

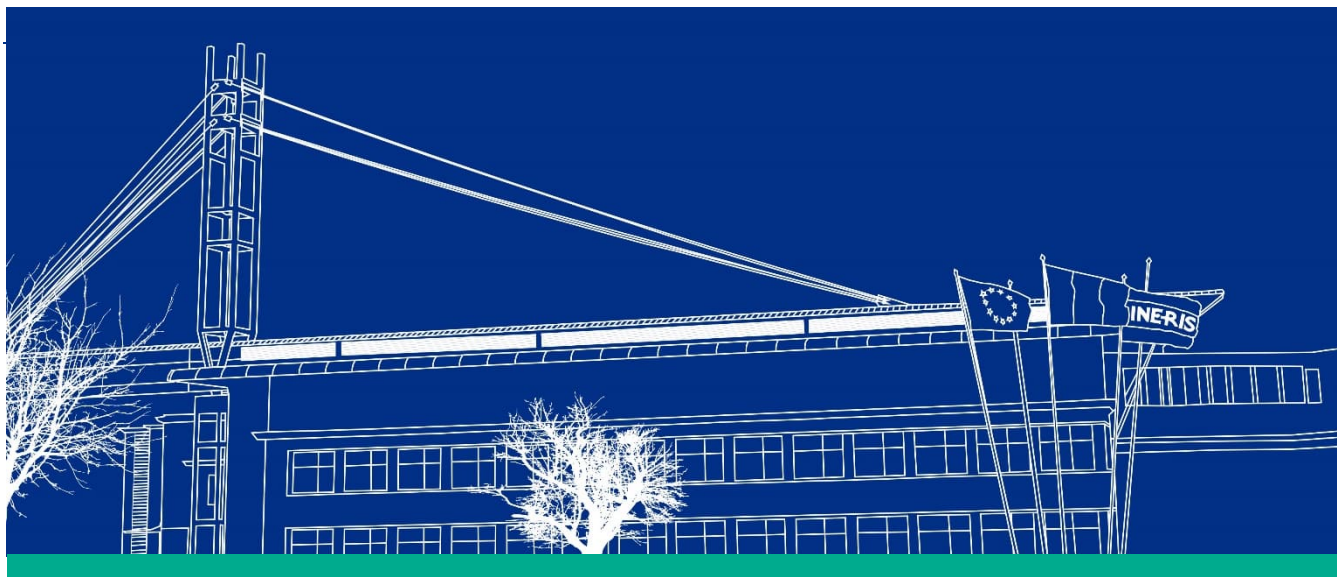


RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*

INERIS

*maîtriser le risque
pour un développement durable*



(ID Modèle = 454913)

Ineris – 230833 - 2824465 - v1.0

Etat des connaissances sur l'impact environnemental des feux de batteries au lithium, application aux stockages stationnaires

05/11/2025

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 : Caroline GAYA, Arnaud BORDES

Vérification : DELBAERE THIERRY; BORDES ARNAUD; LECOCQ AMANDINE; TRUCHOT BENJAMIN

Approbation : BOUET REMY - le 05/11/2025

Table des matières

1.	Contexte	4
2.	Résumé court du rapport	4
3.	Complément analyse réglementation française	4
4.	Annexe.....	5
4.1.	Résumé long.....	5
4.2.	Rapport NFPA.....	9

1. Contexte

Cette étude a été réalisée dans le cadre d'un partenariat avec Sandia National Laboratories encadrée et en partie financée par un appel à projet de la NFPA Research foundation 2024 (sponsorisé par FPRF Energy Storage Research Consortium). Cette étude a pour but de faire un état de l'art des connaissances actuelles au sujet de l'impact environnemental des feux de batteries dédiées au stockage stationnaire d'énergie (BESS) afin de mettre en avant les limites et les pistes d'amélioration à apporter). Un résumé détaillé du rapport en français est disponible en annexe 1 et le rapport complet en version anglaise est disponible sur le site de la NFPA (lien en annexe 2).

2. Résumé court du rapport

Sandia National Laboratories et Ineris ont ainsi réalisé un état de l'art des connaissances scientifiques et combiné leurs résultats respectifs afin de réaliser une analyse complète des émissions identifiées suite aux feux de BESS quel que soit le média considéré (eau, air, sol). Des données issues de l'accidentologie ont également permis d'enrichir ce travail.

Sur la base de la concaténation de tous ces résultats, les partenaires ont cherché à évaluer l'impact environnemental de ces feux. De manière générale, la norme ISO 26367 " Lignes directrices pour déterminer l'impact environnemental des effluents du feu " est utilisée afin d'évaluer l'impact environnemental des feux. Son utilisation requière une connaissance fine des facteurs d'émissions des feux considérés. Comme illustré dans l'analyse des données et de la littérature, définir et évaluer ces facteurs d'émissions est complexe voire inexistant. Une méthode générique a donc été proposée pour permettre de définir un premier jeu de facteur d'émissions pour les principaux constituants des émissions de feu de stockage stationnaire Li-ion. Ces valeurs, fournies de manière générique et qualitatives, ont ainsi permis de comparer les caractéristiques des feux de BESS à d'autres feux classiques (plastiques, pneu, etc.) lors de cette étude. Les principaux résultats obtenus sont décrits ci-après :

- Les facteurs d'émissions de monoxyde et dioxyde de carbone restent similaires pour les feux de BESS et ceux de véhicules thermiques ou de carburant ;
- Les feux de BESS amènent à une plus forte émission d'oxyde d'azote et d'acide fluorhydrique ;
- L'émission de particules semble plus faible pour les feux de BESS mais est marquée par la présence de métaux (notamment cobalt et nickel toxiques vis-à-vis de l'environnement et des êtres vivants) ;
- Les émissions de COV et HAP paraissent comparables pour les feux de BESS et des autres carburant considérés.

Par la suite, il a été identifié que ces facteurs d'émissions devaient être affinés pour prendre en compte les variations induites par les spécificités des batteries (comme la chimie de la cathode ou l'état de charge). Par ailleurs, l'analyse plus poussée de la cinétique et dynamique de feux de batteries Li-ion est requise pour robustifier les résultats obtenus.

3. Complément analyse réglementation française

Actuellement, en France, les contraintes réglementaires imposées aux BESS se limitent à la réglementation transport (ONU) et au règlement Européen. Des normes d'application volontaires telles que l'UL9540A viennent compléter les exigences de sécurité de ces systèmes. Cependant, les règles d'implantation comprise dans le cadre du code de l'environnement ne sont pas spécifiques à ces systèmes puisque la rubrique 2925-2 ne dispose pas de l'AMPG dont le champ d'application couvre ces systèmes.

Dans le cadre de l'évaluation de l'impact environnemental d'un incendie de BESS, certains principes de la directive Seveso, bien que le site concerné n'y soit pas soumis, peuvent néanmoins s'avérer pertinents. En particulier, l'article 16 qui stipule que l'exploitant doit informer sans délai l'autorité compétente, lui transmettre les détails de l'accident (circonstances, substances en cause, impacts, mesures d'urgence), et indiquer les actions prévues pour en limiter les effets et éviter une récurrence, ainsi que les actions prévues pour en limiter les effets à moyen et long terme et prévenir toute récurrence.

La directive (UE) 2024/1785, dite directive IED, peut venir élargir le champ en intégrant également les risques chroniques liés aux activités industrielles, renforçant ainsi les obligations d'information, de prévention et de limitation des effets sur la santé humaine et l'environnement.

4. Annexe

4.1. Résumé long

L'utilisation de batteries lithium-ion est actuellement en plein développement pour de nombreuses applications, notamment les téléphones, les ordinateurs, l'électromobilité et le stockage stationnaire d'énergie (BESS). Parmi ces applications, les systèmes BESS ont la particularité de couvrir un large éventail de solutions, leur capacité pouvant aller de quelques centaines de kWh, pour une application résidentielle, à plusieurs MWh dans le cas d'une application industrielle. Dans l'éventualité d'un incendie, l'énergie embarquée plus importante des BESS soulève des questions à la fois en termes de sécurité et d'impact sur l'environnement. Ces préoccupations grandissent d'autant plus lorsque l'on considère le développement rapide du marché des batteries Li-ion. En effet, le risque d'incendie et d'explosion peut augmenter si, pour suivre l'évolution du marché, un manque d'attention est apporté lors de l'évaluation de la sécurité des systèmes, la sélection des matériaux, la conception du système et le choix des solutions de mitigations. A noter, des progrès remarquables ont été accomplis puisque le taux de défaillance des BESS a considérablement diminué. Dans le même temps, le nombre et la taille des systèmes BESS ont également augmenté de façon spectaculaire et les incendies de BESS sont alors largement médiatisés, comme l'illustre l'incendie de Moss Landing du 16 janvier 2025 amplement relayé. Le public s'inquiète de plus en plus de l'influence potentielle des incendies de batteries sur la santé humaine et l'environnement (qualité de l'air, eau et sols). Cependant, même si la problématique est clairement identifiée, l'impact réel de ces incendies sur la santé publique est encore peu évalué.

Pour évaluer l'impact environnemental des incendies de BESS, il est urgent et indispensable de définir les émissions associées à ces incendies. Dans ce contexte, l'étude, présentée ci-après a été menée pour mettre en évidence l'état actuel des connaissances sur les émissions des BESS. Elle propose également un premier ensemble de jeu de données associé aux facteurs d'émission spécifiques aux incendies de BESS.

Pour atteindre cet objectif de caractérisation des émissions, la première étape proposée dans l'étude a été de fournir une description du système incluant une vue d'ensemble des matériaux utilisés ainsi que les différentes configurations rencontrées pour répondre aux applications variées. Les systèmes BESS offrent ainsi la possibilité de stocker et de fournir de l'énergie à la demande pour répondre, par exemple, à l'équilibrage requis par l'utilisation de systèmes connectés au réseau (par exemple, des dispositifs de production d'énergie renouvelable intermittente comme le photovoltaïque) ou pour renforcer le réseau (par écrêtement des pics de consommation ou pour répondre à la demande d'énergie de l'utilisateur). Chaque système BESS est composé d'un ensemble de cellules électrochimiques qui, selon la configuration choisie, répond à des exigences spécifiques en matière de tension, de courant, de puissance et d'énergie. La composition du BESS peut être divisée en deux parties, l'une liée aux cellules électrochimiques (anode, cathode, électrolyte et séparateur) pouvant représenter 60 % de la masse du BESS, et le reste du système (connectique, système de management de la batterie (BMS), enveloppe mécanique, systèmes de refroidissement, etc.). In fine, les principaux matériaux intégrés dans les BESS sont les suivants : composés métalliques (nickel, manganèse, cobalt, lithium, fer, aluminium, cuivre, acier), espèces carbonées, liants polymères incluant des PFAS, composants plastiques (par exemple le PET), électrolyte liquide (solvant non-aqueux avec un sel de lithium parfois à base de fluor) et composants électroniques. Il convient de souligner que la composition peut évoluer en fonction du système considéré et en particulier de la chimie de la batterie choisie (le LFP étant la technologie la plus répandue dans les BESS par rapport aux chimies NCA et NMC).

Lors de l'incendie d'un BESS, les composants susmentionnés ainsi que leurs formes dégradées, sont susceptibles d'être rencontrés et peuvent potentiellement polluer l'environnement par différentes voies. L'une d'entre elles est la sédimentation du panache de fumée, souvent après dilution, à une certaine distance de l'incident. Une autre voie possible de pollution est liée à l'utilisation d'agents d'extinction, généralement de l'eau, qui peuvent transporter avec eux les polluants émanant de la batterie endommagée. De même, les résidus d'incendie participent à la pollution du sol et de l'eau soit directement soit après dépôt/enfouissement/recyclage. Si les voies d'émission sont bien identifiées, la détermination des émissions à prendre en compte pour les BESS n'est pas aisée car elle dépend de plusieurs paramètres (fonction du BESS impliqué et des compositions initiales des cellules Li-ion, du mécanisme de combustion, de la distribution de la taille des particules, etc.). Étant donné que la contamination de l'environnement dépend fortement des caractéristiques de l'incendie, la définition du scénario de l'incendie est une question cruciale. Afin d'être représentatif et compte tenu des nombreux incendies de BESS rapportés tout au long de la dernière décennie, il semble opportun de tirer les leçons de ces incendies pour construire et définir les émissions associées.

Une analyse, de plusieurs incidents donnant un aperçu de l'impact sur l'environnement, a été réalisée afin de fournir une vue d'ensemble précise des incendies de BESS. Les rapports d'incidents offrent également la possibilité d'extraire certaines observations (e.g. la méthode de lutte contre l'incendie utilisée) et recommandations (e.g. le retraitement des eaux d'extinction). A titre d'exemple, certains cas ont été décrits comme l'incendie d'une usine de recyclage de batteries à Saint-Quentin Fallavier (France, 2012) qui a mis en évidence l'absence de pollution par les métaux lourds de la rivière dans laquelle les eaux de ruissellement ont été déversées (très probablement en raison d'une forte dilution due aux pluies); l'incendie de Perles-et-Castelet (France 2020) qui a mis en évidence l'utilisation importante d'eau directement sur le conteneur pour gérer l'incendie et la nécessité de collecter ces eaux; l'incendie du BESS à Geelong (Australie, 2021) qui montre une méthode communément utilisée de lutte contre l'incendie consistant à pulvériser de l'eau autour du BESS et non directement sur le conteneur en feu tout en collectant l'eau pour la traiter; l'incendie à Morris (États-Unis, 2021) qui a donné lieu à une action en justice concernant le rejet de polluants dans l'air et dans l'eau ; l'incendie Hwaseong (Corée 2024) qui rappelle les dangers des incendies de BESS (22 morts) et les larges incendies répétés à Moss-Landing (États-Unis) en 2021, 2022 et 2025. Bien que la majorité des scénarios d'incendie de BESS tendent à se limiter à la défaillance d'un seul conteneur, plusieurs cas de propagation et d'explosion sont signalés, ce qui complique les opérations de lutte contre l'incendie. En outre, même si le dégagement de chaleur est modéré par rapport à des incendies de taille similaire, ceci n'implique pas directement des impacts environnementaux moindres car une forte concentration de contaminants tend à se déposer dans le voisinage immédiat de l'incendie en raison de la faible dilution des fumées.

Pour estimer le facteur d'émission, un état de l'art de la littérature scientifique a été réalisé et a permis d'extraire des données obtenues lors d'essais à petite échelle. La représentativité de ces données vis-à-vis des incendies réels est parfois remise en question, toutefois certaines extrapolations sont proposées. Par exemple, une étude évaluant la pollution de l'eau d'extinction après l'emballage thermique des batteries NMC a pris en compte le taux de dilution d'un cas d'incendie réel pour mettre en évidence une potentielle pollution des écosystèmes aquatiques proches compte tenu des concentrations obtenues. Plus généralement, l'examen de l'état de l'art a donné un large aperçu des contaminants pouvant être rencontrés comme le résume le tableau ci-dessous :

- Émission de gaz : Des gaz toxiques et inflammables sont libérés lors de l'emballage thermique. La composition du mélange gazeux évolue fonction de nombreux facteurs (chimie de la batterie, état de charge de la batterie et évolution de l'emballage thermique) mais reste notamment composé d'électrolyte vaporisé, de monoxyde de carbone et de dioxyde de carbone, de dihydrogène, d'hydrocarbures (comme le méthane, l'éthane, l'éthylène), d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (comme le benzène, le toluène, le styrène, le biphenyle), de composés fluorés (en particulier l'acide fluorhydrique et le fluorure de phosphoryle), et d'autres espèces toxiques comme l'acroléine, le cyanure d'hydrogène, l'ammoniac ou même le dioxyde de soufre. Il est à noter que la revue de la littérature souligne le manque d'articles analysant les émissions de HAP et les COV.
- Émission d'aérosols : L'aérosol émis conduit à la libération de particules, dont la taille varie de l'échelle du μm à celle du nm , combinées à des gouttelettes de liquide. En fonction de la chimie de la batterie, différents types de particules (morphologie, composition, quantité) sont observées, les particules solides restant composées d'un mélange de composés métalliques (Ni, Al, Cu, Co, Mn et Li) et non-métalliques (C, O, F, Si, P et S).

Le risque de pollution de l'environnement et la menace pour la vie humaine ne peuvent donc pas être écartés car certaines particules d'aérosol sont composées d'éléments toxiques, et certains aérosols peuvent être respirés en raison de leur taille réduite. Outre les particules d'aérosol, on retiendra que des particules solides sont également émises avec une taille supérieure au millimètre.

- Eaux usées : En général, les eaux usées sont chargées d'ions, d'éléments métalliques et de composés organiques, dont la toxicité est fortement influencée par l'exposition aux fragments de batterie et aux fumées, ainsi que par le taux de dilution. Par conséquent, la pollution de l'eau dépend fortement de la méthode d'intervention choisie (fonction si l'eau est appliquée directement sur la batterie/le système ou plutôt sur les éléments environnant la batterie ou si un réservoir d'immersion est préféré). Les études disponibles mettent en évidence la pollution potentielle liée aux eaux usées.

Alors que la littérature scientifique mets facilement en évidence le risque de pollution induite par les feux de batterie, des difficultés ont été rencontrées pour définir des facteurs d'émission, en raison du manque de données à grande échelle, du manque d'informations fournies dans les publications (par exemple indication de la concentration des gaz sans le volume total émis), de la diversité des méthodes d'analyse des gaz mise en place, de la diversité de chimies et de formats batteries étudiées. En outre, l'absence de valeurs sur la perte de masse empêche la définition des facteurs d'émission à exprimer en grammes de gaz émis par gramme de combustible brûlé (comme généralement défini dans le domaine de la combustion).

Une méthodologie dédiée à la définition du facteur d'émission des LIBs a donc été proposée en utilisant la normalisation du facteur d'émission par rapport à l'énergie nominale stockée (exprimée en Wh). Les valeurs ont été normalisées par rapport aux données fournies par la littérature ou par une valeur générique si l'information n'était pas fournie (160 Wh/kg pour une batterie complète et 250 Wh/kg pour une cellule ou un groupe de cellules sans système externe). Trois méthodes ont été ensuite appliquées pour collecter les valeurs de facteur d'émission :

- Le facteur d'émission considéré pour construire la base de données est estimé directement dans l'article scientifique examiné. Seule une vérification des méthodes de mesure utilisées et des conditions d'essai est alors effectuée.
- L'intégration des courbes d'émission dans les articles scientifiques est effectuée, lorsqu'elles sont disponibles, afin d'estimer la quantité totale produite pour un gaz donné. Les résultats sont ensuite normalisés par l'énergie potentielle disponible en fonction de la masse de l'échantillon.
- Les résultats des précédentes études menées en internes Ineris et Sandia sont pris en compte.

Les facteurs d'émission pour les LIB, obtenus avec cette méthodologie sur la base des données disponibles, ont ensuite été comparés à ceux des hydrocarbures, des véhicules avec moteur à combustion interne (ICE), des véhicules électriques (EV) et des pneus, ce qui a permis d'aboutir aux conclusions suivantes :

- Les facteurs d'émission de CO et de CO₂ ne sont pas significativement différents pour les LIBs par rapport à d'autres carburants tels que les hydrocarbures ou les véhicules (attention le rapport CO/CO₂ des LIBs ne traduit pas directement la ventilation du feu car les LIBs libèrent du CO et de l'O₂).
- Les émissions d'oxyde d'azote semblent augmentées dans le cas des LIBs (à approfondir). En ce qui concerne les acides halogénés, comme attendu, le facteur d'émission du HF, sans être nécessairement élevé, est plus important pour les batteries et les EV que pour les véhicules ICE
 - o A noter, les acides halogénés et les NOx sont particulièrement préoccupants car ils polluent fortement le sol et l'eau et détruisent la couche d'ozone.
- La production de particules semble être plus faible pour les LIB. Toutefois, il est important de souligner que la composition des particules diffère, principalement en raison de la présence de métaux dans la matière particulaire des LIB.

- Les principaux polluants des LIBs avec effet à long terme sont probablement les métaux. Les essais feu témoignent de facteurs d'émission significatifs pour ce type de combustible, beaucoup plus important que pour d'autres combustibles, même les pneus qui sont pourtant l'un des combustibles classiques avec le plus grand facteur d'émission de métaux.
- Parmi les métaux trouvés, le cobalt et le nickel sont très préoccupants en raison de leur toxicité vis-à-vis des êtres humains et de l'environnement.
- Les facteurs d'émission des COV et HAP des LIBs semblent être du même ordre de grandeur que ceux observés pour d'autres combustibles.

Certains verrous encore à lever ont été mis en avant, comme la nécessité de clarifier le facteur d'émission en fonction de la composition chimique des LIBs. En outre, la préoccupation liée aux émissions de métaux amène à préconiser un contrôle spécifique des espèces métalliques après les feux de batteries, contrôle à réaliser tout s'attachant à l'impact spécifique de chaque métal sur l'environnement, à la fois dans l'air et dans l'eau. Des recommandations ont également été proposées pour collecter les informations pertinentes à l'amélioration des facteurs d'émission. Par exemple, l'analyse en continu des gaz et de la perte de masse est conseillée pour toute étude dédiée à l'évaluation de l'impact environnemental des feux de batteries. La dépendance des facteurs d'émission aux chimies de batteries, aux méthodes d'initiation de l'emballage thermique et aux diverses configurations système reste également une piste à creuser dans les études futures.

Pour approfondir l'étude de l'impact environnemental des batteries Li-ion, une modélisation des incendies a été réalisée en se basant sur les facteurs d'émission définis précédemment tout en prenant en compte trois cas représentatifs (couvrant les événements passés et anticipant les potentiels futurs événements associés aux feux de larges BESS). Les scénarios feux ont été comparés pour différents carburants stockés : LIBs, hydrocarbures, PVC et de pneus (comparaison réalisée pour donner seulement un ordre de grandeur compte tenu de l'incertitude associée à la définition des facteurs d'émission LIBs). Les principaux enseignements tirés des simulations sont, tout d'abord, la dilution réduite du panache d'incendie pour les incendies de batteries. En effet, les incendies de batteries sont associés généralement à une énergie thermocinétique réduite du panache de fumée, entraînant alors une dispersion limitée dans l'atmosphère. Par conséquent, les dépôts de HAP et de produits similaires peuvent être plus importants lors d'un incendie de batteries LIBs en comparaison d'un incendie de combustible classique ayant le même facteur d'émission, principalement en raison de cette dilution atmosphérique plus faible. En outre, les métaux ont été identifiés comme les polluants potentiellement les plus critiques en regards des dépôts à la suite des feux batterie. Une mise en garde demeure, car ces résultats doivent être analysés à la lumière de la difficulté rencontrée pour définir des facteurs d'émission robustes pour les polluants spécifiques émis par les batteries, notamment les métaux, qui restent une inconnue dans l'évaluation de l'impact des incendies de batterie.

Comme tout incendie, les incendies de BESS représentent une source potentielle de pollution de l'environnement. Il existe plusieurs chemins de contaminations qui dépendent fortement du scénario envisagé et de la méthode de lutte contre l'incendie utilisée. Des facteurs d'émission dédiés aux LIBs ont été proposés, mais ils reposent sur peu de données disponibles. La principale conclusion de cette étude est l'émission de particules contenant des composés métalliques dans les incendies de BESS et ce contenu métallique représente une préoccupation majeure spécifique à ce type d'incendie. L'émission d'autres espèces toxiques comme les HAP et les COV a été signalée et nécessite une analyse plus approfondie pour être consolidée. Des améliorations en termes de mesures et valeurs à fournir ont été proposées pour les futures études menées pour améliorer les connaissances sur les émissions des LIBs. Bien que les facteurs d'émission influencent fortement l'impact environnemental, ils ne constituent pas le seul paramètre. En effet, la dispersion du panache est également un paramètre clé essentiel. Une particularité de l'incendie de LIBs mise en évidence dans l'étude est la dilution limitée du panache d'incendie en raison de la cinétique impliquée, ce qui affecte la contamination indirecte du sol et de l'eau. En conclusion, une analyse plus approfondie de la contamination en situation réelle et lors d'essais à grande échelle est conseillée afin d'élargir et de rassembler plus de données cohérentes pour l'analyse future de l'impact environnemental des incendies de LIBs.

4.2. Rapport NFPA

<https://www.nfpa.org/-/media/Project/Storefront/Catalog/Files/Research/Research-Foundation/Reports/Hazardous-materials/RFEEnvironmentalImpactLithiumIonBatteryIncidentsReport.pdf?rev=224937dfbf5740a78ca9bc2ef8c30a41&hash=1125E506ABFE2E5AEFA4A1EC42D2CA93>

