textile résistant et d'un agent extincteur. Le revêtement DAV renforce l'isolation thermique et la capacité à prévenir la ré-ignition et la propagation des débris. |

#### *3.16.1.1. Principe de fonctionnement*

Le rôle principal de la couverture est d'agir sur les facteurs externes du feu, **sans pouvoir arrêter la réaction chimique interne (emballement thermique)** :

- confinement des flammes et de la chaleur : en couvrant entièrement le véhicule, la couverture isole la source de l'incendie, limite le flux thermique en empêchant les flammes de se propager aux autres véhicules ou matériaux du navire ;
- réduction de l'apport d'oxygène : la pose d'une couverture réduit l'apport d'oxygène extérieur à la zone de combustion, étouffant les flammes de surface et limitant la combustion secondaire des gaz libérés ;
- filtration des fumées toxiques : les couvertures modernes et denses limitent la dispersion des fumées et gaz toxiques (incluant le fluorure d'hydrogène, HF) dans les espaces confinés du pont garage, protégeant temporairement l'équipage et le système de ventilation du navire.

### *3.16.2. Avantages et inconvénients en milieu maritime*

| Caractéristiques | Avantages | Inconvénients |
|---|---|---|
| **Confinement** | Peut servir à protéger les véhicules périphériques en masquant les flammes de type torchère. | **Ne stoppe pas l'emballement.**<br>Ne peut pas refroidir ou arrêter la réaction chimique interne (emballement thermique) qui peut se poursuivre pendant des heures sous la couverture.<br>La chaleur ne peut s'évacuer et contribue de fait au développement de l'emballement thermique.<br>**Il existe un risque réel d'explosion consécutif au confinement.** |

| Caractéristiques | Avantages | Inconvénients |
|---|---|---|
| **Sécurité** | | **Manipulation risquée :** nécessite une manipulation par du personnel formé (souvent 2 à 4 personnes) pour être déployée correctement sur un véhicule en feu, exposant potentiellement aux gaz, aux flammes de type torchère et aux projections de particules en fusion. |
| **Intervention** | . | **Mise en œuvre complexe et inadaptée sur un pont garage chargé.**<br>Oblige l'équipe à se désolidariser de la manche à incendie.<br>Risque au retrait : le retrait de la couverture après le confinement doit être fait avec précaution, car la ré-ignition est possible si la batterie n'est pas suffisamment refroidie et déchargée. |
| **Coût** | | Coût élevé pour les modèles de grande taille et haute performance. |
| **Taille** | Les couvertures pour VE sont spécifiquement dimensionnées pour couvrir entièrement un grand véhicule (SUV, Van), garantissant l'étanchéité au sol. | Les grandes couvertures peuvent être lourdes et encombrantes, inadaptées pour un déplacement potentiellement stressant, confiné et encombré dans un pont garage. |

En conclusion la couverture anti-feu n'apporte pas de plus-value significative. Au regard de ces différents éléments, des enjeux de sécurité pour le personnel et des risques engendrés par ces dispositifs, **la mise en place de ces dispositifs sur un véhicule soumis à un emballement thermique dans un pont garage chargé n'est pas préconisée**.

## 4. CADRE RÉGLEMENTAIRE ET NORMES DE SÉCURITÉ

### 4.1. Normes de conception et d'essais

L'industrie de l'électromobilité est de plus en plus encadrée par des normes internationales qui visent à standardiser les exigences de sécurité et d'essai[3]. La norme ISO 6469-1, qui couvre la sécurité des systèmes de stockage d'énergie rechargeable pour les véhicules routiers électriques, a été mise à jour avec l'Amendement 1 en 2022. Cet amendement est spécifiquement dédié à la gestion de la sécurité de la propagation thermique. Le document propose aux fabricants un ensemble d'outils pour évaluer la sécurité de leurs produits face à un emballement thermique, mais il ne fournit pas de critères de réussite ou d'échec absolus. Cette approche est un reflet de la complexité et de la diversité des technologies de batteries lithium-ion. La norme reconnaît qu'une méthode d'essai unique ne peut pas être applicable à toutes les architectures de cellules. En conséquence, elle propose plusieurs méthodes de déclenchement d'un emballement thermique, telles que le chauffage interne de la cellule, le chauffage externe localisé ou la pénétration par clou, permettant aux fabricants de choisir l'approche la plus pertinente pour leur produit. En ne dictant pas une solution unique, la norme encourage l'ingénierie proactive et l'innovation continue, en obligeant les fabricants à évaluer de manière exhaustive la robustesse de leur système et à démontrer leur capacité à atténuer le risque de propagation.

[3] La norme chinoise GB38031-2025 avec la non propagation en cas de l'emballement thermique « After thermal emballement thermique caused by internal short-circuiting of a single cell, the battery pack or system should not catch fire or explode ».

### 4.2. Normes de transport et de stockage

La sécurité des batteries lithium-ion est également régie par des normes de transport et de stockage, qui sont essentielles pour la chaîne d'approvisionnement et la logistique. La réglementation UN 38.3 est une norme mondiale qui s'applique au transport de toutes les batteries au lithium seules mais pas dans les véhicules électriques, les classant comme des « marchandises dangereuses » (Classe 9) et imposant des tests rigoureux pour réduire les risques d'incendie ou d'explosion pendant le transport.

En ce qui concerne le stockage, la *national fire protection association* (NFPA) 855 et la *« Society of Automotive Engineers (SAE) »* J3235 fournissent des recommandations et des meilleures pratiques pour l'installation et l'entreposage sécurisé des batteries au lithium-ion, notamment la séparation des batteries endommagées et le respect des conditions de stockage préconisées par le fabricant.

## 5. ÉTAT DE L'ART ET PERSPECTIVES

### 5.1. État de l'art et feuille de route technologique

L'industrie de l'électromobilité se dirige vers des solutions de gestion thermique de plus en plus intégrées et sophistiquées. Les systèmes de gestion thermique intégrés ne se limitent plus à la seule batterie, mais gèrent de manière intégrée la température de tous les composants du véhicule, y compris le moteur électrique, l'électronique de puissance et l'habitacle, pour maximiser l'efficacité et l'autonomie.

Parallèlement, la recherche et le développement se concentrent sur la réduction du risque à la source. Les innovations chimiques visent à rendre la batterie intrinsèquement plus sûre, avec le développement d'additifs d'électrolyte ignifuges[4], qui réduisent de manière significative les risques d'incendie sans compromettre les performances. De nouvelles chimies de batterie, telles que les batteries à double chimie, les batteries au sodium-ion et les batteries solides, sont également étudiées comme alternatives potentiellement moins volatiles. Cependant, leur comportement en termes d'emballement thermique reste à étudier. En effet, les premières études sodium-ion montrent un profil de risques similaires à la technologie Li-Ion.

### 5.2. Recommandations

Pour les équipages de navires et les services d'urgence, l'analyse des incidents réels révèle l'impératif de la préparation et de la formation. L'équipement adapté, notamment les EPI pour se protéger contre les risques chimiques, et la mise en place de procédures d'intervention claires, y compris l'accès à des zones d'immersion dédiées pour les batteries endommagées, sont des mesures cruciales. La sécurité ne se limite pas à la technologie, mais dépend également de la vigilance constante et des pratiques rigoureuses de tous les acteurs impliqués. En conclusion, la maîtrise de l'emballement thermique est un défi évolutif qui exige une collaboration continue entre la recherche, l'ingénierie et les opérations d'urgence.

## 6. SOURCES

### 6.1. INERIS – Référence française

INERIS, « Synthèse des travaux sur l'extinction des feux de batteries Li-Ion de véhicules électriques », 17 mai 2024.

Cette étude recense les moyens fixes et mobiles d'extinction et analyse leurs performances ainsi que leurs limites.

Rapport INERIS – Synthèse des travaux sur l'extinction des feux de batteries Li-Ion

### 6.2. RISE – Essais de projection d'eau

Arvidson, M. & Westlund, Ö., « Water Spray Fire Suppression Tests Comparing Gasoline-Fuelled and Battery Electric Vehicles », Fire Technology, 2023.

[4] On trouve les additifs halogénés (compounds à base de brome), à barrière physique (tel que le phosphore rouge) et synergiques (qui améliorent l'efficacité de l'additif principal). Des solutions plus durables, additifs sans halogènes et sans phosphore rouge) gagnent du terrain en offrant une protection incendie efficace avec un impact écotoxicologique moindre.

Les travaux sont particulièrement pertinents pour les espaces Ro-Ro et les systèmes de projection d'eau. Le corpus RISE consacré aux feux de véhicules comprend également des travaux sur les gaz de combustion et les eaux d'extinction.

### 6.3. RISE – Essais grandeur réelle sur ferry Ro-Ro

« *Large-scale tests of firefighting technologies for electric vehicle fires on board ro-ro ferries* ».

Ces essais portent notamment sur le brouillard d'eau, les rideaux d'eau, les lances et les dispositifs de perforation.

### 6.4. EMSA / Bureau Veritas / RISE – STARRS

EMSA, *Safe Transport of Alternative Fuel Vehicles on Ro-Ro Ships* (STARRS), 2025–2026.

L'étude est conduite par Bureau Veritas et RISE et vise à fournir des recommandations pour les futures orientations industrielles et l'évolution des instruments pertinents de l'OMI.

EMSA – STARRS Study

### 6.5. EMSA – Guidance AFV

EMSA*, Guidance on the Carriage of Alternative Fuel Vehicles in Ro-Ro Spaces*, publiée le 28 avril 2025.

Cette guidance est applicable aux navires nouveaux et existants et constitue une référence pour la sécurité du transport des véhicules à carburants alternatifs.

EMSA – Guidance on the carriage of AFVs in Ro-Ro spaces

### 6.6. Chen et al. – Brouillard d'eau

Bin Chen, Lizhong Yang & Ruichao Wei, « *Effect of fine water mist system layout on electric vehicle fire suppression in underground garages », Tunnelling and Underground Space Technology*, 2026.

Cette étude met notamment en évidence l'intérêt de l'application du brouillard d'eau sous le véhicule et de la combinaison des dispositifs supérieurs et inférieurs. Les résultats doivent toutefois être transposés avec prudence au contexte maritime car les essais ont été réalisés en garage souterrain.

### 6.7. Hal open science

*Performance of Extinguishing Agents against Lithium-Ion Battery Fires*

Cette étude porte sur l’efficacité comparative de plusieurs agents d’extinction pour les incendies de batteries Lithium-Ion avec un intérêt particulier pour leur capacité à retarder la propagation de l’emballement thermique.