



(ID Modèle = 454913)

Ineris - 212018 - 2798746 - v1.0

17/05/2024

## Synthèse des travaux sur l'extinction des feux de batteries Li-ion de véhicules électriques

## **PRÉAMBULE**

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

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

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

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

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

Rédaction : LECOCQ Amandine - BORDES ARNAUD

Vérification : JOUBERT LAURIS

Approbation : Document approuvé le 17/05/2024 par BOUET REMY

## Table des matières

1	Introduction.....	5
2	Principales caractéristiques d'un feu de véhicule électrique comportant une batterie Li-ion .....	6
2.1	Packs batteries de véhicules électriques.....	6
2.2	Recensement des cas d'incendies de véhicules électriques.....	6
2.3	Les principaux effets d'un emballement thermique d'un pack de véhicules électriques .....	8
3	Moyens d'extinction et d'intervention contre l'emballement thermique des batteries Li-ion de véhicules électriques .....	10
3.1	Petite échelle : évaluation de l'efficacité de divers agents extincteurs à .....	10
3.1.1	Agents gazeux .....	10
3.1.2	Agents solides .....	11
3.1.3	Agents liquides .....	11
3.1.4	Conclusion sur l'efficacité de divers agents extincteurs à petite échelle .....	12
3.2	Echelle système (pack et véhicule) : principaux moyens d'intervention et de lutte contre l'emballement thermique et sa propagation.....	13
3.2.1	Couverture anti-feu .....	13
3.2.2	Lance à eau .....	14
3.2.3	Dispositif d'immersion.....	16
3.2.4	Systèmes fixes de type sprinklage à eau et brouillard d'eau.....	18
3.2.5	Méthodes d'extinctions en interne du pack batterie.....	22
3.2.6	Cas particulier : stratégie d'intervention des services de secours dans les espaces confinés <sup>25</sup>	
4	Conclusion.....	26
	Figure 1 : Représentation de principe des véhicules HEV, PHEV et BEV .....	6
	Figure 2 : Extrait de l'infographie sur les feux de batteries de véhicules électriques (de 2010 au 30 juin 2023) .....	7
	Figure 3 : a) Jet de flammes provenant d'un pack batterie d'une Tesla Model X après une collision en Californie en 2017 b) longueur d'un jet de flamme mesuré lors d'un essai sur véhicule électrique .....	9
	Figure 4 : Exemples de VCE lors de l'emballement thermique de batteries automobiles .....	9
	Figure 5 : Evolution de la température lors d'essais d'extinction sur une cellule Li-ion.....	13
	Figure 6 : Mise en place d'une couverture anti-feu sur véhicule électrique <sup>34</sup> .....	14
	Figure 7 : Zones de danger lors de l'intervention sur des véhicules électriques et représentation de l'attaque dans l'axe ¾ avant du véhicule.....	15
	Figure 8 : Conteneurs d'immersion .....	17
	Figure 9 : Exemples de bain d'immersion amovible .....	17
	Figure 10 : Evolution de la puissance du feu (Heat Release Rate – HRR total représenté par la courbe noir et HRR convectif représenté par la courbe rouge) lors d'essais d'incendie et d'extinction par sprinklage sur a) véhicule électrique et b) pack batterie protégé. Les parties bleues correspondent à la période d'actionnement du sprinklage.....	18
	Figure 11 : Photo du dispositif de sprinklage et effets comparés d'un sprinklage à eau interne et externe au pack batterie <sup>45</sup> .....	19
	Figure 12 : Nombre de cellules ayant réagi en emballement thermique lors d'essais incendie avec extinction par sprinklage (spray) et brouillard d'eau (mist), comparaison des taux de propagation et de température atteinte en fonction des agents extincteurs.....	20
	Figure 13 : Configuration d'essais de propagation d'un incendie d'un véhicule électrique à des véhicules thermiques garés à proximité et tests de différentes méthodes d'extinction a) agencement des véhicules en m, le véhicule 5 étant le véhicule électrique dont le pack batterie a été court-circuité b) espace couvert accueillant les véhicule <sup>50</sup> .....	21
	Figure 14 : Dispositif fixe de brouillard d'eau basse pression <sup>50</sup> .....	21

Figure 15 : Dispositifs rideaux d'eau mobiles a) JØNI b) ALBERO.....	22
Figure 16 : Lances perforantes a) Cobra Cold Cutter, b) Lance e-fire (Murer Feuerschutz) <sup>53</sup> , c) Technologie BEST de Rosenbauer <sup>50,53</sup> .....	24
Figure 17 : Arrière du bus BYD avec en partie haute de l'image le système d'extinction embarqué....	25

# 1 Introduction

L'exploitation de l'accidentologie et des comptes rendus d'intervention montre que l'extinction des feux de batteries Li-ion est difficile quelle que soit l'application. Dans le domaine stationnaire, l'étude de 2022<sup>1</sup> (rapport Ineris - 207085 - 2759437 - v1.0) montre que le dispositif d'extinction en place (lorsque le système en était équipé) s'est souvent avéré inefficace pour arrêter la propagation d'un emballement thermique et d'un feu généralisé dans des systèmes containerisés. Dans le domaine automobile, l'extinction est rendue difficile (lorsque la batterie du véhicule électrique est impliquée) par l'inaccessibilité des composants actifs de batterie, source de la réaction d'emballement thermique, intégrés dans différents sous-ensembles (modules et pack) puis au châssis du véhicule, empêchant les agents extincteurs d'atteindre le cœur du pack batterie.

Le présent document a pour objectif de recenser les moyens d'extinction fixes et mobiles sur les feux de batteries Li-ion pour les applications véhicules électriques et de déterminer leur degré d'efficacité. Il s'appuie notamment sur une recherche bibliographique et sur les échanges de l'Ineris avec des organismes de sécurité incendie.

## 2 Principales caractéristiques d'un feu de véhicule électrique comportant une batterie Li-ion

### 2.1 Packs batteries de véhicules électriques

Selon l'application visée, l'énergie du pack utilisé dans le véhicule électrique peut varier considérablement, et l'environnement proche du pack sera très différent (présence ou non d'un moteur thermique alimenté par de l'essence).

Comme le montre la Figure 1, on peut distinguer :

- Les véhicules complètement électriques (BEV), qui possèdent un moteur purement électrique alimenté par une batterie de grande énergie (jusqu'à 100 kWh) et de tension proche de 400V ;
- Les véhicules hybrides rechargeables (PHEV), qui possèdent une double motorisation électrique/thermique. La batterie est ici d'énergie intermédiaire (8 à ~18 kWh) et de tension proche de 400V ;
- Les véhicules hybrides (HEV), qui possèdent une motorisation thermique assistée par un ou plusieurs moteurs électriques. La batterie est de faible capacité, de l'ordre du kWh et sa tension généralement autour de 200V.

A ce jour, la batterie est généralement située sous le plancher de l'habitacle dans le cas des voitures, sur le toit ou à l'arrière dans le cas des bus, et derrière l'essieu avant dans le cas des camions.

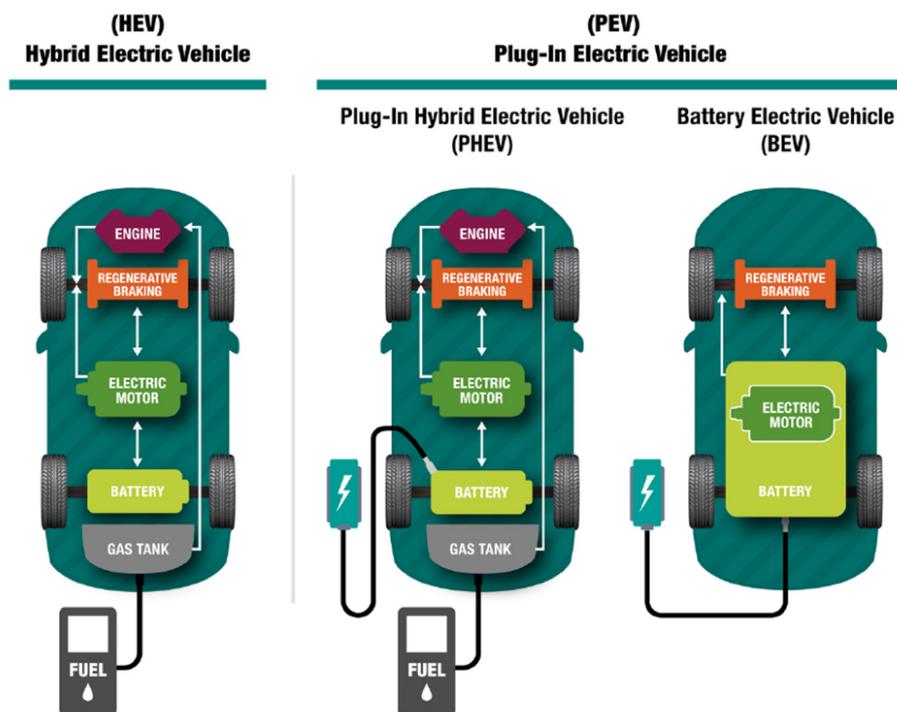


Figure 1 : Représentation de principe des véhicules HEV, PHEV et BEV<sup>2</sup>

### 2.2 Recensement des cas d'incendies de véhicules électriques

Il est constaté depuis quelques années, principalement depuis l'année 2017, une augmentation significative à la fois de la part de marché des véhicules électriques dans le marché mondial automobile, et dans le même temps un nombre croissant de feux de véhicules électriques constaté chaque d'année. Depuis 2010 jusqu'au 15 novembre 2023, 430 feux de batteries de traction de véhicules électriques (BEV et PHEV) ont été recensés (Figure 2)<sup>3</sup>.

31% des feux se sont produits lorsque le véhicule était stationné en extérieur ; 25 % lorsque le véhicule était stationné dans un espace fermé (parking souterrain, garage, etc.) et 29 % en cours de roulage. 18% des incendies se sont produits lorsque le véhicule était en charge, et 2 % dans l'heure qui a suivi la déconnexion d'une borne de charge. 95 % de l'ensemble des incidents recensés ont donné lieu à un feu, 5 % à une explosion consécutive à l'accumulation de gaz (Vapour Cloud explosion). Parmi ces 5 % ayant donné lieu à une explosion de gaz, 70 % des cas se sont produits dans un espace fermé (parking souterrain, garage, etc.).

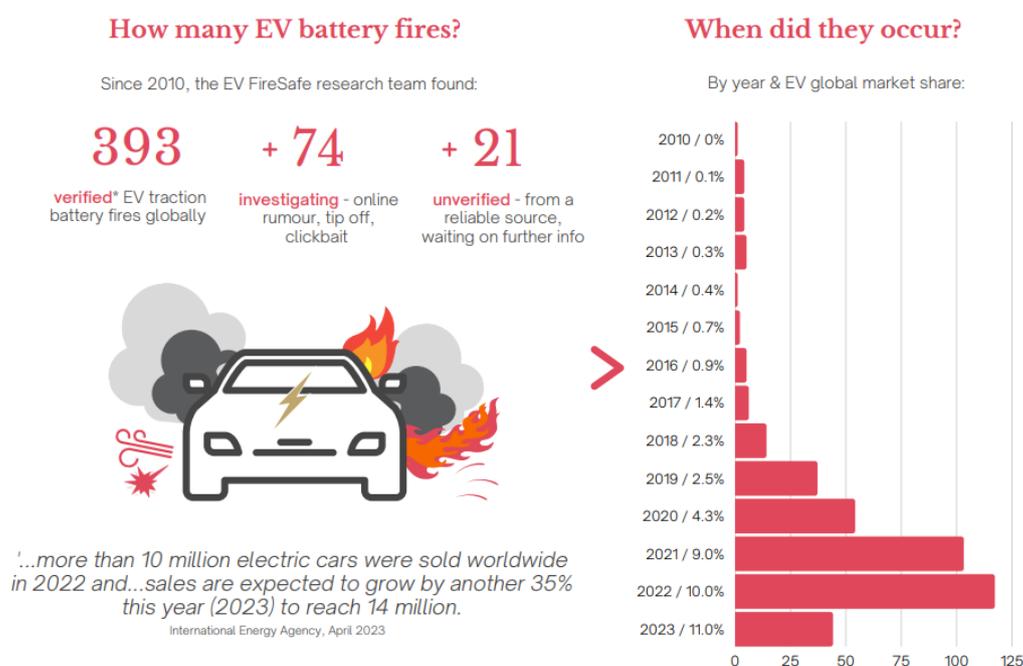


Figure 2 : Extrait de l'infographie sur les feux de batteries de véhicules électriques (de 2010 au 30 juin 2023)<sup>4</sup>

Plusieurs scénarios déclencheurs de l'emballement thermique sont identifiés :

- La charge du pack batterie lorsque le véhicule électrique est en stationnement (surcharge, défaut de BMS, chargeur non adapté...);
- Des facteurs externes, qui peuvent entrainer l'emballement thermique de la batterie de manière plus ou moins immédiate (forte pluie/immersion, feu externe, malveillance, consécutive à un choc, collision...);
- Des facteurs internes à la batterie (mauvaise conception/fabrication) et/ou non identifiés.

Il convient bien sûr de rester prudent de manière générale sur l'exploitation des statistiques, au regard du taux de pénétration actuel des véhicules électriques au sein du parc automobile mondial et des différences culturelles et techniques quant au reporting représentatif sur les feux de véhicules électriques.

## 2.3 Les principaux effets d'un emballement thermique d'un pack de véhicules électriques

Sur la base du retour d'expérience et d'essais de combustion réalisés uniquement sur des packs batteries de véhicules électriques et sur des véhicules électriques complets par la NFPA<sup>6</sup>, l'Ineris<sup>6</sup> et la Brigade des Sapeurs-Pompiers de Paris (BSPP), les principaux enseignements sont les suivants :

- lorsque la batterie est impliquée dans l'incendie, quelques secondes suffisent pour que la combustion devienne intense. La durée de combustion d'un véhicule électrique équipé d'une batterie Li-ion varie en fonction de l'énergie stockée. Cette durée peut être longue, jusqu'à 1h30,
- pour les packs batteries composés de petits éléments unitaires, des projections de ces éléments peuvent être observés jusqu'à plus plusieurs dizaines de mètres (cas d'un feu sur une Tesla après une collision violente en 2020 aux Etats Unis),
- des bruits secs (« pop ») et/ou d'émission de gaz peuvent être entendus et des arcs électriques et des étincelles peuvent être observés,
- des essais d'incendies réalisés par différents équipes sur véhicules BEV, PHEV et thermiques indiquent que les pics de puissance instantanés (Heat Release Rate-HRR) mesurés sur des véhicules électriques sont similaires à ceux des véhicules thermiques, de l'ordre de 6 à 9 MW, dépendant de la taille du véhicule et de l'énergie de la batterie<sup>7,8</sup>.
- des jets enflammés (flammes directionnelles) ou des jets de gaz chauds liés à la combustion du pack batterie peuvent être observés, représentant une particularité des feux de véhicules électriques (Figure 3). Ces jets de flammes peuvent se produire par intermittence sur plusieurs dizaines de seconde. La longueur du jet de flamme est variable en fonction du design du pack. Toutefois, un jet de flamme d'une longueur de 2 à 3 m semble être un bon ordre de grandeur ; une longueur de 2,56 m a été relevée lors d'essais récents sur véhicule électrique<sup>9</sup> (Figure 3b). Des températures élevées (> 1000°C) sont atteintes au sein du véhicule et au niveau du pack batterie,
- des émissions de fumées sont observées. Les essais de combustion sur des véhicules électriques et thermiques équivalents réalisés à l'Ineris ont montré qu'une quantité similaire de gaz CO<sub>2</sub>, CO, hydrocarbures totaux, NO, NO<sub>2</sub>, HCl et HCN avait été émis pour les 2 types de véhicules. En revanche, la teneur en HF était plus importante pour les véhicules électriques en raison de la combustion du pack batterie Li-ion. Ces informations indiquent que le risque toxique des fumées d'incendie est présent quel que soit le type de véhicule, électrique ou thermique. En plus de ces gaz les fumées émises par les batteries contiennent des particules pouvant être de très petite taille contenant des métaux, ce qui représente une particularité des feux de véhicules électriques. Les conséquences de la présence de ces particules restent à ce jour mal renseignées.
- dans certaines conditions, en particulier dans les espaces confinés (parking souterrain, garage), l'accumulation des gaz émis par l'emballement thermique du pack batterie en cas d'absence d'inflammation instantanée au dégazage des cellules entrant en emballement thermique est susceptible de générer une atmosphère explosive (ATEX) pouvant engendrer une explosion en présence d'une source d'inflammation (surface chaude, étincelles éjectées lors de l'emballement thermique, arcs électriques,...). Ceci représente aussi une particularité des feux de véhicules électriques et surtout un risque identifié tardivement, par retour d'expérience. Un exemple de Vapour Cloud Explosion (VCE) en parking souterrain est illustré en Figure 4a<sup>10</sup>. Ce phénomène de VCE peut également se produire au sein de l'habitacle du véhicule, comme le montre un incident en Belgique en novembre 2023 sur une Jeep PHEV lors de sa recharge ; alors que les pompiers intervenaient pour éteindre à l'eau l'emballement thermique de la batterie (émission de fumées sans inflammation), une explosion s'est produite dans l'habitacle projetant le toit du véhicule<sup>11</sup> (Figure 4b).



a)



b)

Figure 3 : a) Jet de flammes provenant d'un pack batterie d'une Tesla Model X après une collision en Californie en 2017 b) longueur d'un jet de flamme mesuré lors d'un essai sur véhicule électrique



a) VCE dans un parking souterrain, Chine, avril 2019



b) VCE habitacle véhicule PHEV

Figure 4 : Exemples de VCE lors de l'emballement thermique de batteries automobiles

### 3 Moyens d'extinction et d'intervention contre l'emballement thermique des batteries Li-ion de véhicules électriques

Des stratégies d'extinction basées sur des agents isolant le combustible du comburant ou sur des agents inhibiteurs des réactions en chaînes permettant d'entretenir la combustion sont plus difficiles à mettre en place du fait que l'incendie d'une batterie Li-ion se différencie nettement du cas des combustibles et du fait qu'une partie de l'oxygène est disponible sous la forme d'oxydes métalliques dans les matériaux actifs de cathodes. Par ailleurs et surtout, les mécanismes de refroidissement visés classiquement par les agents extincteurs aqueux se heurtent souvent à des difficultés spécifiques associées au mécanisme d'emballement thermique qui reste une source de production de chaleur interne à la batterie Li-ion potentiellement durable dans le temps et plus ou moins difficilement accessible, selon la conception de la batterie, aux agents extincteurs liquides (cf. § 3.2 du rapport).

La principale caractéristique d'un agent extincteur face à un feu de batteries est sa capacité à refroidir, le réservoir d'énergie électrique, dans le but de limiter l'inflammation des substances internes mais également de limiter la propagation de l'emballement thermique d'une cellule à une autre, d'un module à un autre et de manière plus générale de limiter la propagation du feu à l'ensemble du véhicule et de véhicule en véhicule (ou vers d'autres éléments combustibles).

La sous partie 3.1 porte sur l'évaluation de divers agents extincteurs lors de feux de batteries Li-ion à **petite échelle** (sur une cellule ou assemblage de cellules) ; la sous partie 3.2 porte sur les moyens d'intervention et de lutte contre l'emballement thermique et sa propagation **à l'échelle pack et véhicule**.

#### 3.1 Petite échelle : évaluation de l'efficacité de divers agents extincteurs à

Il existe de nombreux agents extincteurs possédant chacun des caractéristiques uniques.

##### 3.1.1 Agents gazeux

Les agents gazeux sont répartis en deux grandes familles :

- les gaz inertes, dits à « action physique ». L'extinction avec ces agents est obtenue par diminution de la teneur en oxygène de l'air ambiant pour arrêter la réaction de combustion. Les gaz inertes les plus connus utilisés pour l'extinction sont le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), l'azote (N<sub>2</sub>), l'argon (Ar) purs ou en mélange. **Diverses études<sup>12,13,14</sup> montrent l'inefficacité des gaz inertes face à un feu de batterie Li-ion**, en raison notamment de la génération d'oxygène par la cathode de la batterie (oxydes métalliques) lors du processus d'emballement thermique,
- les hydrocarbures halogénés dits à « action chimique » ou inhibiteur. Ils agissent principalement par le mécanisme physique d'absorption de la chaleur et par l'inhibition de la réaction en chaîne responsable de la combustion. Des agents non conducteurs sont généralement choisis pour agir contre les feux électriques pour éviter des courts-circuits ou autres dysfonctionnements électriques. Ces agents inhibiteurs comprennent la famille des halons (de moins en moins utilisables du fait de leur impact à l'environnement), des hydrofluorocarbures (HFCs), le FM-200 (HFC 227ea), mais également le NOVEC 1230. **L'analyse de l'accidentologie, les études et essais menés<sup>12,15,16,17</sup> indiquent que les agents inhibiteurs ne peuvent pas traiter correctement les incendies des batteries Li-ion** en raison de leur pouvoir de refroidissement relativement faible. D'autre part, les agents à base d'halocarbures présentent l'inconvénient majeur de former des produits secondaires toxiques et corrosifs lorsqu'ils sont exposés à des températures élevées<sup>18</sup>, tels que CO, HCl, NOx et HF<sup>14</sup>. Un autre risque résiduel à leur utilisation est la formation 'post extinction des premières flammes' d'une ATEX secondaire, par dégazage de cellules entrant en emballement thermique par propagation.

### 3.1.2 Agents solides

Les agents extincteurs solides comprennent :

- Les extincteurs à poudre qui agissent par isolation, refroidissement, asphyxie et par inhibition chimique. Des essais d'extinction menés au sein de Wuhan Institute of China Classification Society sur des batteries Li-ion ont montré que **les agents extincteurs à poudre avaient très peu d'effets**<sup>13</sup>,
- des aérosols solides dont le mode d'action est l'inhibition chimique par l'interruption des réactions chimiques en chaîne au niveau moléculaire. Il s'agit par exemple d'agents à base de sels de potassium. Dans le cas des batteries, les réactions chimiques sont complexes et, le REX de certains incidents (rapport de l'accident de Perles et Castelet<sup>19</sup> sur un système stationnaire) mentionne que **le système d'extinction automatique à base de sel de potassium qui équipait le container, tel que dimensionné, s'est avéré inefficace.**

### 3.1.3 Agents liquides

Il existe de nombreux agents extincteurs liquides possédant chacun des caractéristiques uniques. Les principaux peuvent être classés de la manière suivante :

- l'eau (utilisée en jet bâton, par action de noyage ou diffusée dans des systèmes automatisés (sprinklers, systèmes déluge, brouillards d'eau)),
- des agents à base d'eau et d'additifs,
- des agents émulseurs : solution aqueuse saponifiante (mousse),
- dispersion de vermiculite aqueuse (AVD).

#### 3.1.3.1 Agents aqueux ou biphasiques

De nombreux essais d'extinction à base d'agents aqueux ont été réalisés à petite échelle sur des cellules Li-ion et assemblages de quelques cellules. **A cette échelle, les résultats de ces études ont montré que l'eau et les agents aqueux (eau et additifs) étaient les plus efficaces** pour refroidir la cellule, limiter la propagation d'un emballement thermique au sein d'un groupe de quelques cellules et que cette efficacité augmentait avec le volume appliqué<sup>20</sup>. L'eau présente en effet la meilleure capacité de refroidissement et permet une diminution significative de la température des cellules.

Des essais d'extinction par brouillard d'eau à l'échelle cellule/assemblage de cellule ont été menés par plusieurs équipes de recherche<sup>21,22, 23, 24, 25</sup>. Les essais réalisés dans le cadre de ces études ont montré que l'efficacité du brouillard d'eau appliqué sur un feu de cellules Li-ion dépendait notamment de la taille des gouttelettes, de la durée de pulvérisation, de la dynamique des particules du brouillard et de sa capacité à atteindre la surface de combustion à travers la fumée générée par la batterie.

Ainsi, quelques études<sup>21,26</sup> montrent une certaine efficacité du brouillard d'eau face à un feu sur un assemblage de cellules Li-ion avec une réduction de la propagation de l'emballement thermique de cellules en cellules dans certaines conditions alors que d'autres études<sup>27,28</sup> indiquent une efficacité relativement faible du brouillard d'eau pur avec un taux de dissipation thermique ne représentant que 3,54 % de la chaleur dégagée pendant l'emballement thermique d'une cellule format 18650. Il est donc difficile pour le brouillard d'eau pur de freiner l'augmentation rapide de la température de la cellule pendant son emballement thermique. Ainsi, l'ajout d'additifs au brouillard d'eau a été largement étudié et il a été démontré une nette amélioration de l'efficacité d'extinction après l'ajout d'additifs<sup>27,29</sup>. L'effet refroidissant du brouillard d'eau contenant des additifs est influencé à la fois par la tension superficielle et la capacité de moussage. L'additif ayant une tension superficielle et une capacité de moussage plus faibles améliore le transfert de chaleur du brouillard d'eau.

Des essais avec et sans application de brouillard d'eau ont montré que la concentration maximale instantanée de HF enregistrée au moment de l'application du brouillard d'eau dans les flammes est environ deux fois plus élevée que dans les essais sans extinction<sup>25</sup>. En effet le brouillard d'eau fournit plus de radicaux [H] entraînant la formation de HF plus élevée. Lors de la suite des essais, le HF a été rapidement dissous dans le brouillard d'eau, ce qui a entraîné une diminution rapide de la concentration de HF<sup>30</sup>. On pourra aussi noter que certains tunnels de trafic routiers sont équipés de systèmes d'extinction à brouillard d'eau (tunnel double étage de l'A86 au Sud-Ouest de Paris par exemple), dont l'efficacité avait été testée en Suisse par des essais en grand sur véhicules conventionnels.

### 3.1.3.2 Agents émulseurs (mousse)

Des essais d'extinctions sur des cellules Li-ion de format 18650 menés par le service d'incendie du Ministère de la Sécurité Publique de Chine ont montré que l'utilisation d'agents émulseurs (mousse) de type AFFF (Agent formant un film flottant) ne permettait pas d'éteindre complètement l'incendie et qu'une reprise du feu avait été constatée. La mousse contribue au refroidissement mais comparée à l'eau, la mousse a davantage de difficultés à pénétrer dans l'espace des packs batteries et à refroidir l'intérieur des batteries<sup>14</sup>.

### 3.1.3.3 Dispersion de vermiculite aqueuse (AVD)

La vermiculite est dispersée dans l'eau après broyage, formant une dispersion stable de vermiculite dans l'eau. Son mécanisme d'extinction consiste principalement à refroidir et à isoler en formant un film à la surface des batteries. Des essais d'extinction d'emballlements thermiques de cellules Li-ion 21 700 ont montré que la dispersion aqueuse de vermiculite (AVD) réduisait efficacement la température de la surface de la batterie et empêchait le feu de se rallumer et de se propager. Néanmoins, dans ces essais, l'agent est appliqué directement sur les cellules. D'autres essais montrent que l'AVD met plus de temps à éteindre l'incendie d'un pack-batterie que d'autres agents extincteurs aqueux car il est difficile pour l'agent extincteur AVD à haute viscosité de pénétrer dans l'espace entre les cellules/modules<sup>14</sup>.

## 3.1.4 Conclusion sur l'efficacité de divers agents extincteurs à petite échelle

Les études menées à petite échelle montrent que :

- l'effet de refroidissement des agents extincteurs gazeux actuellement disponible est médiocre avec un risque de propagation de l'emballlement thermique ou de ré-inflammation de la batterie important. Dans les espaces confinés, les agents extincteurs gazeux peuvent augmenter la toxicité et réduire la concentration en oxygène dans l'espace, ce qui représente des risques à prendre en compte par le personnel de secours en cas d'incendie,
- l'agent extincteur solide a un effet de refroidissement insuffisant et une capacité de pénétration entre les cellules faible. Par conséquent, l'effet d'extinction est limité et la batterie continuera à brûler ou à se réenflammer,
- parmi les agents extincteurs liquides, les agents aqueux ont la capacité de refroidissement la plus importante et sont les plus efficaces face à un feu de cellules Li-ion. Des additifs appropriés peuvent améliorer de manière significative la capacité de refroidissement de l'eau pure et réduire la consommation d'eau. Les agents émulseurs (mousse) et à base de vermiculite (AVD) ont une efficacité moins élevée en raison de leur difficulté à pénétrer dans les espaces inter-cellules/modules et à refroidir les batteries. Il convient de noter que tous les agents liquides peuvent avoir un certain impact sur la batterie en raison de leur propriété conductrice et notamment engendrer des phénomènes de court-circuit mais également sur l'environnement par le ruissellement des eaux d'extinction polluées si elles ne sont pas contenues.

Ces résultats sont notamment illustrés à la Figure 5 montrant les résultats d'essais d'extinction sur une cellule Li-ion. L'eau puis la mousse sont les agents les plus efficaces pour refroidir la cellule seule. L'efficacité du brouillard d'eau est moindre et dépend notamment de l'uniformité du brouillard d'eau, de la taille des gouttelettes, et de l'impulsion à laquelle les gouttelettes atteignent la surface de combustion. Les agents gazeux (CO<sub>2</sub>) et solides (à poudre) sont les moins efficace.

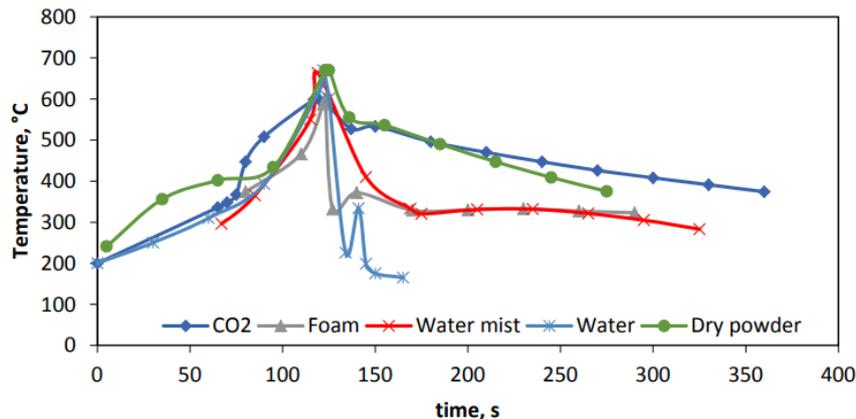


Figure 5 : Evolution de la température lors d'essais d'extinction sur une cellule Li-ion<sup>31</sup>

En ce qui concerne le contexte normatif, seule une norme néerlandaise (NTA 8133) a été publiée en 2021<sup>32</sup>. Il s'agit de la première publication pour les feux de batteries Li-ion de capacité moyenne jusqu'à 600 Wh (batteries de smartphones, d'ordinateurs portables, d'outils électriques, de drones, de vélos électriques...). Cette norme décrit la procédure d'essai à appliquer pour évaluer l'efficacité d'un agent extincteur. L'emballage thermique de la batterie est initié par surcharge et l'agent extincteur est appliqué dès l'apparition des premières flammes. L'incendie doit être éteint en 3 min, aucune ré-inflammation ne doit être observé pendant 20 min suivant l'extinction et une partie des cellules doit être opérationnelle<sup>33</sup>. Une norme relative aux extinctions de batteries Li-ion est en cours de préparation au niveau européen (CEN) en s'appuyant notamment sur les travaux néerlandais avec la volonté d'élargir à des échelles plus importantes. Pour cela, des travaux expérimentaux supplémentaires sont nécessaires.

Les études présentées dans le § 3.1 ont été réalisées à petite échelle (cellules et assemblages de cellules). Il convient d'évaluer l'efficacité des agents extincteurs à plus grande échelle (pack et véhicules), c'est l'objet de la sous partie suivante 3.2.

## 3.2 Echelle système (pack et véhicule) : principaux moyens d'intervention et de lutte contre l'emballage thermique et sa propagation

### 3.2.1 Couverture anti-feu

La couverture anti-feu est un dispositif de lutte contre les incendies couramment utilisé pour étouffer les petits feux ; elle permet notamment de stopper la production de fumées et de couper le rayonnement thermique. Cette technologie a récemment été étendue comme moyen possible face à un incendie de véhicule. Ces couvertures sont généralement fabriquées à partir de matériaux spécifiques de dimensions d'environ 6 m x 9 m afin de couvrir entièrement la plupart des véhicules. Les couvertures sont dotées de poignées intégrées qui permettent aux pompiers d'appliquer physiquement la couverture de confinement directement sur le véhicule en feu. Une fois la couverture anti-feu placée sur la voiture enflammée, elle limite l'oxygène disponible provenant de l'environnement et limite le transfert thermique. L'efficacité est démontrée sur les feux naissants de véhicules à énergie conventionnelle.

Lors d'essais réalisés par des sapeurs-pompiers autrichiens sur des véhicules électriques<sup>34</sup>, l'utilisation de la couverture a conduit à une diminution notable du dégagement de chaleur. Cependant, comme l'alimentation en oxygène du feu est en partie assurée par la batterie elle-même, il n'est pas possible d'étouffer les flammes – comme cela serait possible avec un combustible conventionnel. Le phénomène d'emballage thermique de la batterie se poursuit sous la couverture. Après environ 3 minutes, la tentative avec la couverture anti-feu a dû être abandonnée car entre autres, la couverture anti-feu était déjà endommagée.

Il a été démontré que l'utilisation d'une couverture anti-feu, à partir du moment où la batterie est déjà impliquée dans l'incendie, n'apporte pas de valeur ajoutée significative. L'application de la couverture doit être réalisée sans la présence de poches d'air entre la couverture et le véhicule, ce qui est très difficile dans le cas de l'incendie d'une batterie en raison de la dynamique du feu (fortes flammes près du sol) et de la génération d'oxygène par la batterie.

De plus, la mise en œuvre de ces couvertures n'est pas aisée ; l'espace autour du véhicule doit être suffisant et les intervenants doivent s'approcher du véhicule ou du pack en feu et peuvent être mis en danger (Figure 6) – cette opération nécessite que les intervenants soient formés, conscients des risques et portent des équipements de protection individuelle adaptés (notamment tenue feu et Appareil Respiratoire Isolant ARI).

Il est important de noter qu'un nouvel incendie peut se produire lorsque la couverture anti-feu est retirée du véhicule. Un essai récent<sup>9</sup> a montré qu'une grande quantité de fumée blanche a été émise lorsque la couverture anti-feu a été retirée et qu'une ré-inflammation s'est produite 57 s après son retrait.



Figure 6 : Mise en place d'une couverture anti-feu sur véhicule électrique<sup>34</sup>

Ainsi, dans le cas d'un incendie de voiture électrique, une couverture anti-feu utilisée seule permettra de contrôler la propagation de l'incendie dans les premiers stades mais aura peu d'effet pour arrêter l'emballement thermique du pack batterie. Ce dispositif peut être utilisée conjointement avec un système de refroidissement actif, par exemple un mur d'eau placé sous le véhicule<sup>35</sup> ; même si l'efficacité de ces 2 moyens combinés reste à prouver.

Une couverture anti-feu peut également être utilisée pour protéger d'autres véhicules à proximité ou en préventif sur un véhicule électrique endommagé.

### 3.2.2 Lance à eau

Des stratégies d'intervention sur des véhicules à énergie alternative ont été élaborées par les sapeurs-pompier. Le Service départemental et d'intervention de secours de la Vienne (SDIS86) a publié un guide<sup>36</sup> répertoriant ces stratégies sur la base d'essais réels.

Le guide décrit le principe général d'intervention en cas d'incendie sur un véhicule électrique. Ce principe consiste à :

- sécuriser l'action des secours : se protéger (à 50 m derrière un écran si possible – mur par exemple), attaque offensive à l'aide de 2 binômes d'attaque, progression dans l'axe  $\frac{3}{4}$  avant (aile avant) du véhicule en feu (Figure 7), extinction sous appareil respiratoire isolant (ARI), périmètre de sécurité de 50 m,
- le premier binôme d'attaque refroidit la batterie pour éviter son emballement thermique et/ou son inflammation ou pour tenter de l'éteindre si elle est en emballement thermique, alors que le second binôme d'attaque est en charge de l'extinction du véhicule afin de stopper tout rayonnement calorifique aux abords de la batterie. Cette méthode offensive est une attaque massive, ciblée et simultanée, qui nécessite l'utilisation de 2 lances en simultanée. En espace ouvert, l'attaque à distance (50 m) et la progression à portée de lance sont réalisés avec deux lances à débit variable (LDV) en jet droit à 250 L/min puis à partir de 10 m du foyer en jet diffusé à 250 L/min.

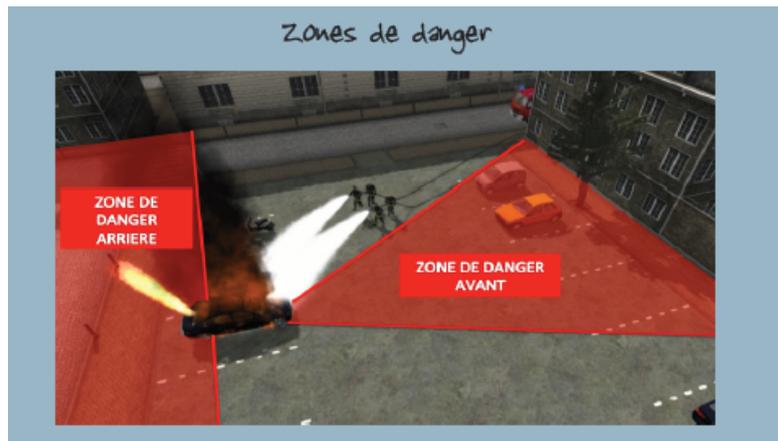


Figure 7 : Zones de danger lors de l'intervention sur des véhicules électriques et représentation de l'attaque dans l'axe  $\frac{3}{4}$  avant du véhicule

Le guide précise que la notion d'enjeu doit rester présente comme dans toutes interventions d'urgence. Une attitude défensive (pas d'extinction, périmètre de sécurité, protection de l'environnement) pourra être privilégiée lorsqu'une attaque offensive ne se justifie plus (ex. véhicule isolé entièrement enflammé sans cible à proximité).

Les essais d'extinctions réalisés par la BSPP, la NFPA et le retour d'expérience des pompiers intervenant sur des feux de véhicules électriques montrent que :

- la durée d'extinction et le volume total d'eau nécessaire à l'extinction sont significativement plus élevés par comparaison à l'extinction d'un véhicule thermique classique et dépendent de la taille et de l'emplacement de la batterie<sup>37</sup>. Un volume d'eau jusqu'à plus de 30 m<sup>3</sup> peut être nécessaire pour éteindre l'incendie,
- la difficulté de refroidir efficacement le pack batterie « à cœur » (composants internes). Le design du pack et son intégration dans le véhicule peut rendre difficile l'application directe de l'eau sur la batterie en combustion, réduisant ainsi significativement l'efficacité de l'extinction, augmentant la durée de l'extinction et la quantité d'eau nécessaire,
- seules les batteries de certains véhicules sont conçues pour permettre un noyage interne du pack, facilitant grandement l'extinction (cf. § 3.2.5).

Pour la grande majorité des véhicules électriques, l'application externe d'eau n'affecte donc que les flammes visibles, la surface externe de la batterie et tous les matériaux qui l'entourent. La quantité d'eau importante et le débit élevé nécessaire pour le refroidissement et l'extinction entraîne la génération de grandes quantités d'eau d'extinction polluées. Néanmoins, l'utilisation d'une grande quantité d'agent extincteur entraînera une dilution plus importante des polluants. Une étude plus poussée sur ce sujet est nécessaire.

D'autres technologies de lance à eau sont à l'étude, en particulier des lances diphasiques qui fonctionnent avec un débit plus faible (100 L/min) et reposent sur un procédé de fragmentation de gouttelettes d'eau grâce à l'air comprimé. Des essais sur véhicule thermique ont montré que la quantité d'eau nécessaire pour éteindre le feu avec ce type de lance serait significativement inférieure à celle utilisée avec une lance classique. Les lances diphasiques permettraient également l'abattement des flux thermiques rayonnés de manière plus importante ainsi que la capture des particules en suspension. Des essais d'extinctions avec ce type de lance sur des véhicules électriques sont nécessaires pour évaluer leur performance face à un feu impliquant l'emballage thermique d'un pack batterie.

Etant donné les difficultés d'accès au pack batterie d'un véhicule électrique et de son extinction, le retour d'expérience montre qu'il existe un risque élevé de reprise de l'incendie par l'emballage thermique des cellules du pack n'ayant pas réagi. L'analyse des accidents montre que la ré-inflammation du pack batterie peut se produire à plusieurs reprises après extinction (ex. incendie d'un véhicule électrique en Floride aux Etats-Unis en 2018<sup>38</sup>).

Une ré-inflammation retardée, c'est-à-dire plusieurs heures (22h dans le cas d'un essai à la NFPA<sup>39</sup>), jours (6 jours sur un cas en Californie<sup>40</sup>) ou semaines (3 semaines après une collision<sup>41</sup>) après que la batterie a été éteinte, a également été constatée.

Le degré élevé d'étanchéité et d'isolation des batteries entraîne des complications considérables pour les services d'incendie, tant en ce qui concerne le refroidissement des éléments de la batterie que de la mesure de la température. L'utilisation d'une caméra thermique est recommandée pour évaluer une ré-augmentation de la température du pack et une possible ré-inflammation. Toutefois, la bonne isolation du pack batterie peut fausser l'image de la température dans le pack.

### 3.2.3 Dispositif d'immersion

Les difficultés d'extinction posées par les véhicules électriques et le risque élevé de ré-inflammation ont conduit certains services de secours à opter pour la mise œuvre de dispositifs d'immersion lorsque la batterie est en cours d'emballement thermique ou après disparition des flammes visibles mais présente un risque élevé de ré-inflammation (température élevée de la batterie contrôlée par caméra thermique). Cette solution permet d'immerger totalement ou une partie du véhicule.

Il existe différents dispositifs d'immersion dont les principaux sont repris ci-après :

- conteneur d'immersion : il s'agit d'un conteneur étanche aux liquides dans lequel on peut placer le véhicule afin qu'il soit complètement immergé. Le liquide peut être de l'eau avec ou sans additif. Le conteneur doit être amené sur le lieu de l'incendie, par exemple sur la plate-forme de chargement d'une dépanneuse ou à l'aide d'un véhicule équipé d'un châssis à crochet. Il existe plusieurs variantes de conteneurs à immersion, un exemple avec un treuil pour hisser la voiture dans le conteneur est visible en Figure 8. Cette méthode assure un refroidissement externe et l'eau peut pénétrer dans le pack batterie s'il n'est pas ou plus étanche, accélérant le refroidissement. La batterie peut également se décharger électriquement si elle reste immergée dans l'eau pendant plusieurs jours ou semaines. Cependant, cette méthode a certains désavantages : difficultés opérationnelles liés à la manutention du véhicule avec une batterie dans un état instable, possibilité de reprise de l'incendie lors de la sortie du véhicule (ou plusieurs jours après) à cause de micro-courts circuits persistants, nécessité d'un volume d'eau important comparé à la masse de la batterie, possibilité de formation de gaz inflammable (notamment l'hydrogène) et d'oxygène (électrolyse de l'eau), gestion de l'eau polluée après retrait du véhicule. Les services de secours allemands recommandent d'utiliser cette méthode en dernier recours dans des cas exceptionnels<sup>42</sup>,
- bain d'immersion amovible : il s'agit d'une barrière étanche construite rapidement sur le terrain autour du véhicule impliqué. Il s'agit de quatre barrières ou de plusieurs panneaux qui peuvent être placés autour du véhicule, fixés ensemble et remplis d'eau ou d'agent émulseur (mousse) pour submerger le pack batterie du véhicule (Figure 9). Cette méthode peut permettre de maîtriser l'incendie du véhicule électrique, voire de l'éteindre et/ou d'éviter qu'il ne se propage aux véhicules voisins. Des essais combinant l'usage d'une lance incendie classique et d'un bain d'immersion ont été réalisés récemment sur un feu de véhicule électrique<sup>43</sup>. Ces essais ont confirmé que la lance incendie seule ne permettait pas d'éteindre l'incendie du pack batterie mais seulement le feu du véhicule. Dans les conditions de ces essais, le remplissage du bain d'immersion à l'eau a permis un refroidissement efficace du pack batterie sans reprise de l'incendie après vidange du bac. La consommation d'eau était moindre comparé à l'utilisation d'une lance seule. L'utilisation de mousse en remplacement de l'eau a montré une efficacité de refroidissement plus faible, ce qui est cohérent avec les essais réalisés à petite échelle (cf. § 3.1.3.2). L'efficacité de cette méthode combinant l'utilisation d'une lance incendie et d'un bain d'immersion à l'eau doit être évaluée avec d'autres types de véhicules électriques. La durée d'immersion du pack dans le bain doit également être déterminée et mérite des essais/études complémentaires.



Figure 8 : Conteneurs d'immersion



Figure 9 : Exemples de bain d'immersion amovible

L'efficacité de ces méthodes d'immersion dépendent grandement de la capacité de l'eau à pénétrer dans le pack batterie ; si l'enveloppe du pack est altérée lors de l'incendie, cette entrée d'eau est possible et peut permettre un refroidissement efficace. Dans le cas contraire (véhicule brûlé mais pack batterie non emballé, instable et étanche), la capacité de refroidissement sera bien plus faible car l'eau ne pourra pas pénétrer à l'intérieur du pack. De plus amples études sur l'efficacité de ce mode d'immersion seraient nécessaires.

D'autre part, l'eau de ces conteneurs ou bain d'immersion est polluée et les services de secours doivent prendre des dispositions pour éliminer correctement l'eau contaminée. Là aussi, des études sur la qualité des eaux de noyages seraient utiles afin d'affiner les voies de traitement de ces eaux.

### 3.2.4 Systèmes fixes de type sprinklage à eau et brouillard d'eau

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

Des essais de sprinklage ont été réalisés par RISE sur des véhicules thermiques et électriques ainsi que sur un pack protégé (pour représenter le châssis). Le feu a été initié à l'aide d'un brûleur à gaz orienté vers le pack batterie. Comme le montre la Figure 10a, la 1<sup>ère</sup> activation du système d'arrosage lors du test au feu sur le véhicule tout électrique (VE) entraîne une diminution drastique de la puissance du feu (Heat release Rate – HRR). L'étude indique que cette diminution peut être attribuée à la rupture de la vitre arrière permettant à l'eau d'atteindre l'intérieur du véhicule, refroidissant le dessus de la batterie, ce qui a été confirmé par la baisse importante de la température de surface de la batterie. Après 10 min d'application, le système de sprinklage a ensuite été éteint pendant 15 min permettant au feu de se développer. Lors du 2<sup>ème</sup> déclenchement du sprinklage laissé actif pendant 20 min, un emballement thermique de la batterie a été observé. La Figure 10b montre l'évolution du HRR lors de l'essai au feu avec sprinklage sur le pack batterie seule. Le pack étant protégé de l'impact direct de l'eau de sprinklage (pour représenter la protection du châssis), aucun effet de refroidissement de l'eau sur la batterie n'a été observé.

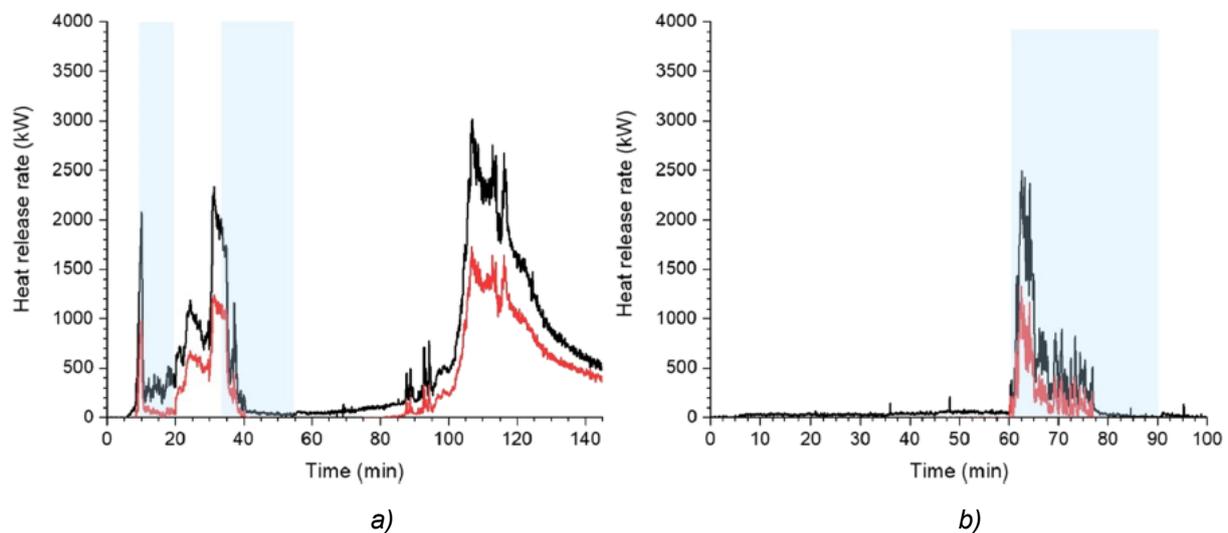


Figure 10 : Evolution de la puissance du feu (Heat Release Rate – HRR total représenté par la courbe noire et HRR convectif représenté par la courbe rouge) lors d'essais d'incendie et d'extinction par sprinklage sur a) véhicule électrique et b) pack batterie protégé. Les parties bleues correspondent à la période d'actionnement du sprinklage<sup>44</sup>

D'autres essais d'extinction d'incendie sur des packs de véhicules électriques ont été menés par RISE. Cette étude a montré que l'extinction externe par sprinklage à eau (3 buses, débit de 7,2 L/min et 30 s d'application) avait eu un effet de refroidissement et un impact limité sur la propagation de l'emballement thermique, sauf pour éteindre les flammes à l'extérieur du pack-batterie afin d'empêcher la propagation de l'incendie à l'environnement<sup>45</sup>. Intégrée dans un véhicule électrique, les batteries sont difficilement accessibles, et la plupart d'entre elles sont scellées pour éviter qu'elles ne soient pénétrées par l'eau et la poussière, et pour assurer une protection contre les chocs extérieurs. L'application externe d'eau n'affecte donc que les flammes visibles, la surface externe de la batterie et tous les matériaux qui l'entourent. **En revanche, l'application d'eau directement à l'intérieur du pack a conduit à un refroidissement plus important et une réduction de la propagation de cellules en cellules en utilisant une quantité d'eau limitée.**

Ces résultats sont illustrés dans la Figure 11, qui montre une diminution drastique de la température de la batterie par application d'un sprinklage à l'intérieur du pack comparé à un sprinklage en externe qui ne permet pas une réduction de la température du pack. L'application externe de l'agent extincteur sur la batterie n'a donc pas présenté d'avantages apparents ; elle a donné des résultats similaires à un essai sans extinction en termes de vitesse de propagation, de température de surface et de température des gaz à l'intérieur du module.

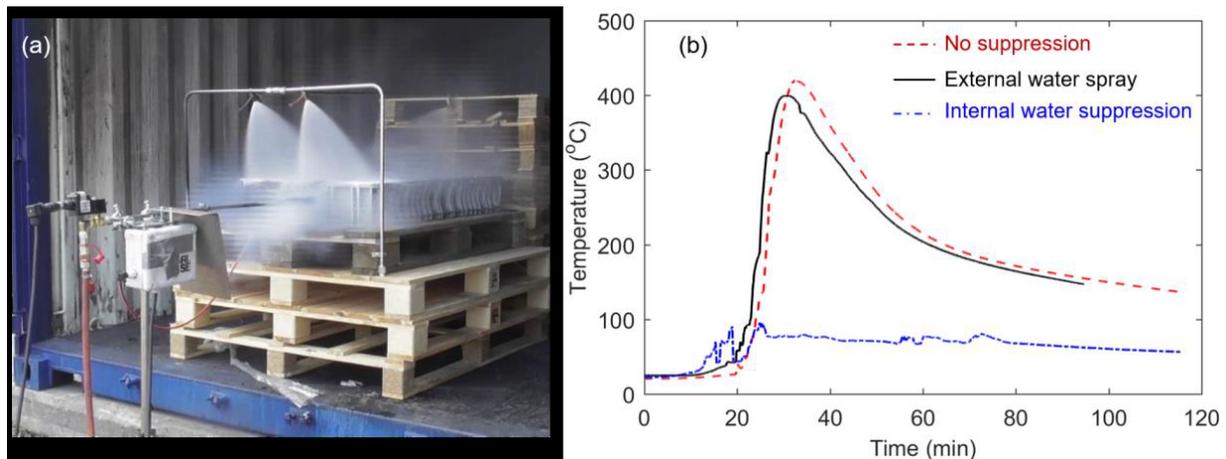


Figure 11 : Photo du dispositif de sprinklage et effets comparés d'un sprinklage à eau interne et externe au pack batterie<sup>45</sup>

La campagne d'essai de RISE s'est poursuivie par des essais d'extinction par brouillard d'eau en externe et en interne du pack. Le brouillard d'eau comprend une gamme de tailles de gouttelettes inférieures à 1000  $\mu\text{m}$ , bien inférieure à celles d'un sprinklage. Les gouttelettes plus fines ont un rapport surface/volume plus grand, ce qui entraîne une plus grande absorption de l'énergie thermique de l'air chaud pour le même volume d'eau. Dans le cadre des essais menés, la taille des gouttelettes étaient de 50  $\mu\text{m}$  de diamètre, le débit de 1,7 L/min et la durée d'application de 3 à 4 min. Le système de brouillard d'eau a légèrement mieux réussi à entraver la propagation d'une cellule à l'autre que le système de sprinklage d'eau. Cela pourrait s'expliquer par la différence de temps de libération des agents (30 s pour le sprinklage à eau et jusqu'à plusieurs minutes pour le brouillard d'eau). Cela a pu affecter la quantité d'eau pouvant être vaporisée à l'intérieur de l'enveloppe de la batterie. Une autre cause potentielle peut être liée au contenu de l'agent et à la différence de taille des gouttelettes entre un brouillard et un sprinklage.

**Il convient toutefois de noter que dans cette étude, aucun des tests n'a pu empêcher la propagation de la chaleur dans l'ensemble du module mais les systèmes internes d'extinction des incendies ont eu un effet positif puisque certaines cellules ont été épargnées.** Cette tendance a également été constatée lors de l'examen des taux de propagation moyens. La vitesse de propagation moyenne correspond au temps nécessaire à l'emballage thermique pour se propager dans l'ordre des défaillances successives, c'est-à-dire de la première à la troisième, de la troisième à la sixième et enfin de la sixième à la dernière cellule. Ces taux ont été réduits grâce à la mise en place d'un système interne d'extinction de l'incendie (Figure 12).

Au cours des essais de sprinklage d'eau, il a été observé que de grandes quantités d'eau étaient projetées hors du pack batterie, probablement en raison du court délai d'activation et de l'espace limité à l'intérieur du pack batterie. Cela suggère qu'un faible débit et un temps de libération plus long sont préférables, comme l'ont montré les essais, puisque le système de brouillard d'eau a eu un effet de refroidissement plus important que le système de sprinklage dans l'ensemble de la batterie de traction.

Test	Nr. TR cells, module 1 (-)	Mean propagation rate for cells (cells/min.)			Mean temp 1st-last + 60 min (°C)		
		1st-3rd	3rd-6th	6th-last	Mod. 2 front (TC7/8)	Mod. 2 back (TC9/10)	Air (TC14/15)
ref 1	12	8.57	1.07	0.61	248	97	88
mist 1	11	<b>2.36</b>	0.92	<b>0.26</b>	100	<b>70</b>	53
mist 2	<b>8</b>	2.61	0.48	<b>0.26</b>	<b>98</b>	<b>70</b>	<b>44</b>
ref 2	11	10.34	1.36	0.56	223	109	116
spray	11	11.11	0.91	0.50	241	164	78
spray ext 1	9	5.66	<b>0.45</b>	0.37	141	88	82
spray 2	9	3.85	0.97	0.31	143 <sup>a</sup>	97	82

The lowest values presented, and thus the most positive effect for the different evaluation criteria, are highlighted in bold values

<sup>a</sup>Estimated value since TC8 failed after the 6th consecutive thermal runaway in Module 1

*Figure 12 : Nombre de cellules ayant réagi en emballement thermique lors d'essais incendie avec extinction par sprinklage (spray) et brouillard d'eau (mist), comparaison des taux de propagation et de température atteinte en fonction des agents extincteurs<sup>46</sup>*

Ces essais ont donc montré que l'inondation totale interne du pack batterie, de préférence à un faible débit et avec des temps de libération longs est le moyen le plus efficace d'empêcher la propagation d'une cellule à l'autre et d'un module à l'autre.

Des tests d'incendie en milieu confiné impliquant plusieurs véhicules thermiques dans des parkings fermés ont été réalisés à la fin des années 1980<sup>47</sup>. L'objectif de ces essais était d'étudier l'effet d'un incendie d'un véhicule thermique dans un parking fermé équipé de sprinkler et de systèmes de ventilation. Les essais ont montré que le système de sprinklage était efficace pour contrôler un feu en développement et pour limiter la propagation du feu. Des niveaux dangereux de fumées ont été atteints pendant de longues périodes avec ou sans sprinklers.

Des essais d'incendie de véhicules thermiques réalisés entre 2007 et 2009 au Royaume-Uni dans des infrastructures représentatives de parkings couverts<sup>48</sup> ont montré le bénéfice potentiel des sprinklers pour limiter (ou retarder) la propagation du feu d'une voiture à l'autre et pour réduire les dommages aux structures. Le rapport mentionne également les limites de ces systèmes, en particulier son impact limité sur l'intensité du feu du premier véhicule (le feu a continué de se développer même après le déclenchement des sprinklers et la puissance atteinte est restée relativement élevée dans les conditions d'essais appliquées). Ces essais ont tous été réalisés sur des véhicules conventionnels.

Dans le cas où l'incendie n'est pas initié par la batterie ou lorsque le feu ne s'est pas propagé à la batterie, une extinction précoce étant recommandée, le sprinklage ou brouillard d'eau peut permettre de refroidir le véhicule et de limiter le risque d'emballement thermique du pack batterie, de limiter la propagation du feu et l'impact sur les structures avant l'arrivée des services de secours, facilitant ainsi leur intervention. Des cas récents d'incendies de véhicules électriques en parking souterrains ont effectivement montré que le dispositif de sprinklage avait permis de contrôler l'incendie évitant la propagation du feu au pack batterie du véhicule concerné ainsi qu'aux autres véhicules<sup>49</sup>.

Dans le cas où l'incendie est initié par la batterie du véhicule, ou si le feu du véhicule s'est propagé au pack batterie, l'efficacité des dispositifs de sprinklage/brouillard d'eau va dépendre de la capacité des gouttelettes d'eau à atteindre le pack batterie. Des essais consistant à initier un emballement thermique sur un pack batterie d'un véhicule électrique entouré de plusieurs voitures thermiques à moins de 40 cm dans un environnement couvert (mais non complètement clos) ont été menés récemment<sup>50</sup> (Figure 13). Diverses méthodes d'extinctions ont été testées. Pour l'un des essais, un système de brouillard d'eau à basse pression (8 barG / débit d'eau de 400 L/min), a été utilisé (Figure 14).

Lors de l'essai, ce système a permis un refroidissement du boîtier de la batterie, même si les gouttelettes d'eau n'atteignaient pas directement le pack. Dès l'activation du brouillard d'eau, une baisse de la température a été observée au niveau de la batterie, de la couche de fumée au-dessus du véhicule électrique et des voitures environnantes. L'étude mentionne que la baisse de température de la batterie est très probablement due au mauvais état du véhicule électrique, qui a permis aux gouttelettes d'atteindre la batterie (positionnée dans le coffre – Renault Fluence). Le système de brouillard d'eau s'est avéré capable de gérer l'environnement et de réduire la température à une vitesse rapide dans une zone étendue en moins de 2 minutes après l'activation. Cependant, selon la conception de la voiture (emplacement de la batterie), un effet similaire sur le refroidissement de la batterie peut ne pas être obtenu dans tous les cas.

Une autre étude récente<sup>9</sup> a évalué l'effet du brouillard d'eau (100 bar-20 L/min) sur un feu de véhicule électrique intégrant un pack batterie sous l'habitacle. Le taux de refroidissement moyen du brouillard d'eau était en moyenne de  $-3,1^{\circ}\text{C}$ . Le brouillard d'eau a contribué à réduire la température et le taux de dégagement de chaleur sans toutefois éteindre l'incendie dans l'habitacle ni arrêter l'emballement thermique de la batterie dans les conditions d'essais appliquées (faible débit notamment).

L'étude de Funk<sup>50</sup> conclue que si les gouttelettes d'eau atteignent la batterie et si l'activation et la disposition sont appropriées, les systèmes de brouillard d'eau semblent être capables de contenir les incendies de véhicules électriques (sans nécessairement les éteindre), et en particulier de réduire la propagation aux structures et aux véhicules adjacents.

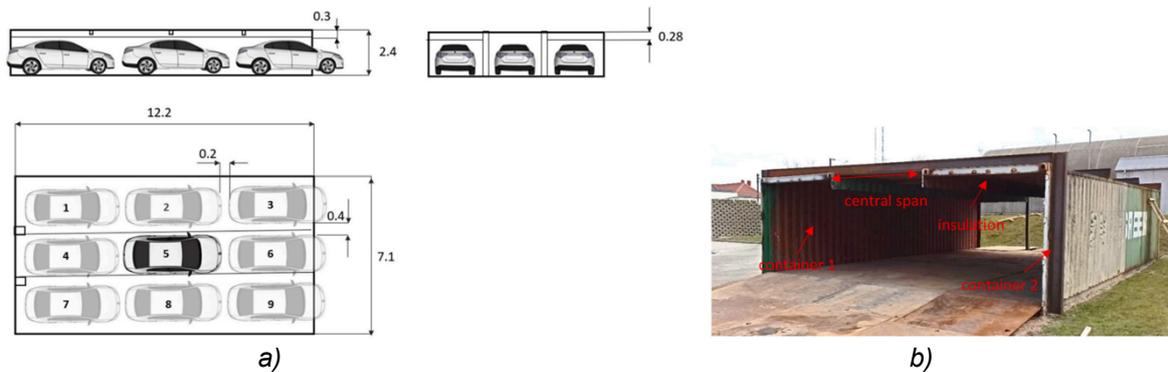


Figure 13 : Configuration d'essais de propagation d'un incendie d'un véhicule électrique à des véhicules thermiques garés à proximité et tests de différentes méthodes d'extinction a) agencement des véhicules en m, le véhicule 5 étant le véhicule électrique dont le pack batterie a été court-circuité b) espace couvert accueillant les véhicules<sup>50</sup>



Figure 14 : Dispositif fixe de brouillard d'eau basse pression<sup>50</sup>

Cette étude a également évalué l'efficacité de dispositifs rideaux d'eau portables de 2 types : l'un de la marque JØNI (Figure 15a) disponible en différentes tailles et pouvant être placé sous ou entre les véhicules et l'autre de la marque ALBERO (Figure 15b) de conception plus simple et plus légère avec des buses orientées vers le haut. La mise en œuvre du rideau d'eau JØNI d'eau n'a pas permis d'empêcher l'incendie de prendre de l'ampleur et de se propager en raison du temps nécessaire pour mettre en œuvre le dispositif et l'incapacité des gouttelettes à atteindre le pack. Le dispositif ALBERO a permis de refroidir les véhicules adjacents. Toutefois, en cas d'emballement thermique de la batterie, l'étude a montré que l'effet de ces dispositifs rideaux d'eaux portables peut être considéré comme minime ou négligeable sur la température de la batterie.



Figure 15 : Dispositifs rideaux d'eau mobiles a) JØNI b) ALBERO

Il convient également de noter que l'application d'eau sur un incendie de batteries Li-ion modifie la composition des gaz ; une augmentation de la concentration en CO, H<sub>2</sub>, hydrocarbures et HF et une diminution de la concentration en CO<sub>2</sub> sont constatés lors des essais avec extinction ; ce qui peut conduire à une modification du profil de risques et notamment l'apparition d'un risque d'explosion en présence de sources d'inflammation, par exemple des étincelles provenant des batteries ou des surfaces chaudes. En effet, de grandes quantités de gaz peuvent continuer à être libérées après l'extinction des flammes. Pour bien comprendre ce risque, et pour s'assurer que le système d'extinction d'incendie est bien conçu et efficace, il est recommandé d'effectuer des tests sur chaque installation de batterie avant d'installer un système interne d'extinction d'incendie.

Ces études montrent ainsi l'importance d'un accès direct au pack batterie lorsqu'il est nécessaire de l'éteindre ou de le refroidir. Cet accès n'est cependant pas aisé lorsque le pack est intégré dans le véhicule. C'est l'objet du paragraphe suivant.

### 3.2.5 Méthodes d'extinctions en interne du pack batterie

En ce qui concerne la stratégie d'attaque pour l'extinction des véhicules électriques équipés de batteries Li-ion, le noyage à l'eau est préconisé. Deux cas sont possibles :

- le pack batterie dispose d'un système dédié (trappe thermofusible ou similaire), également appelée « fireman access » (ex. Renault Zoé). Pour prendre l'exemple des premières générations de Zoé, celui-ci était situé sous le siège du passager arrière, et son matériau fondait avec la chaleur, rendant le « cœur » de la batterie accessible pour y diriger une lance incendie pour procéder au noyage du pack. L'extinction est alors facilitée et plus rapide et nécessite moins d'agent extincteur. Des essais ont prouvé l'efficacité de ce dispositif pour éteindre rapidement l'incendie du pack batterie du véhicule,
- le pack batterie ne dispose pas de « fireman access » (majorité des véhicules), l'extinction est alors plus difficile, longue et nécessite une grande quantité d'eau. Si un trou ou un interstice se crée au niveau du pack batterie lors de sa combustion, cela constitue un point d'entrée d'eau possible pour faciliter l'extinction. Plus la protection mécanique (conditionnement du pack) de la batterie sera importante et l'étanchéité bonne, plus difficile sera l'extinction.

Ces difficultés d'accès à la plupart des packs batterie ont poussé certains fabricants à développer des lances perforantes, qui permettent de percer le pack batterie et introduire un jet d'eau au cœur du pack batterie. Ces lances ont l'avantage de consommer moins d'eau. Différents types de lances perforantes sont présentes sur le marché :

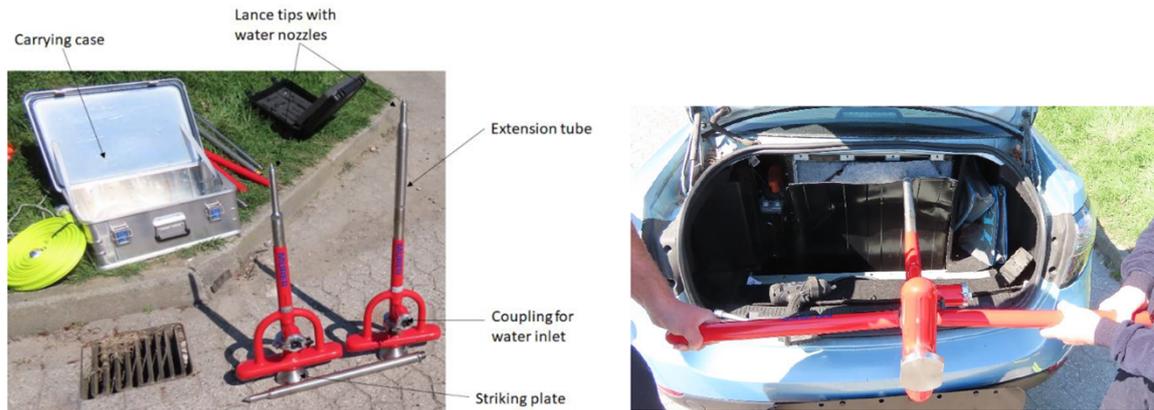
- lance Cobra Cold Cutter ou Cobra Ultra High Pressure Lance (UHPL) basée sur un système de découpe et d'extinction à haute pression (300 bars). Cet équipement utilise un abrasif entraîné dans l'eau pour percer, puis un brouillard d'eau est introduit dans le trou à un débit de 58 L/min (Figure 16a). Le tout est appliqué en une seule action continue. Des essais d'extinctions avec ce type de lance ont été menées en Autriche lors d'incendies de batteries. Le Coldcutter a été efficace pour pénétrer la paroi du pack batterie, mais a eu un effet destructeur une fois la paroi pénétrée : l'introduction de l'eau sous haute pression a fait exploser une partie du pack batterie, avec projection de certaines cellules à plus d'1 m du pack<sup>51</sup>,
- lance « e-fire » Murer Feuerschutz. De l'eau est pompée à travers une lance en forme de fer de lance. Selon le fabricant de la lance d'extinction, l'objectif, en cas d'incendie de batterie, est de frapper la lance à travers le boîtier de la batterie (Figure 16b), puis d'inonder la batterie. Elle utilise de l'eau à un débit de 25 L/min. La lance d'extinction est isolée électriquement et convient pour des tensions inférieures à 1000 V. Un institut allemand a mené des expériences avec la lance d'extinction « e-fire » sur des véhicules et des batteries. Bien que dans de nombreux cas la lance soit capable d'éteindre et de refroidir la batterie, les tests pratiques ont montré que la pénétration des cellules de la batterie à l'aide de la lance peut également aggraver la situation. Les éléments de batterie qui n'ont pas encore été endommagés par le feu ou l'emballement thermique risquent d'être endommagés précisément par la pénétration de la lance et de se retrouver en emballement thermique. Les températures élevées peuvent également entraîner la destruction de la lance et la fonte du matériau. De plus, ce dispositif nécessite l'utilisation d'un marteau pour pénétrer la batterie avec la lance perforante ; les pompiers sont ainsi directement exposés à la fumée et à la chaleur<sup>51</sup>.

L'emploi de ces types de lance (Cobra Cold Cutter et « e-fire ») constitue une intervention particulièrement risquée pour les sapeurs-pompiers qui se trouvent à proximité immédiate de la batterie, avec un risque électrique accru (arcs électriques, choc électrique...), de jets de flammes dangereuses au moment de la pénétration ainsi qu'un risque d'emballement thermique de cellules n'ayant pas encore réagi. **Pour ces raisons, les sapeurs-pompiers français et allemands ne recommandent pas l'utilisation de ce type de lance**<sup>42,52</sup>

Certaines technologies de lance permettent d'opérer à distance, par exemple la technologie « battery extinguishing system technology BEST » de Rosenbauer. Il s'agit d'un système composé d'une unité d'extinction sur roues placée sous le véhicule électrique (Figure 16c) reliée par des tuyaux d'une longueur d'environ 8 m à une unité de contrôle comportant une bouteille d'air comprimé. L'appareil est positionné sous le véhicule puis l'air comprimé alimente un clou pneumatique qui pénètre dans le châssis jusqu'à la batterie, l'eau est injectée à 30 L/min à une pression d'environ 7 bars. Un essai avec ce dispositif sur un véhicule de type Renault Fluence réalisé dans le cadre du projet ELBAS<sup>53</sup> n'a pas montré une grande efficacité. Le rapport explique que l'eau n'a pas pu s'accumuler dans le pack en raison de l'ouverture de son enveloppe lors de l'emballement thermique. D'autres essais doivent être menés sur d'autres types de véhicules/packs pour évaluer l'efficacité de ce système. Certaines difficultés de mise en œuvre peuvent par ailleurs être soulevées : proximité de l'intervenant pour positionner le dispositif sous le véhicule (risque à évaluer en fonction du stade de développement de l'incendie), accessibilité de la batterie si elle est proche du sol, réglage de la profondeur de pénétration variable en fonction des véhicules/packs, augmentation du risque d'emballement thermique par perforation de cellules non impliquée, formation des intervenants...



a)



b)



c)

Figure 16 : Lances perforantes a) Cobra Cold Cutter<sup>53</sup>, b) Lance e-fire (Murer Feuerschutz)<sup>53</sup>, c) Technologie BEST de Rosenbauer<sup>60,53</sup>

Enfin, certains bus complètement électriques (série K9M de BYD) possèdent un système de suppression automatique. En cas d'évènement thermique (détection via des capteurs thermiques placés dans les zones batteries), les buses vont vaporiser l'agent de lutte incendie dans cette zone batterie. Ce dispositif d'extinction peut également être déchargé manuellement par le conducteur. Le système embarqué d'extinction est visible sur la Figure 17 (partie haute de la photo). L'agent extincteur utilisé n'a pas pu être identifié.



Figure 17 : Arrière du bus BYD avec en partie haute de l'image le système d'extinction embarqué<sup>54</sup>

### 3.2.6 Cas particulier : stratégie d'intervention des services de secours dans les espaces confinés

En espace confiné (garage, parking, tunnels...), les phénomènes dangereux (notamment thermiques et toxiques) peuvent être accentués ou accélérés, ce qui rend les interventions complexes et dangereuses. L'accumulation de fumées est l'un des enjeux majeurs dans les espaces confinés. La densité de la fumée peut être plus élevée dans les espaces confinés que dans l'air extérieur. En conséquence, des concentrations atmosphériques relativement élevées d'HF peuvent être formées dans de telles configurations. Un exemple de cas où ce risque peut-être pertinent est celui des incendies dans les parkings souterrains impliquant plusieurs voitures électriques<sup>55</sup>.

L'engagement des personnels tient compte également des risques liés au feu de l'infrastructure. La rapidité de l'intervention est primordiale afin de prévenir l'emballement thermique de la batterie, limiter les propagations et les dégâts sur les infrastructures tout en assurant la sécurité du personnel d'intervention. Le guide d'intervention des sapeurs-pompiers<sup>31</sup> précise que l'attaque de l'incendie doit être entreprise très rapidement au moyen d'une lance au débit maximum (500 L/min) et renforcée dès que possible par une seconde de même nature. L'attaque du feu visant à couper le rayonnement calorifique provoquant l'élévation des températures de la batterie sera réalisée dans un premier temps à portée de lance, puis une fois le feu totalement maîtrisé, au contact du véhicule en excluant si possible le positionnement des intervenants dans les zones de dangers (avant et arrière du véhicule). La première attaque doit s'effectuer autant que possible protégé par des véhicules, des éléments d'architecture, voire depuis les portes des sas.

Le risque d'accumulation de gaz inflammables et d'explosion doit être particulièrement pris en compte dans les espaces clos.

Le guide d'intervention mentionne par ailleurs que le recours à l'utilisation de caméras thermiques, aux moyens de ventilation opérationnelle et lorsque cela est possible, aux moyens fixes de lutte contre l'incendie de l'établissement mis à disposition des équipes de secours (désenfumage, sprinkler...) doit être intégré en complément des moyens de secours déjà mobilisés.

Des techniques innovantes telles que le déploiement de robots dans des parkings couverts pourraient également être envisagées. Plusieurs études ont déjà été lancées, par exemple une étude sur les possibilités d'acheminer de l'eau directement dans la batterie du véhicule en cas d'incendie<sup>56</sup>. Il s'agit à ce jour de travaux exploratoires.

## 4 Conclusion

Le présent document avait pour objectif de réaliser un état de l'art des moyens d'extinction, fixes et mobiles, pouvant être utilisés pour l'extinction des feux de véhicules électriques équipés de batteries Li-ion et à déterminer leur degré d'efficacité. Cette étude s'appuie notamment sur une recherche bibliographique, sur le retour d'expérience et sur des échanges avec des organismes de sécurité incendie.

Le Tableau 1 présente une synthèse des principaux agents extincteurs recensés ainsi que leur degré d'efficacité. Les agents extincteurs liquides aqueux (eau ou eau et additifs) possèdent l'effet de refroidissement le plus élevé et sont les plus efficaces face à un feu de cellules Li-ion. Cette évaluation est basée sur des essais réalisés à petite échelle (sur une cellule ou assemblage de cellules).

Le Tableau 2 présente les principaux moyens d'interventions et de lutte contre l'emballement thermique et sa propagation à plus grande échelle (véhicule et pack). La stratégie d'intervention est définie en fonction des scénarios d'incendie et de l'environnement.

En milieu ouvert, si la batterie d'un véhicule électrique en feu n'est pas encore impactée par l'incendie, la stratégie consistera à simultanément éteindre le véhicule et refroidir le pack batterie pour éviter son emballement thermique via des lances à eau. En cas d'emballement thermique de la batterie, le moyen le plus efficace est le noyage à l'eau en interne du pack. Ce noyage est possible sur certains types de véhicules équipés d'une trappe thermo-fusible ou similaire qui fond avec la chaleur. La lance incendie est dirigée vers cette trappe assurant une extinction rapide et efficace. Pour les véhicules non équipés par ce dispositif, l'extinction est difficile, nécessite une grande quantité d'eau et le risque de ré-inflammation est élevée. Les dispositifs d'immersion (container pour le véhicule complet ou bain d'immersion pour le pack) peuvent s'avérer efficaces dans le cas où l'eau peut pénétrer à l'intérieur du pack batterie. Cependant, diverses difficultés de mise en œuvre ont été relevées ainsi que la génération d'une quantité potentiellement importante d'eaux polluées. La difficulté d'accès en interne du pack batterie ont poussé certains fabricants à développer des lances perforantes, dont le principe repose sur le percement de la batterie et l'introduction d'eau à l'intérieur de celle-ci. La possibilité d'injecter de l'eau directement en interne du pack permet une consommation réduite en eau et une bonne efficacité de refroidissement. Toutefois, les méthodes de lances perforantes manuelles sont très risquées pour les intervenants de secours (risques électriques, risque d'emballement thermique de cellules non impactées lors de la perforation et de jets de flammes dangereuses à proximité du personnel d'intervention). Un dispositif de percement à distance a été développé, son efficacité reste à prouver et des difficultés de mise en œuvre ont été relevées.

Les couvertures anti-feu pour véhicules n'ont pas montré une grande efficacité dans le cas où la batterie du véhicule est en emballement thermique. Elles pourraient toutefois être utilisées à des fins préventives, pour limiter la propagation de l'incendie à un véhicule adjacent, ou après l'extinction, pour empêcher la reprise de l'incendie et contenir les émissions de fumées. Toutefois, ces couvertures anti-feu n'ont pas encore été entièrement validées en termes d'efficacité par rapport aux pratiques existantes.

En milieu confiné, l'utilisation d'un système d'arrosage fixe (par sprinklage ou brouillard d'eau) permet une réponse rapide : bien qu'un tel système ne cible pas nécessairement la batterie du véhicule électrique, l'activation précoce du système est la clé pour assurer le refroidissement du véhicule, limiter la propagation du feu aux véhicules adjacents et limiter l'impact sur les structures, permettant ainsi le contrôle de l'incendie en attendant l'intervention des secours. L'efficacité des dispositifs de sprinklage/brouillard d'eau sur un feu de véhicule électrique va dépendre de la capacité des gouttelettes d'eau à atteindre le pack batterie. Dans tous les cas, la probabilité que l'incendie se développe et se propage aux structures et véhicules adjacents peut être réduite. Lorsque l'eau est introduite directement dans le pack, l'effet de refroidissement est amélioré lorsque le débit est faible et le temps de libération plus long, rendant le brouillard d'eau a priori un peu plus efficace que le sprinklage. Il convient également de noter que les risques thermiques et toxiques sont accrus dans les espaces confinés et que l'application d'eau sur un incendie de batterie Li-ion modifie la composition des gaz, pouvant conduire à l'apparition d'un risque d'explosion et d'une concentration momentanément plus élevée de HF avant sa diminution par dissolution dans l'eau.

Enfin, l'évaluation de l'efficacité de certaines méthodes d'extinction existantes ou en cours de développement méritent d'être poursuivies par des études et/ou essais complémentaires.

Agents extincteurs			
Type	Principaux agents extincteurs recensés	Degré d'efficacité	Commentaires
Gaz	Gaz inerte (CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> , Ar,...)	Inefficace	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Génération d'oxygène par la cathode de la batterie lors du processus d'emballage thermique</li> </ul>
	Hydrocarbures halogénés (halons, HFCs, NOVEC 1230...)	Médiocre	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pouvoir de refroidissement faible</li> <li>• Formation de produits secondaires toxiques et corrosifs en cas d'exposition à une T° élevée</li> </ul>
Solide	Extincteur à poudre	Inefficace	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pouvoir de refroidissement insuffisant</li> </ul>
	Aérosols solides (ex. à base de sels de potassium)	Inefficace	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mode d'action par inhibition chimique non efficace ; réactions chimiques des batteries lors de l'emballage thermique complexe</li> <li>• Pouvoir de refroidissement insuffisant</li> </ul>
Liquide	Aqueux (eau / eau + additifs)	Efficace	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pouvoir de refroidissement élevé</li> <li>• Ajout d'additif peut permettre de réduire la consommation d'eau et améliorer la capacité de refroidissement par rapport à l'eau pure</li> </ul>
	Agent émulseur (mousse)	Médiocre	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pouvoir de refroidissement plus faible que l'eau</li> <li>• Difficulté à pénétrer dans les espaces inter cellules/modules du pack</li> </ul>
	Dispersion de vermiculite aqueuse (AVD)	Médiocre	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pouvoir de refroidissement plus faible que l'eau</li> <li>• Difficulté à pénétrer dans les espaces inter cellules/modules du pack</li> </ul>

Tableau 1 : Une synthèse des principaux agents extincteurs recensés ainsi que leur degré d'efficacité sur des feux de cellules ou assemblage de cellules Li-ion

## Moyens d'intervention et de lutte contre l'emballement thermique et sa propagation à échelle pack et véhicule

Type	Principaux moyens recensés	Degré d'efficacité	Commentaires
<b>Couverture</b>	Couverture anti-feu	Médiocre si batterie en emballement thermique (besoins d'essais complémentaires)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dans le cas où la batterie est impliquée dans l'incendie, il a été démontré que la couverture n'apporte pas de valeur ajoutée significative</li> <li>• Mise en œuvre non aisée : besoin d'un espace suffisant autour du véhicule et proximité des intervenants de secours</li> <li>• Peut être utilisé conjointement avec un autre système de refroidissement actif (ex. mur d'eau sous le véhicule) mais efficacité à prouver</li> <li>• Les couvertures anti-feu pourraient être utilisées à des fins préventives, pour limiter la propagation de l'incendie à un véhicule adjacent, et après l'extinction, pour empêcher la reprise de l'incendie et contenir les émissions de gaz. Toutefois, ces couvertures anti-feu n'ont pas encore été entièrement validées en termes d'efficacité par rapport aux pratiques existantes</li> </ul>
<b>Lance à eau</b>	Lance débit variable	Efficace si pénétration possible dans le pack batterie	<p>Pour la plupart des véhicules électriques :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Besoin d'un volume d'eau très important (jusqu'à plus de 30 m<sup>3</sup>) et durée d'extinction longue</li> <li>• Difficulté à refroidir efficacement le pack batterie « à cœur »</li> <li>• Risque de ré-inflammation après extinction (immédiate ou retardée)</li> <li>• Génération de grandes quantités d'eaux polluées</li> </ul> <p>Pour les véhicules électriques équipés de trappes thermo-fusibles ou équivalent :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Extinction facilitée et rapide (introduction d'eau directement au sein du pack batterie)</li> </ul>
	Lance diphasique	A démontrer	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Résultats positifs sur l'extinction de véhicules thermiques (quantité d'eau nécessaire significativement inférieure à celle d'une lance classique, meilleur abattement des flux thermiques et de la capture des particules en suspension). Efficacité à démontrer sur des feux de véhicules électriques</li> </ul>
<b>Dispositifs d'immersion</b>	Container	Efficace si pénétration possible dans le pack batterie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Difficultés opérationnelles liées à la manutention du véhicule avec une batterie dans un état instable</li> <li>• Durée d'immersion à évaluer</li> <li>• Possibilité de reprise de l'incendie lors de la sortie du véhicule (ou plusieurs jours après) à cause de micro-courts circuits persistants,</li> <li>• Nécessité d'un volume d'eau important comparé à la masse de la batterie</li> <li>• Possibilité de formation de gaz inflammable (notamment l'hydrogène) et d'oxygène (électrolyse de l'eau)</li> <li>• Gestion de l'eau polluée après retrait du véhicule</li> <li>• Les services de secours allemands recommandent d'utiliser cette méthode en dernier recours dans des cas exceptionnels</li> </ul>

	Bain d'immersion amovible	Efficace si pénétration possible dans le pack batterie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Proximité des intervenants lors de la mise en œuvre du bain amovible autour du véhicule – nécessite l'extinction du véhicule en amont de son installation (utilisation combinée d'une lance incendie et du bain d'immersion)</li> <li>• Possibilité de formation de gaz inflammable (notamment l'hydrogène) par électrolyse de l'eau</li> <li>• Durée d'immersion à évaluer - possibilité de reprise de l'incendie après le retrait du bain</li> <li>• Gestion de l'eau polluée après retrait du véhicule</li> </ul>
<b>Lance perforantes</b>	A manipulation manuelle (Cobra Cold Cutter / e-fire de Murer Feuerschutz)	Pourrait être efficace <b>mais très risqué pour les intervenants</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Introduction d'eau au sein du pack batterie assurant un refroidissement interne</li> <li>• Utilisation d'une quantité d'eau limitée</li> <li>• Proximité des intervenants pour percer la batterie</li> <li>• Risque électrique (arcs électriques, électrisation,...)</li> <li>• Risque de mise en emballement thermique de cellules n'ayant pas réagies lors de la perforation (risques de jets de flammes dangereuses)</li> </ul>
	A manipulation à distance (dispositif BEST de Rosenbauer)	A démontrer	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Essais concluants d'après le fabricant sur des batteries jusqu'à 120 kWh. Essai non concluant dans le cadre du projet ELBAS sur un type de véhicule (l'eau n'a pas pu s'accumuler dans le pack en raison de l'ouverture de son enveloppe lors de l'emballement thermique)</li> <li>• Difficultés de mise en œuvre : accessibilité de la batterie si elle est proche du sol, réglage de la profondeur de pénétration variable en fonction des véhicules/packs, augmentation du risque d'emballement thermique par perforation de cellules non impliquées...</li> </ul>
<b>Dispositifs fixes</b>	Sprinkleur	Efficace pour mettre sous contrôle l'incendie (pas nécessairement pour l'éteindre) / dépendant de la capacité de l'eau à atteindre le pack batterie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cas où l'incendie n'est pas initié par la batterie : des dispositifs de type sprinklage à eau sont recommandés pour permettre le refroidissement du véhicule, éviter la propagation du feu à la batterie et aux véhicules voisins et limiter l'impact sur les structures</li> <li>• Cas où la batterie est en emballement thermique : l'application externe d'eau n'affecte que les flammes visibles, la surface externe de la batterie / l'application d'eau directement à l'intérieur du pack a conduit à un refroidissement plus important et une réduction de la propagation de cellules en utilisant une quantité d'eau limitée</li> </ul>
	Brouillard d'eau	Efficace si appliqué en interne du pack	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Efficacité variable en fonction de la taille des gouttelettes, de la durée de pulvérisation, de la dynamique des particules du brouillard et de sa capacité à atteindre la surface de combustion à travers la fumée générée par la batterie</li> <li>• Efficacité d'extinction améliorée par ajout d'additifs</li> <li>• En cas d'injection dans le pack : effet de refroidissement plus important par rapport au sprinklage car plus faible débit et libération d'eau plus longue avec le brouillard d'eau</li> </ul>
<b>Dispositifs mobiles</b>	Rideaux d'eau portables	Médiocre si batterie en emballement thermique	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Peut refroidir les véhicules adjacents mais peu efficace sur un feu de batterie (1 étude réalisée – nécessite probablement des tests complémentaires)</li> </ul>

Tableau 2: Une synthèse des principaux moyens d'intervention et de lutte contre l'emballement thermique et sa propagation à plus grande échelle

- 
- <sup>1</sup> [Moyens de maîtrise des risques des batteries pour les applications conteneurisées | Ineris](#)
- <sup>2</sup> EV battery Safe handling & storage guidance. Suppliers partnership for the environment. July 2023.
- <sup>3</sup> EV Fire Safe, EV fires – overview (30 June 2023) <https://www.evfiresafe.com/ev-battery-fire-overview>
- <sup>4</sup> EV Fire Safe, EV fires – overview (31st April 2023) (<https://www.evfiresafe.com/ev-battery-fire-overview>)
- <sup>5</sup> Fire Protection Research Foundation. “Best Practices for Emergency Response to Incidents Involving Electric Vehicles Battery Hazards: A Report on Full-Scale Testing Results” Juin 2013
- <sup>6</sup> Amandine Lecocq ; Marie Bertana ; Benjamin Truchot ; and Guy Marlair. Comparison of the Fire Consequences of an Electric Vehicle and an Internal Combustion Engine Vehicle. Proceeding article. FIVE Congress. 2012
- <sup>7</sup> D. MacNeil et al., Electric vehicle testing, Présentation au 8<sup>ème</sup> congrès EVS-GTR (juin 2015)
- <sup>8</sup> S. Kang et al., Full-scale fire testing of battery electric vehicles, Applied Energy 332 (2023) 120497
- <sup>9</sup> C. Zhao et al., Full-scale experimental study of the characteristics of electric vehicle fires process and response measures, Case Studies in Thermal Engineering 53 (2024) 103889
- <sup>10</sup> <https://www.koreus.com/video/voiture-tesla-feu.html>
- <sup>11</sup> Données EV Fire Safe
- <sup>12</sup> Federal Aviation Administration. Extinguishment of lithium-ion and lithium metal battery fires. DOT/FAA/TC-13/53. Janvier 2014.
- <sup>13</sup> Wei-tao Luo; Shun-bing Zhu; Jun-Hui Gong, Zheng Zhou. Research and development of Fire extinguishing technology for power lithium batteries. Procedia Engineering 211 (2018) 531-537
- <sup>14</sup> Wang, K.; Ouyang, D.; Qian, X.; Yuan, S.; Chang, C.; Zhang, J.; Liu, Y. Early Warning Method and Fire Extinguishing Technology of Lithium-Ion Battery Thermal Runaway: A Review. Energies 2023, 16, 2960. <https://doi.org/10.3390/en16072960>
- <sup>15</sup> Amed O. Said, Analysis of effectiveness of suppression of lithium ion battery fires with a clean agent Fire Safety Journal 121 (2021) 103296
- <sup>16</sup> UL Fire Research and development report. UL 9540A Installation Level tests with outdoor Lithium-ion Energy Storage System Mockups. Avril 2021.
- <sup>17</sup> FM Global Property Loss Prevention Data Sheets 5-33. Electrical Energy Storage Systems - January 2017 Interim Revision July 2020
- <sup>18</sup> Wang, Q., Mao, B., Stolarov, S.I., et al., “A review of lithium ion battery failure mechanisms and fire prevention strategies,” March 2019, Progress in Energy and Combustion Science.
- <sup>19</sup> Rapport d'Enquête sur l'incendie d'un container de stockage de batteries au sein du poste de transformation RTE de Perles et Castelet (09) le 1er décembre 2020. 27/07/2021
- <sup>20</sup> Federal Aviation Administration. Extinguishment of lithium-ion and lithium metal battery fires. DOT/FAA/TC-13/53. Janvier 2014.
- <sup>21</sup> Tong Liu. Cooling control effect of water mist on thermal runaway propagation in lithium ion battery modules. Applied Energy 267 (2020) 115087
- <sup>22</sup> Xu, J. The enhanced cooling effect of water mist with additives on inhibiting lithium ion battery thermal runaway. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 77 (2022) 104784
- <sup>23</sup> Zhang L. Experimental investigation of water spray on suppressing lithium-ion battery fires Fire Safety Journal 120 (2021) 103117
- <sup>24</sup> Ji. C. Simulation Investigation of Water Spray on Suppressing Lithium-Ion Battery Fires. Fire Technology. <https://doi.org/10.1007/s10694-022-01302-6>
- <sup>25</sup> Larsson, F. & al. Characteristics of lithium-ion batteries during fire tests. Journal of Power Sources 271 (2014) 414-420

- 
- <sup>26</sup> Said - Experimental Investigation of Suppression of 18650 Lithium Ion Cell Array Fires with Water Mist. *Fire Technology – Fire Technology* 58 (1) – 523-551. DOI: 10.1007/s10694-021-01151-9
- <sup>27</sup> Jiajia Xu, Qiangling Duan, Lin Zhang, Yujun Liu, Jinhua Sun, Qingsong Wang The enhanced cooling effect of water mist with additives on inhibiting lithium ion battery thermal runaway *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 77 (2022) 104784
- <sup>28</sup> Zhou, Y.; Wang, Z.; Gao, H.; Wan, X.; Qiu, H.; Zhang, J.; Di, J. Inhibitory effect of water mist containing composite additives on thermally induced jet fire in lithium-ion batteries. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2021, 147, 2171–2185
- <sup>29</sup> Mohammadmahdi, G., et al., “A Review of Lithium-Ion Battery Fire Suppression,” *Energies* 2020, 13(19), 5117; <https://doi.org/10.3390/en13195117>
- <sup>30</sup> Liu et al, Experimental study on a novel safety strategy of lithium-ion battery integrating fire suppression and rapid cooling. *Journal of Energy Storage* 28 (2020) 101185
- <sup>31</sup> Russo Paola et al., Effective Fire Extinguishing Systems for Lithium-ion Battery. *CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS VOL. 67, 2018.* DOI: 10.3303/CET1867122
- <sup>32</sup> [NTA 8133:2021 nl \(nen.nl\)](#)
- <sup>33</sup> [NTA 8133 the toughest lithium ion battery test there is - Anogas](#)
- <sup>34</sup> <https://www.ivt.tugraz.at/forschung/bereiche/vuu/projektbeispiele/brafa.html>
- <sup>35</sup> “Risk assessment and handling of fire in Li-ion batteries” Guidelines for fire and rescue services- DSB Norwegian Directorate for Civil Protection. November 2021
- <sup>36</sup> Guide opérationnel départemental de référence – interventions d'urgence sur les véhicules du SDIS 86 – édition 2022
- <sup>37</sup> P. Sun, R. Bisschop, H. Niu, X. Huang\* (2020) A Review of Battery Fires in Electric Vehicles, *Fire Technology*, 56 Invited Review <https://doi.org/10.1007/s10694-019-00944-3>
- <sup>38</sup> <https://www.reuters.com/article/us-tesla-fire/battery-in-fatal-tesla-crash-in-florida-reignited-twice-ntsb-report-idUSKBN1JM2UG>
- <sup>39</sup> Fire Protection Research Foundation. “Best Practices for Emergency Response to Incidents Involving Electric Vehicles Battery Hazards: A Report on Full-Scale Testing Results” Juin 2013
- <sup>40</sup> <https://www.ktvu.com/news/tesla-battery-reignites-days-after-deadly-crash-2-investigates>
- <sup>41</sup> <https://www.bestmag.co.uk/out-the-box-thinking-needed-as-tesla-battery-ignites-three-weeks-after-accident/>
- <sup>42</sup> DGUV, Fachbereich AKTUELL, Subcommittee Fire and Emergency Services. Instructions for Li-ion battery firefighting in vehicles fire. FBFHB-024. 24.07.2020
- <sup>43</sup> Cui, Yan & al. Full-scale experimental study on suppressing lithium-ion battery pack fires from electric vehicles. *Fire Safety Journal* 129 (2022) 103562
- <sup>44</sup> Quant M. et al, Ecotoxicity Evaluation of Fire-Extinguishing Water from Large-Scale Battery and Battery Electric Vehicle Fire Tests. *Environ. Sci. Technol.* 2023, 57, 12, 4821–4830 <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c08581>
- <sup>45</sup> O. Willstrand et al., Fire Safety of Lithium-Ion Batteries in Road Vehicles, Rapport du Research Institutes of Sweden (2019)
- <sup>46</sup> Bisschop Handling Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles: Preventing and Recovering from Hazardous Events *Fire Technology*, 56, 2671–2694, 2020
- <sup>47</sup> Thomas, I., Bennetts, I., BHP Fire Tests Prove the Value of Sprinkler Systems, *Municipal Engineering in Australia*, pp.3-13, September 1987.
- <sup>48</sup> M. Shipp - Department for Communities and Local Government “Fire spread in car parks” BD2552 – December 2010.

---

[https://www.ife.org.uk/write/MediaUploads/Incident%20directory/Monica%20Wills%20House%20-%202002/BRE\\_DCLG\\_BD2552\\_Fire\\_Spread\\_in\\_Car\\_Parks\\_2010.pdf](https://www.ife.org.uk/write/MediaUploads/Incident%20directory/Monica%20Wills%20House%20-%202002/BRE_DCLG_BD2552_Fire_Spread_in_Car_Parks_2010.pdf)

<sup>49</sup> Jonna Hynynen & al. Electric Vehicle Fire Safety in Enclosed Spaces. RISE Report 2023:42

<sup>50</sup> Elena Funk & al. Fire extinguishment tests of electric vehicles in an open sided enclosure. Fire Safety Journal 141 (2023) 103920

<sup>51</sup> NIPV report – Onderzoek-dompelcontainers. 2023

<sup>52</sup> Michel Gentilleau. FNSPF. Extinction d'un feu de batterie et intervention des secours. Journée technique batteries Lithium. 2022

<sup>53</sup> THE ELBAS PROJECT – Electric vehicle fires at sea : new technologies and methods suppression, containment and extinguishing of battery car fires onboard ships. Danish Institute of Fire and Security Technology. <https://brandogsikring.dk/en/research-and-development/maritime/elbas/>

<sup>54</sup> <https://cleantechnica.com/2015/10/21/look-hood-byd-electric-bus-factory/>

<sup>55</sup> J. Prudhomme, C. Peyre, Feux de batteries au lithium : nouveaux enjeux opérationnels. 2021. [Feu de batteries au lithium : nouveaux enjeux opér... Catalogue en ligne \(ensosp.fr\)](#)

<sup>56</sup> NIPV- Fire safety of indoor car parks accommodating electrically powered vehicles. 2023