Notes techniques

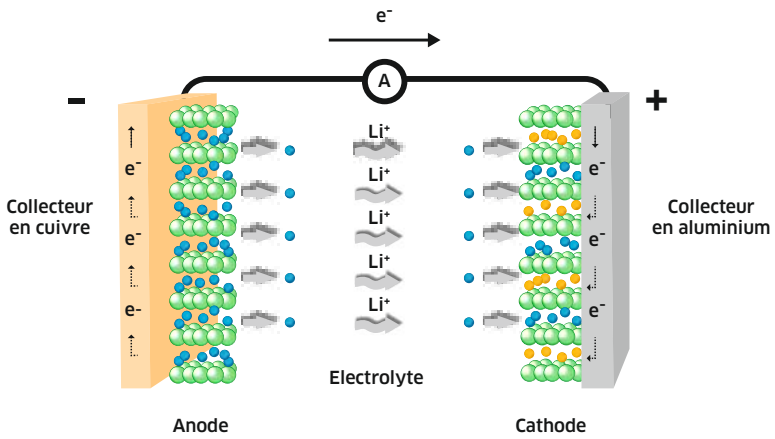
SÉCURITÉ ET PRÉVENTION DES RISQUES CHIMIQUES LIÉS AUX BATTERIES LITHIUM-ION

Cet article a pour but d'apporter des connaissances sur le fonctionnement des batteries lithium-ion et de proposer un aperçu des risques chimiques liés à leurs utilisations et les moyens de les prévenir. Il se focalise sur les technologies nickel-manganèse-cobalt (NMC) et lithium-fer-phosphate (LFP), qui représentent la majorité des technologies présentes sur le marché.

MAXIME VAUFLEURY, HUBERT MONNIER, STÉPHANIE PACAULT
INRS, département Ingénierie des procédés

Contexte

Depuis plus d'une décennie, le domaine des batteries lithium-ion connaît une expansion notable, notamment dans les secteurs des appareils électroportatifs et de la mobilité. Ces batteries jouent également un rôle clé dans la transition énergétique de par leur haute densité énergétique et leur compacité permises par un stockage de l'énergie sous forme chimique. Toutefois, cette expansion s'accompagne de l'apparition de nouveaux risques professionnels dans certains secteurs d'activité tels que le reconditionnement ou le recyclage de ces dispositifs. Ces risques sont associés à des dangers spécifiques, notamment l'incendie, l'électrisation, l'émission de gaz toxiques ou encore l'explosion. Cet article apporte un éclairage sur des travaux ayant porté sur la composition des batteries au lithium, sous l'angle du risque chimique, et rappelle les mesures de prévention à mettre en œuvre associées à l'usage des batteries.



© INRS

↓FIGURE 1
Schéma du fonctionnement d'une batterie lithium en décharge ; en bleu les ions lithium et en vert et orange la structure hôte (NMC, LFP) [2].

Fonctionnement d'une batterie lithium-ion

Une batterie est un accumulateur électrochimique. Son principe est de transformer de l'énergie électrique sous forme d'énergie chimique et de la stocker. Lors de l'utilisation de la batterie, cette énergie chimique est restituée sous la forme d'énergie électrique. La *Figure 1* schématise le principe de fonctionnement d'une batterie lithium-ion. Celle-ci est constituée de cinq éléments assemblés entre eux : deux collecteurs, une électrode positive (la cathode), une électrode négative (l'anode) et un électrolyte.

- **L'électrode positive** (cathode) se trouve sous forme solide. C'est un matériau conducteur de type oxyde de métal de transition lithié (Cu, Co, Mn) [1].
- **L'électrode négative** (anode) est généralement constituée de graphite. Lors de la décharge, les ions lithium migrent de l'anode vers la cathode à travers l'électrolyte, tandis que les électrons suivent un circuit externe, fournissant ainsi un courant électrique qui permet d'alimenter un appareil *(Cf. Figure 1)*. La réaction d'oxydation qui se produit à l'anode lors de ce processus est représentée par *l'équation (1) :*

$$Li_x C_6 \rightarrow C_6 + x\ Li^+ + x\ e^- \qquad (1)$$

Lorsque la batterie est en charge, la réaction inverse se produit. Les deux électrodes sont séparées par un séparateur plastique poreux permettant le passage des ions lithium.

- **L'électrolyte**, lui, est le plus souvent liquide. En tant que solution conductrice, il joue un rôle fondamental dans la transformation et le stockage de l'énergie. Il est principalement constitué d'un sel de lithium dissous dans un mélange de solvants organiques →

RÉSUMÉ

Les batteries lithium-ion sont largement utilisées dans les appareils portables et véhicules électriques. Elles se distinguent par leur haute densité énergétique. Toutefois, elles présentent des risques chimiques importants. L'article examine cette technologie, le principe de fonctionnement, la composition des électrolytes et les risques d'incidents (incendies, fuites, émissions de gaz). Chaque étape du cycle de vie (fabrication, transport, usage, stockage, recyclage) présente des risques. Une prévention adaptée et des protocoles rigoureux sont indispensables, en particulier dans les centres de tri et de traitement où les accidents sont les plus fréquents.

SAFETY AND PREVENTION OF CHEMICAL RISKS RELATED TO LITHIUM-ION BATTERIES

Lithium-ion batteries are widely used in portable devices and electric vehicles, thanks to their high energy density. However, they present significant chemical risks. This article examines this technology, how it works, the composition of the electrolytes and the risks of incidents (fires, leaks, gas emissions). Risks are present at each stage of the lifecycle of batteries (manufacturing, transport, use, storage, recycling). Consequently, prevention and rigorous protocols are indispensable, particularly in waste-sorting and -treatment centres, where most battery-related accidents occur.

inflammable tels que le carbonate de diméthyle ou le carbonate de propylène. Ce mélange peut contenir également des additifs, notamment des retardateurs de flamme (RF) et du carbonate de fluoroéthylene (FEC) pour une meilleure cyclabilité. Aussi, pour assurer un fonctionnement optimal, l'électrolyte doit posséder une conductivité ionique élevée et une faible viscosité. Enfin, il doit être anhydre en raison de l'incompatibilité entre l'eau et le lithium solide, ainsi que des réactions secondaires, comme la formation d'acide fluorhydrique.

- **Les collecteurs** sont des feuilles métalliques, le plus souvent en cuivre ou en aluminium, sur lesquelles sont déposés, sous forme de poudre, les matériaux constituant l'anode ou la cathode. Leur rôle est d'assurer le transport du courant électrique entre les deux électrodes.

Le choix du lithium pour la fabrication des batteries repose sur ses propriétés chimiques et physiques. Il s'agit du métal le plus léger, et il possède une densité énergétique élevée, ce qui permet de concevoir des batteries à la fois légères et compactes – des caractéristiques particulièrement adaptées aux appareils portatifs et aux véhicules électriques. Par ailleurs, sa forte réactivité et son potentiel électrochimique élevé permettent de générer une tension plus grande que celle obtenue avec d'autres métaux.
Ces caractéristiques contribuent à rendre les batteries lithium-ion plus puissantes, durables et efficaces que les autres, répondant ainsi aux exigences croissantes liées au stockage d'énergie. Par exemple, une batterie lithium-ion possède une autonomie et une énergie spécifique plus de dix fois supérieures à celles d'une batterie au plomb (Pb-acide) *(Cf. Tableau 1)*.

Les deux principaux types de batteries lithium-ion : nickel-manganèse-cobalt (NMC) et lithium-fer-phosphate (LFP)

Le nom de ces deux technologies de batteries fait référence à la composition chimique de leur électrode positive (cathode). Le choix de la cathode est crucial en ce qui concerne le coût, la sécurité, la stabilité, l'énergie et la puissance de la batterie. Les batteries possédant une cathode NMC ou LFP représentent la majorité des technologies lithium-ion présentes sur le marché, en particulier dans les secteurs de l'automobile et de l'outillage portatif [3]. La stœchiométrie du mélange nickel, manganèse et cobalt permet d'atteindre un équilibre optimal entre l'énergie spécifique, la longévité et la sécurité. Par exemple, une cathode NMC 111 contient autant de nickel que de manganèse ou de cobalt. Cependant, le coût du

TABLEAU 1 → Tension nominale et énergie spécifique (la quantité d'énergie qu'une batterie peut stocker par unité de masse) en fonction de la technologie des batteries.

TYPE DE BATTERIE	BATTERIE ALCALINE	BATTERIE PLOMB	BATTERIE NICKEL-MÉTAL HYDRURE	BATTERIE NICKEL-CADMIUM	BATTERIE LITHIUM (MÉTAL)	BATTERIE LITHIUM (ION)
Intitulé	LR	Pb-acide	Ni-MH	Ni-Cd	LMB	Li-Ion
Tension (V)	1,2-1,5	2	1,2	1,2	3,3-3,7	3,2-3,8
Énergie spécifique (Wh/kg)	6-10	10-20	10-60	10-60	200-300	70-300

cobalt et les problèmes environnementaux associés à ses conditions d'extraction dans certaines régions du monde compliquent son utilisation.
De plus, tant les industriels que les pouvoirs publics manifestent une volonté de réduire la teneur en cobalt ou de le substituer par des matériaux moins coûteux et plus écoresponsables, au risque de sacrifier une partie de la capacité de la batterie [4]. C'est dans ce contexte que les batteries LFP ont fait leur apparition. Ces batteries utilisent le phosphate de fer lithié ($LiFePO_4$) comme matériau à la cathode, en remplacement du NMC. Le fer étant un métal moins réactif que le nickel ou le cobalt, les réactions au sein d'une batterie LFP sont moins susceptibles de générer de la chaleur. Par conséquent, elles présentent une probabilité plus faible de production de gaz inflammables provenant de l'électrolyte en cas de surchauffe. De plus, elles possèdent une meilleure capacité à dissiper la chaleur que les batteries NMC, ce qui les rend plus tolérantes aux variations électriques et thermiques. La structure de la cathode NMC peut devenir instable sous des tensions élevées. Ainsi, au-delà de 4,3 V, la structure cristalline peut se déstabiliser, entraînant à la fois un dégagement gazeux et une dissolution des métaux de transition dans l'électrolyte, qui amènent à une dégradation accélérée de la batterie. Pour les batteries LFP, la température de décomposition de la cathode se situe entre 250 °C et 270 °C, contre 180 °C à 220 °C pour une cathode NMC, ce qui les rend plus résistantes aux abus thermiques.
Par ailleurs, elles sont moins toxiques et présentent un impact environnemental moindre lors de leur fabrication et de leur recyclage, comparé à d'autres technologies de batteries lithium-ion contenant des métaux lourds comme le cobalt. En revanche, la technologie LFP dispose d'une énergie spécifique plus faible que la NMC (30 % à 40 % de réduction ; *Cf. Tableau 2*).

L'électrolyte : un élément indispensable, mais responsable des incidents

Les électrolytes sont des composants essentiels au bon fonctionnement des batteries. Toutefois, en raison des enjeux économiques importants, les acteurs de ce secteur d'activité particulièrement concurrentiel publient rarement la composition exacte des batteries, en particulier celle de l'électrolyte. En effet, il joue un rôle central dans le fonctionnement des batteries ; il est en contact direct avec les interfaces des deux électrodes et il permet aux ions lithium de diffuser d'une électrode à l'autre, assurant la conduction ionique nécessaire à la circulation des électrons.
L'électrolyte peut se trouver sous forme liquide (mélange d'une solution saline de lithium et d'un solvant organique), sous forme solide (polymère, céramique ou oxyde), ou encore sous forme de gel.
Les électrolytes liquides sont les plus couramment utilisés. L'élaboration de l'électrolyte présente des défis [6], notamment en matière de sécurité, car il est très généralement inflammable. Une fuite d'électrolyte est possible lorsque les batteries sont utilisées en conditions dégradées, par exemple après un choc, lors d'une charge trop importante ou encore dans des conditions de températures anormalement élevées ou basses. En ce qui concerne sa composition, il s'agit d'un mélange de sels de lithium, de solvants et d'additifs. Généralement, les sels sont les suivants : l'hexafluorophosphate de lithium ($LiPF_6$), le trifluorométhanesulfonate de lithium ($LiCF_3SO_3$), le tétrafluoroborate de lithium ($LiBF_4$) et l'hexafluoroarsenate de lithium ($LiAsF_6$). Ils sont dissous dans un solvant organique, mélange de substances de structures cycliques et acycliques pour faciliter la mobilité ionique [7] :
- le carbonate de diéthyle (DEC), liquide incolore et stable à haute température et inflammable ;
- le carbonate de propylène (PC), liquide transparent et inflammable ;
- le carbonate de diméthyle (DMC), liquide transparent, inflammable ;
- le glymé, mélange de carbonate de diéthyle et de triéthyléther, qui présente une bonne stabilité thermique et une viscosité réduite par rapport au DEC seul, qui est inflammable.

Des additifs sont également présents dans cette solution, à la fois pour inhiber les réactions chimiques indésirables et pour aider à la stabilisation thermique en retardant l'élévation de la température. Ces additifs sont classés en différentes catégories :
- les inhibiteurs de corrosion : ce sont des substances qui ralentissent la corrosion des électrodes et des collecteurs comme le phosphate de tributyle (TBP), le phosphate de triphényle (TPP) et le *N*-butyl-*N*-nitroso-*p*-phénylènediamine (N-BNPD) ;
- les agents anti-diélectriques : leur rôle est d'empêcher la formation de diélectriques qui créent une résistance parasite entre les électrodes ; les deux principaux sont le sébacate de dibutyle (DBS) et le sébacate de dipropyle (DPS) ;
- les agents de stabilité : ils retardent la dégradation de l'électrolyte en empêchant la réaction des solvants avec les sels de lithium, ou en stabilisant les couches d'interface solide-électrolyte. Il s'agit de

TYPE DE CATHODES (anode en graphite)	NMC	LMO*	LFP	NCA*	LCO*
Énergie spécifique (Wh/kg)	150-300	100-150	90-120	200-260	150-200

← **TABLEAU 2**
Comparaison des énergies spécifiques des batteries lithium-ion en fonction des cathodes utilisées [5].
**LMO : Oxyde de lithium-manganèse ; NCA : Nickel-cobalt-aluminium ; LCO : Oxyde de lithium-cobalt.*

→

carbonate de vinylène (VC), d'acrylonitrile butadiène styrène (ABS) ou de polyéthylène glycol (PEG).
Les électrolytes solides offrent une meilleure sécurité car ils ne sont pas inflammables et ne peuvent pas diffuser/sortir de l'enveloppe de la batterie. Cependant, la conception de l'interface entre les électrodes et l'électrolyte est toujours en phase d'amélioration [8]. Cette interface, appelée SSI (*solid-state interphase*), tend à se détériorer avec le temps, ce qui augmente la résistance interne et dégrade les performances de la batterie. Des équipes de recherche académiques, ainsi que les services R&D de grands groupes industriels, travaillent activement à surmonter ces limites. Les améliorations visent à :

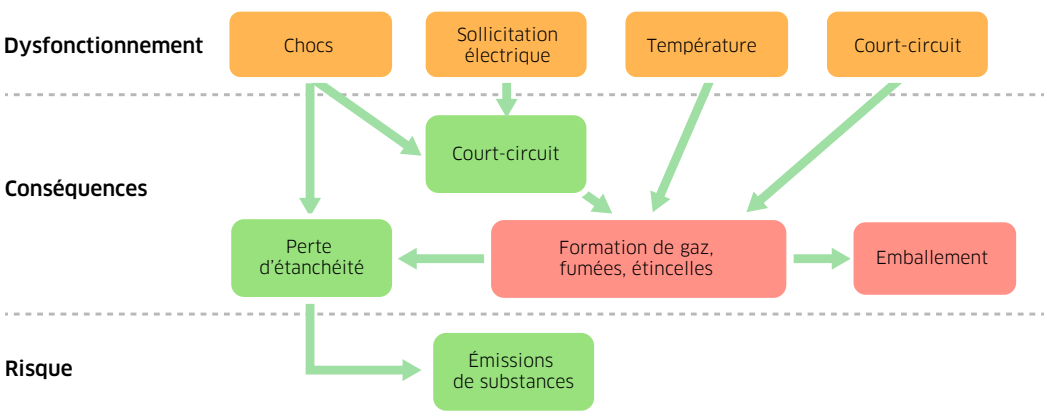
- stabiliser chimiquement l'interface, pour limiter les réactions parasites ;
- réduire la résistance de contact ;
- assurer une bonne adhérence mécanique entre électrodes et électrolyte solide.

Les électrolytes gels, quant à eux, combinent les avantages des liquides et des solides. Ils sont flexibles, ce qui permet une meilleure interface avec les électrodes, et non inflammables, ce qui accroît la sécurité. En revanche, leur conductivité ionique à température ambiante est souvent inférieure à celle des électrolytes liquides, ce qui limite leur utilisation à certaines applications comme les voitures électriques. Dans ce cas précis, la batterie fonctionne généralement autour de 50 °C, ce qui permet d'améliorer cette conductivité.

Quelle prévention, pour quels risques ?

Lors de son utilisation, la batterie peut être exposée à différents évènements/risques *(Cf. Figure 2)*. Ces évènements peuvent générer des dysfonctionnements, tels que des fuites d'électrolytes, des émissions de gaz ou de fumées, la formation d'étincelles, l'apparition de flammes, et, dans les cas les plus graves, une explosion. Différents facteurs peuvent être à l'origine de ces incidents.
Les chocs mécaniques entraînent des déformations, des perforations ou un décollement des collecteurs de courant qui provoquent parfois un contact entre les électrodes. Le court-circuit engendré a pour conséquence une élévation de la température du milieu, l'accélération de réactions chimiques au sein de l'électrolyte et un possible emballement thermique.
Les sollicitations électriques excessives (courant important : deux fois le courant nominal de la batterie), comme les décharges profondes (tension de la batterie inférieure à 2,5 V) ou les surcharges, doivent également être prises en compte. Il existe des risques de dégradation des matériaux (décomposition de l'électrolyte, endommagement des électrodes), des risques de surchauffe et d'emballement thermique. Une recharge rapide, effectuée avec un courant élevé, peut dégrader la batterie. Dans certaines conditions de courant et de température, des dépôts métalliques appelés dendrites peuvent se former sur les électrodes. Ils ont comme conséquences de perforer le séparateur, créant des courts-circuits internes et une hausse de la température avec les mêmes conséquences qu'évoqué précédemment.
Les variations thermiques influencent également le comportement de la batterie. À des températures basses, la viscosité de l'électrolyte augmente, ce qui réduit la cinétique de transfert des ions lithium entre les électrodes. Les temps de charge et de décharge sont plus lents, ce qui entraîne une surchauffe ou un dysfonctionnement de la batterie. À des températures élevées, au-delà de 50 °C, les matériaux de la batterie se dilatent, facilitant l'infiltration d'électrolyte ou d'impuretés au sein des électrodes, ce qui provoque à terme des dysfonctionnements. Enfin, des réactions non souhaitées au sein de l'électrolyte peuvent se produire, comme la décomposition du $LiPF_6$ ou la formation de gaz : CO_2, CO, CH_4.
En cas de perte d'étanchéité ces substances sont émises et un contact avec l'homme est possible. L'ensemble de ces risques est présent dans divers contextes, notamment dans les centres de tri et de recyclage. Les dysfonctionnements possibles et les

FIGURE 2 → Facteurs de dysfonctionnement et leurs conséquences lors de l'utilisation d'une batterie lithium-ion.



DYSFONCTIONNEMENT	DESCRIPTION	CONSÉQUENCES	MESURES DE PRÉVENTION
Chocs mécaniques	Chutes, perforations, compressions	Fuite d'électrolyte, court-circuit, incendie, explosion	Protection adéquate des batteries, emballage adapté
Décharges profondes ou surcharges	Courant excessif	Dégénération des électrodes, perte de capacité, court-circuit, incendie	Respecter les consignes de charge et de décharge, utiliser des chargeurs prévus par les fabricants
Températures extrêmes	Froid (< 0 °C) ou chaleur (> 50 °C)	Dépôt de lithium, perte de performance, court-circuit, incendie	Ne pas utiliser les batteries en dehors des plages de température recommandées par leur fabricant
Courts-circuits	Pénétration d'objets conducteurs, défauts de fabrication	Dégagement de chaleur, incendie, explosion	Inspection régulière des batteries, ne pas utiliser de batteries endommagées

← TABLEAU 3
Dysfonctionnements possibles et mesures de prévention.

mesures de prévention associées sont synthétisés dans le *Tableau 3*.

Où peut-on rencontrer des situations à risques ?

Les batteries lithium-ion sont omniprésentes dans le monde du travail. Elles peuvent faire courir des risques aux salariés à chaque étape de leur cycle de vie, que ce soit lors de leur utilisation ou de leur stockage *(Cf. Figure 3)*.

Fabrication

La production de batteries lithium-ion implique l'utilisation de matériaux chimiques actifs tels que le lithium, le cobalt et le nickel, qui ont une toxicité avérée. Certaines étapes de la fabrication, comme le mélange des électrolytes et l'assemblage des cellules, peuvent générer des conditions propices à des réactions chimiques indésirables (vaporisation de substance…), augmentant ainsi le risque d'exposition des salariés.

Transport

Lors du transport, qu'il soit terrestre, maritime ou aérien, les batteries lithium-ion sont classées comme des marchandises dangereuses. Les variations de pression et de température lors du transport peuvent accentuer les risques de dysfonctionnement.
Dans le transport aérien à partir de janvier 2026, il sera obligatoire de transporter les batteries seules à un taux de charge inférieur à 30 % (norme imposée par l'IATA *(International air transport association)*. Lorsque la batterie est dans un équipement (par exemple un ordinateur), il s'agira uniquement d'une recommandation. Dans les domaines du maritime et du terrestre, pour les batteries seules, il est recommandé (sans obligation) de les transporter à un taux de charge inférieur à 50 %.

Utilisation

L'utilisation d'une batterie doit s'effectuer selon les préconisations des fournisseurs. La variation de la température, un endommagement physique ou encore une surcharge sont autant de facteurs qui peuvent entraîner un risque de dégradation de la batterie.

← FIGURE 3
Cycle de vie d'une batterie au lithium.

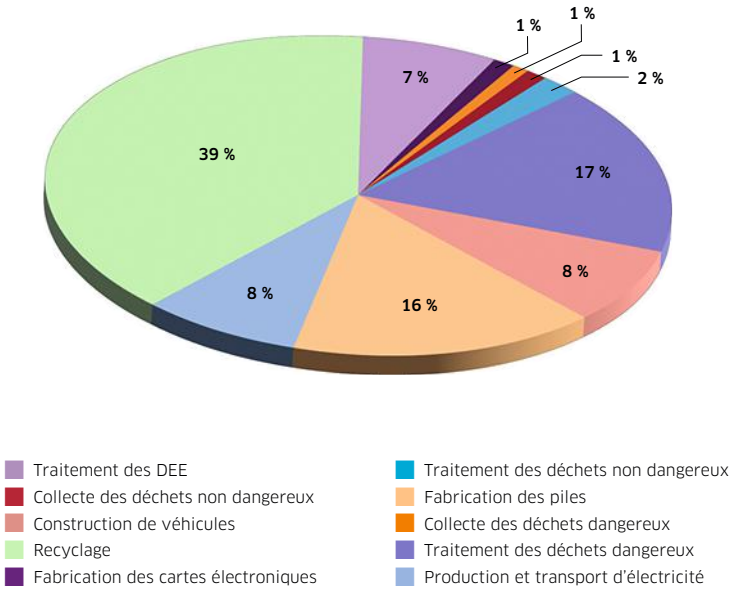
Stockage

Les conditions de stockage correct des batteries lithium-ion sont souvent méconnues. Ces batteries vieillissent, même lorsqu'elles ne sont pas utilisées. Il est donc important de bien respecter les conditions de stockage suivantes :
- température maîtrisée, zone sèche et bien ventilée ;
- éloignement des sources de chaleur et matières inflammables ;
- protection mécanique et électrique ;
- niveau de charge maintenu à 30%-70 % ;
- contrôle visuel régulier.

Fin de vie et recyclage

C'est à cette étape que les principales difficultés sont rencontrées, que ce soit dans les points de collecte ou de recyclage. Différents risques existent lors de la manipulation de batteries usagées : chimique (émanations toxiques), incendie ou explosion. Ces risques sont d'autant plus présents que des batteries en fin de vie sont stockées en grandes quantités.

→



↑ FIGURE 4
Répartition des nombres d'incidents et d'accidents liés aux batteries au lithium par secteur d'activité industrielle.

À l'aide de la base de données Analyse, recherche et information sur les accidents (Aria) fournie par le Bureau d'analyse des risques et pollutions industriels (Barpi) du ministère en charge de la Transition écologique, qui recense des incidents et accidents ayant eu des conséquences financières, matérielles ou humaines, il est possible d'effectuer un bilan relatif à l'accidentologie au cours des dix dernières années *(Cf. Figure 4)*.

La récupération et le démantèlement des déchets représentent 39 % des incidents totaux, le secteur d'activité du recyclage est le plus accidentogène. En y ajoutant le traitement des déchets dangereux, le pourcentage s'approche des 60 %. Ce chiffre important met en avant les difficultés rencontrées lors de la dernière étape du cycle de vie des batteries, qu'elles soient valorisées ou éliminées. Ces incidents peuvent libérer des substances chimiques toxiques et inflammables, dont des composés organiques volatils (COV) déjà bien identifiés [9], et de nombreuses substances issues de réactions secondaires encore mal connues à ce jour, faisant courir des risques pour la santé des salariés exposés.

Conclusion

Les batteries lithium-ion se distinguent par leurs excellentes performances, en particulier leur densité énergétique élevée et leur longue durée de vie. Ces caractéristiques les rendent indispensables pour les appareils électroniques portables, les véhicules électriques et, plus généralement, le stockage de l'énergie. Le choix des matériaux utilisés permet d'optimiser divers aspects tels que la densité énergétique, la sécurité et la durabilité. Cependant, leur utilisation soulève plusieurs défis, tant en matière de santé au travail que d'impact environnemental, en particulier lors de leur traitement en fin de vie.

Bien qu'elles soient fiables, ces batteries peuvent faire courir des risques, particulièrement en cas de chocs mécaniques, d'abus électriques ou de surchauffe. Le nombre croissant d'incident constatés, notamment dans le secteur du recyclage, met en évidence des problèmes persistants qui risquent de s'accentuer avec l'augmentation continue de la production. Une gestion rigoureuse et la mise en place de mesures de prévention à chaque étape de leur cycle de vie sont donc essentielles [10]. ●

BIBLIOGRAPHIE

[1] NAOKI N. *ET AL.* – Li-ion battery materials: present and future. *Elsevier Enhanced Reader.*

[2] BARCHASZ C. – *Développement d'accumulateurs Li/S.* Thèse, université de Grenoble, 2011.

[3] IEA – *Electric LDV battery capacity by chemistry, 2018-2022 – Charts, data & statistics.* Accessible sur : https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/electric-ldv-battery-capacity-by-chemistry-2018-2022

[4] GUIHÉNEUF J. *ET AL.* – *Nos modèles productifs face aux enjeux de transformation : quels défis pour l'avenir ?* Conseil économique, et social et environnemental, 2025.

[5] XU G.L. *ET AL.* – Challenges and strategies to advance high-energy nickel-rich layered lithium transition metal oxide cathodes for harsh operations. *Advanced functional materials,* 2020, 30, 2004748. Accessible sur: https://doi.org/10.1002/adfm.20204748

[6] LIU J. *ET AL.* – Challenges in Li-ion battery high-voltage technology and recent advances in high-voltage electrolytes. *Journal of energy chemistry*, 2024, 91, pp. 73-98.

[7] KAINAT S. *ET AL.* – Electrolytes in lithium-ion batteries: advancements in the era of twenties (2020's). *Materials chemistry and physics,* 2024, 313, art. 128796.

[8] ANSES – *Évaluation des effets sur la santé et des méthodes de mesure des niveaux d'exposition sur le lieu de travail pour le cobalt et ses composés à l'exception du cobalt associé au carbure de tungstène.* 2014. Accessible sur : www.anses.fr

[9] ZHOU L. *ET AL.* –Emission characteristics of VOCs from the typical spent lithium-ion battery recycling industry. *Journal of hazardous materials,* 2025, 493, art. 138381.

[10] INRS – *Les batteries au lithium. Connaître et prévenir les risques.* 2021. Accessible sur : https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%20640