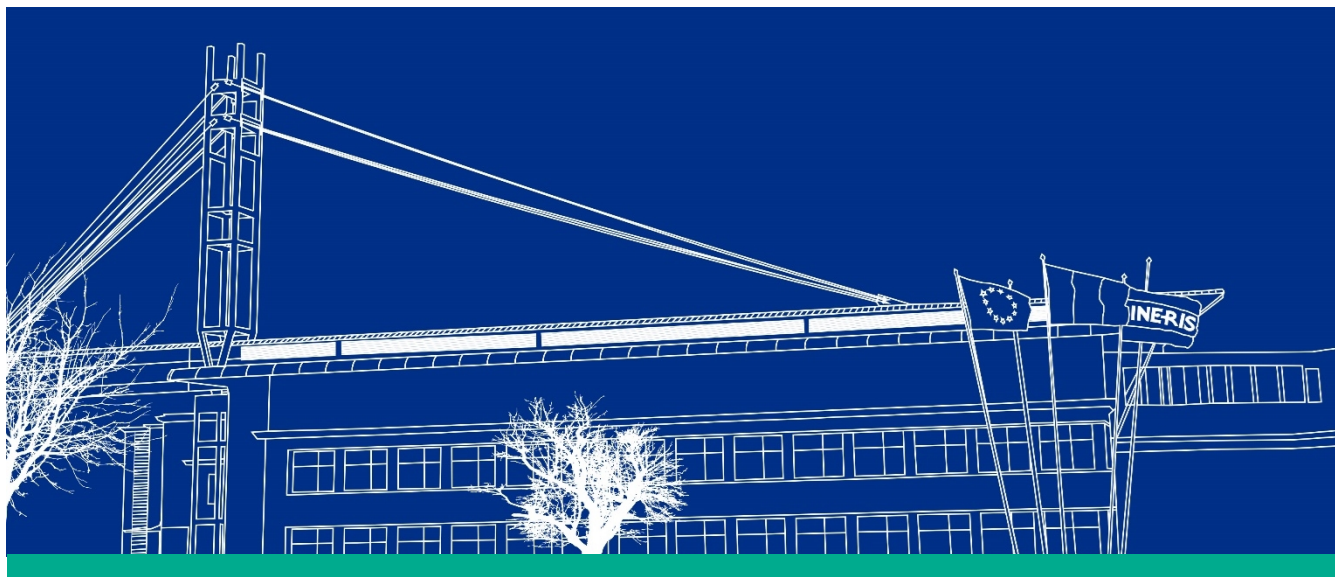




(ID Modèle = 454913)

Ineris - 227350 - 2804855 - v1.0

03/12/2024

Utilisation des sources d'énergie émergentes dans l'exploitation des industries extractives en souterrain

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 équivalent 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 SITES ET TERRITOIRES

Rédaction : CARON Caroline

Vérification : BOLVIN CHRISTOPHE; FRANCK CHRISTIAN; GOUZY AURELIEN

Approbation : DUPLANTIER STEPHANE - le 03/12/2024

Liste des personnes ayant participé à l'étude :

Table des matières

1	Introduction	6
2	Présentation des sources d'énergies émergentes et leurs potentiels de dangers associés	7
2.1	Batteries : présentation et caractéristiques, avantages et inconvénients, utilisations possibles, potentiels de dangers.	7
2.1.1	Présentation et caractéristiques des batteries Li-ion	7
2.1.2	Potentiels de dangers des batteries Li-ion.....	8
2.1.3	Avantages et inconvénients.....	11
2.2	Hydrogène : présentation et caractéristiques, avantages et inconvénients, utilisations possibles, potentiels de dangers.	13
2.2.1	Présentation et caractéristiques de l'hydrogène.....	13
2.2.2	Potentiels de dangers de l'hydrogène	13
2.2.3	Avantages et inconvénients.....	15
2.3	Comparaison de la maturité des deux sources d'énergies.....	17
2.3.1	Maturité de l'hydrogène comme source d'énergie.....	17
2.3.2	Maturité des batteries Li-ion comme source d'énergie	19
3	Analyse du cadre réglementaire et normatif par rapport à ces énergies.....	21
3.1	Réglementation RGIE.....	21
3.1.1	Réglementation actuelle	21
3.1.2	Dispositions complémentaires pour encadrer l'utilisation des batteries en souterrain ..	22
3.2	Aspects réglementaires et normatifs	23
3.3	Aspects conception / technique	23
4	Analyse des Risques	25
4.1	Méthodologie de l'analyse des risques.....	25
4.2	Batteries.....	25
4.3	Hydrogène	30
4.3.1	Evénements redoutés centraux	30
4.3.2	Causes spécifiques suivant les phases.....	30
4.3.3	Phénomènes dangereux résultant des événements redoutés centraux.....	30
5	Fiche synthèse des éléments à considérer lors de l'instruction de dossier incluant ces sources d'énergies émergentes	32
6	Conclusion	34

Liste des figures

Figure 1 : Principe général de fonctionnement d'une batterie Li-ion (cas d'une chimie de cathode lithium-cobalt-oxyde, LCO).....	7
Figure 2. Fenêtre de stabilité en sécurité d'une batterie Li-ion.....	10
Figure 3 : Jet enflammé d'hydrogène sous pression en laboratoire à l'Ineris	14
Figure 4: La maîtrise du risque des batteries dès la conception (Source Ineris).....	24
Figure 5 : Cartographie des défaillances d'une batterie et leurs conséquences	29

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques physico-chimique de l'hydrogène	13
Tableau 2 : Caractéristiques d'inflammabilité de l'hydrogène	14
Tableau 3 : Arbre des causes pour le cas de l'utilisation d'une Batterie auxiliaire Li-ion en tant que source d'énergie pour un véhicule dans un milieu souterrain.	27
Tableau 4 : Conséquences pour le cas d'étude d'une Batterie auxiliaire Li-ion en tant que source d'énergie pour un véhicule dans un milieu souterrain	28

Résumé

Ce rapport explore l'utilisation des sources d'énergie émergentes pour les véhicules et engins utilisés dans les opérations souterraines, notamment dans les carrières. L'adoption de ces sources issues de technologies nouvelles, en pleine croissance, permet de réduire certaines nuisances et contraintes associées aux énergies fossiles. Toutefois, elles soulèvent de nouveaux risques, aussi bien pour la sécurité des travailleurs que pour la sécurité des installations souterraines en cas d'accidents ou de défaillances majeures.

Le rapport présente ces nouvelles technologies, analyse leurs dangers potentiels et évalue leur degré de maturité en fonction de leur utilisation. Une étude du cadre réglementaire actuel a également été réalisée pour vérifier son adéquation avec ces innovations. En complément, une analyse des risques génériques identifie des scénarios accidentels envisageables. Enfin, une fiche synthétique est proposée pour guider les inspecteurs dans l'évaluation des aspects accidentels des dossiers relatifs à ces technologies.

Pour citer ce document, utilisez le lien ci-après :

Institut national de l'environnement industriel et des risques, , Verneuil-en-Halatte : Ineris - 227350 - v1.0.

Mots-clés :

Source d'énergie émergente, batterie, hydrogène, industrie extractive, souterrain

1 Introduction

L'exploitation des sources d'énergie émergentes dans le domaine des véhicules et engins utilisés (camions, chargeuses...) pour les opérations souterraines, telles que les carrières, constitue un enjeu actuel majeur. Ces nouvelles technologies sont appelées à se développer, car elles permettent de réduire certaines nuisances et contraintes associées à l'utilisation des énergies fossiles.

Cependant, ces innovations technologiques comportent également des risques significatifs, tant pour la sécurité des travailleurs que pour la sûreté des opérations souterraines, notamment en cas d'accident ou de défaillance majeure. Dans ce contexte, les inspecteurs seront de plus en plus sollicités pour évaluer des dossiers relatifs à l'utilisation de ces véhicules et engins, ainsi que pour inspecter les sites qui les mettent en œuvre.

Ce rapport a pour objectif de présenter ces technologies émergentes, d'analyser leurs dangers potentiels et d'évaluer leur degré de maturité en lien avec leur usage en milieu souterrain. Il proposera également une étude du cadre réglementaire actuel afin de déterminer s'il est adapté face aux problématiques accidentels de ces nouvelles sources d'énergie. Par ailleurs, une analyse des risques générique sera menée pour identifier les scénarios accidentels possibles. Enfin, une fiche synthétique sera fournie, récapitulant les éléments clés à prendre en compte lors de l'instruction des études basées sur ces technologies.

2 Présentation des sources d'énergies émergentes et leurs potentiels de dangers associés

Ce chapitre présente les énergies connues à ce stade en fonction des connaissances actuelles. Celles citées ici sont déjà déployées dans d'autres secteurs du transport et de la manutention. Les informations traitées dans ce paragraphe viennent de recherches bibliographiques et de travaux réalisés par l'Ineris sur ces sujets.

2.1 Batteries : présentation et caractéristiques, avantages et inconvénients, utilisations possibles, potentiels de dangers.

Il existe plusieurs types de batteries tels que les batteries Lithium-ion, Acide-Plomb, Nickel-Cadmium, Nickel-Métal Hydrure... Cependant, c'est la technologie des batteries Lithium-ion (Li-ion) qui a connu une croissance spectaculaire ces dernières années, révolutionnant diverses industries, de la mobilité électrique à l'énergie renouvelable. En effet, les applications principales actuelles des batteries Lithium-ion sont la mobilité (véhicule électrique, trottinette, vélo...), les équipements portables et le stockage stationnaire.

C'est pourquoi, il a été décidé d'axer cette partie du rapport sur les batteries Li-ion.

Avant toute chose, voici quelques éléments nécessaires pour une meilleure compréhension de la suite de ce rapport. Une batterie est composée de trois éléments distincts qui sont :

- Cellule : Une cellule est l'unité de base d'une batterie, capable de stocker et de libérer de l'énergie électrique.
- Module : Un module regroupe plusieurs cellules connectées ensemble pour fournir une tension et une capacité supérieures à celles d'une seule cellule.
- Pack : Un pack est l'assemblage de plusieurs modules de batterie, avec un système de gestion (BMS), pour fournir l'énergie nécessaire à un dispositif ou un véhicule électrique complet.

2.1.1 Présentation et caractéristiques des batteries Li-ion

Une batterie Lithium-ion est un dispositif électrochimique qui stocke de l'énergie électrique en utilisant les réactions chimiques du lithium. Elle est composée d'une anode (souvent en graphite), d'une cathode (typiquement en oxyde de cobalt ou en phosphate de fer de lithium) et d'un électrolyte liquide ou solide. Lors de la décharge, les ions lithium migrent de l'anode vers la cathode, créant un courant électrique.

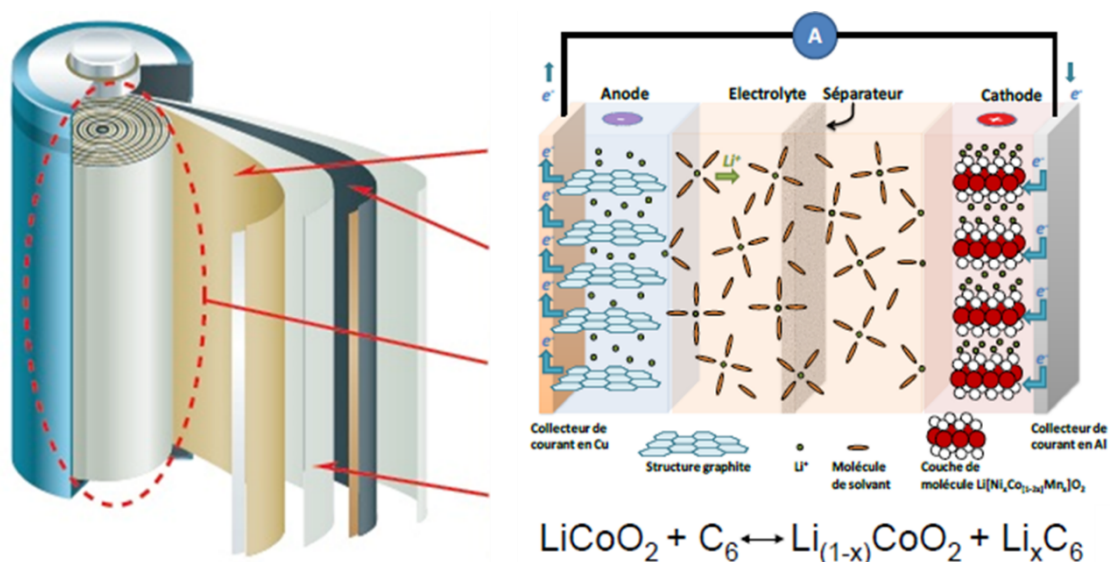


Figure 1 : Principe général de fonctionnement d'une batterie Li-ion (cas d'une chimie de cathode lithium-cobalt-oxyde, LCO)

Dans ces batteries, les électrodes se présentent sous la forme de feuilles métalliques flexibles (c.à.d., collecteurs de courant) enduites d'un matériau composite poreux semblable à une encre (séchée). Cette encre est un matériau composite qui contient trois constituants principaux :

- Un matériau actif (contenant le lithium, ou destiné à le recevoir),
- Un additif améliorant la conductivité électronique du film composite d'électrode (noir de carbone),
- Un liant polymère permettant une bonne tenue de l'encre sur le collecteur de courant.

Selon la polarité de l'électrode considérée, les matériaux employés pour le collecteur de courant, le matériau actif et le liant diffèrent.

L'électrode positive d'une cellule de batterie Li-ion utilise généralement un collecteur de courant en aluminium et un liant polymère en fluorure de polyvinylidène (c.à.d., PVDF pour polyvinylidène fluoride). Le PVDF est un plastique fluoré communément utilisé pour des applications nécessitant une bonne résistance à des milieux chimiques agressifs.

L'électrode négative d'une cellule de batterie Li-ion utilise généralement un collecteur de courant en cuivre. Le liant polymère peut-être à base de PVDF ou de carboxyméthylcellulose de Sodium.

Le séparateur utilisé dans les batteries Li-ion joue à la fois le rôle d'isolant électrique (évitant l'apparition d'un court-circuit entre l'électrode positive et l'électrode négative) et de support pour l'électrolyte liquide organique. Le séparateur d'une cellule Li-ion est constituée d'une bande polymère nanoporeuse de quelques dizaines de micromètres d'épaisseur. Selon le type de séparateur, ce dernier peut par exemple être monocouche, en polypropylène, ou tricouche (deux couches de polypropylènes séparées par une couche de polyéthylène). Certains séparateurs sont également recouverts d'une fine couche céramique (e.g. alumine Al_2O_3 , ou dioxyde de zirconium ZrO_2).

Enfin, une batterie Li-ion utilise un électrolyte organique composé d'un mélange de carbonates linéaires (par ex., carbonate de diméthyle, carbonate de diéthyle, ethylmethyl carbonate, ...), de carbonates cycliques (par ex., carbonate d'éthyle) et d'un sel de lithium dissout dans ce solvant (par ex., hexafluorophosphate de lithium $LiPF_6$, bis(trifluorométhane)sulfonimide de Lithium LiTFSI, ...) dont les proportions exactes dépendent du constructeur et du type de cellule. Il est à noter que l'utilisation de LiTFSI dans une batterie Li-ion implique la présence d'une quantité minimale de $LiPF_6$ (nécessaire pour protéger le collecteur de courant en aluminium contre la corrosion à haut potentiel).

Divers types de batteries Li-ion sont disponibles, chacune avec ses avantages et inconvénients spécifiques. Parmi les types couramment utilisés, on retrouve différentes chimies à la cathode comme les technologies LFP (Lithium Fer Phosphate), NMC (Nickel Manganèse Cobalt), LCO ou $LiCoO_2$ (Lithium Cobalt Oxyde), LMO (Lithium Manganèse Oxyde), LTO (Lithium Titanate Oxyde), NCA (Nickel Cobalt Aluminium) et d'autres encore. Le choix du type de batterie dépend de l'application, des performances requises et du coût de la technologie.

2.1.2 Potentiels de dangers des batteries Li-ion

Comparativement aux batteries plomb-acides, et à d'autre énergie stockée équivalente, les effets constatés à la suite d'une défaillance sont généralement de plus forte intensité dans le cas des batteries à ions lithium. Cette différence dans la virulence des effets provient notamment de trois facteurs principaux :

- Les densité d'énergie et énergie spécifique plus importantes associées à cette technologie,
- Une forte instabilité chimique des composants de la cellule vis-à-vis de l'air ambiant,
- Une faible plage de stabilité (thermique, chimique et électrochimique) des constituants internes de la cellule entre eux.

Au moment de l'assemblage des différents constituants d'une cellule Li-ion (électrodes positives et négative, et électrolyte supporté), ces derniers sont électro chimiquement instables entre eux. En particulier, l'utilisation réversible (charge et décharge) d'une batterie Li-ion est principalement permise par la formation d'une couche de protection à l'interface entre le matériau actif de l'électrode négative et l'électrolyte durant la première charge de la cellule. Cette couche de protection (ou couche de passivation) est appelée « Solid Electrolyte Interphase (SEI) ». Elle provient de la dégradation du solvant de l'électrolyte lorsque le graphite (matériau d'électrode négative) passe au-dessous d'une certaine valeur de potentiel durant les 5 à 10 premières charges de la cellule (étape de « formation »,

réalisée avant commercialisation). Lors des cycles de charge/décharge suivants, la SEI joue un rôle protecteur en stabilisant l'interface électrode négative/électrolyte et en empêchant une dégradation supplémentaire des solvants au fil des cycles. De la même manière, lorsque le matériau d'électrode positive (e.g. NMC) dépasse une certaine valeur de potentiel, l'interface entre ce matériau et l'électrolyte devient instable et donne lieu à l'oxydation des solvants d'électrolyte. Aucune couche de protection ne se crée à cette interface et la réaction d'oxydation se produit tant que le potentiel du matériau d'électrode positive est conservé en dehors de la fenêtre de stabilité électrochimique des solvants de l'électrolyte (~4.3-4.5 V par rapport au Li pour les électrolytes à base de carbonates et LiPF₆ typiques). Comme décrit dans la suite de cette sous-section, ces phénomènes jouent un rôle clé dans la réponse d'une cellule Li-ion soumise à des conditions abusives de fonctionnement ou de stockage. Une condition abusive d'utilisation de batterie se réfère à toute utilisation ou manipulation de la batterie qui excède ses limites de sécurité ou de performance spécifiées par le fabricant, provoquant une dégradation prématurée, des risques de surchauffe, d'incendie, ou d'explosion.

Une batterie Li-ion est susceptible de réagir différemment en fonction des conditions d'abus auxquelles elle est soumise.

- **Surchauffe** : La plupart des fabricants de batteries Li-ion de chimie NMC/Gr spécifient une plage de fonctionnement optimale entre 0°C et 60°C. Ces limites sont fixées du fait des mauvaises performances de ces batteries aux basses températures et de la dégradation rapide des cellules exposées à des températures supérieures à 60°C (en particulier de l'électrolyte). En cas d'emballement thermique, des projections d'électrolyte à haute température peuvent également se produire, exposant les personnes à proximité à un risque toxique important et les équipements environnants à de possibles phénomènes de corrosion.
- **Surcharge** : La surcharge d'une cellule correspond à la situation dans laquelle une cellule Li-ion est chargée à une tension supérieure à la limite supérieure de la plage de tension qu'elle est capable d'accepter.
- **Surdécharge** : La surdécharge d'une cellule correspond à la situation dans laquelle une cellule Li-ion est déchargée à une tension inférieure à la limite inférieure de la plage de tension qu'elle est capable d'accepter.
- **Sur-refroidissement** : Les cellules Li-ion présentent de mauvaises performances à basse température, en charge comme en décharge. En outre, la recharge d'une cellule à une température inférieure à 0°C présente un risque important de dépôt métallique de Li à la surface du graphite.
- **Court-circuit** : Un court-circuit peut être dit « interne » si un contact électrique est établi entre deux électrodes de polarités opposées à l'intérieur de la batterie, ou externe si les bornes positif et négatif de la batterie sont reliés entre eux par un conducteur électrique à l'extérieur de celle-ci. Lorsqu'une batterie est placée en court-circuit, l'énergie stockée électrochimiquement est déchargée rapidement, générant un fort courant au travers du conducteur électrique à l'origine du court-circuit. Ce courant intense tend à faire chauffer les composants de la batterie, et ceux du circuit électrique ainsi formé.

Cette chaleur peut mener à la détérioration des éléments de la batterie et potentiellement (en fonction de la conception de la batterie et de l'énergie stockée au moment du dysfonctionnement) à des phénomènes d'explosion dus à l'évaporation de l'électrolyte organique et à la génération d'hydrogène et de produits de combustion gazeux (par ex., hydrocarbures) créant ainsi une surpression importante au sein de la batterie. Dans le cas d'échauffement trop important, la cellule peut surchauffer au point de déclencher son emballement thermique, comme décrit plus haut (point « surchauffe » ci-dessus).

- **Risque mécanique** : Le contenant endommagé d'une batterie Li-ion peut conduire à des fuites d'électrolyte corrosif, et toxique. Comme expliqué plus haut, cet électrolyte représente un

danger immédiat en cas de contact cutané ou avec des muqueuses. Il peut également mener à plus long terme à la corrosion de pièces métalliques. En plus de dommages sur le boîtier, un choc mécanique pourrait également entraîner un court-circuit persistant susceptible de provoquer des effets tels que ceux décrits ci-dessus. Enfin, la perte d'étanchéité d'une batterie lithium-ion entraînera une chute rapide de ses performances et de sa sécurité.

La 2 ci-dessous synthétise un exemple de la plage de fonctionnement acceptable d'une cellule Li-ion (rectangle vert), conditionnée par le profil de risques associé, détaillé ci-dessus. Dans cette figure, les régions représentées en rouge symbolisent les conditions d'utilisation abusives pour une batterie Li-ion. Les étiquettes associées à ces différentes régions indiquent les risques qui leur sont spécifiques.

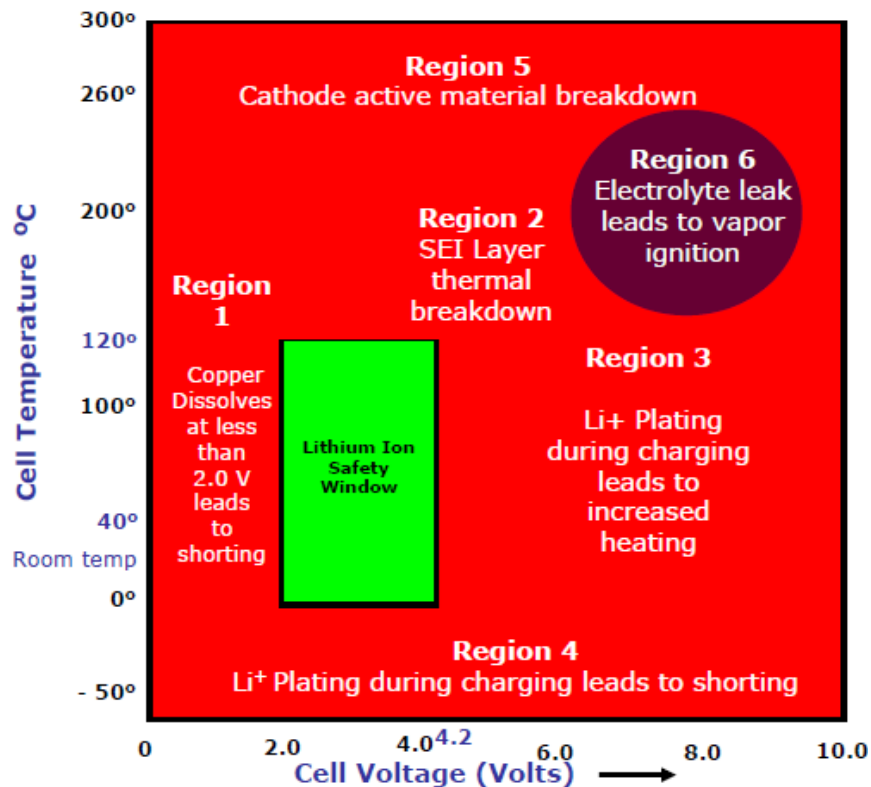


Figure 2. Fenêtre de stabilité en sécurité d'une batterie Li-ion¹

De manière générale, on peut distinguer quatre catégories de risques principales associés à l'utilisation des batteries :

- Les risques électriques (choc électrique...);
- Les risques chimiques et toxiques (fuite d'électrolyte...);
- Les risques thermiques (emballement thermique, fumées toxiques, feu, propagation...);
- Les risques d'explosion (projections solides/liquides, variations de pression...).

¹ Nano-based lithium-ion batteries for electric vehicles, V. Evan House (http://www.sze.hu/~horvathg/battery/kapcsol%F3d%F3%20anyagok/1_casestudy3_house.pdf)

2.1.3 Avantages et inconvénients

2.1.3.1 Avantages des batteries Li-ion

Les batteries Li-ion sont largement utilisées dans une grande variété d'appareils, allant des smartphones aux véhicules électriques, en passant par les ordinateurs portables.

Voici les principaux avantages de cette technologie :

- ❖ **Haute densité énergétique** : Les batteries Li-ion ont une densité énergétique élevée, ce qui signifie qu'elles peuvent stocker une grande quantité d'énergie dans un format compact et léger. Cela en fait une solution idéale pour les appareils électroniques portables et les véhicules électriques qui nécessitent des batteries légères et puissantes.
- ❖ **Longue durée de vie** : Les batteries Li-ion ont un cycle de vie plus long par rapport à d'autres types de batteries rechargeables, comme les batteries au nickel-cadmium (NiCd) ou nickel-métal-hydrure (NiMH). Elles peuvent souvent supporter plusieurs centaines de cycles de charge-décharge avant de voir une diminution significative de leur capacité.
- ❖ **Faible autodécharge** : Contrairement aux autres types de batteries, les Li-ion se déchargent beaucoup moins rapidement lorsqu'elles ne sont pas utilisées. Cette faible autodécharge est particulièrement bénéfique pour les appareils qui sont utilisés de manière intermittente, comme les smartphones ou les tablettes.
- ❖ **Pas d'effet mémoire** : Les batteries Li-ion ne souffrent pas de l'« effet mémoire », un phénomène qui réduit la capacité de la batterie lorsque celle-ci est rechargée avant d'être complètement déchargée. Cela permet aux utilisateurs de recharger leurs appareils à n'importe quel moment sans craindre d'altérer les performances de la batterie.
- ❖ **Stabilité chimique** : Les batteries au lithium-ion sont relativement stables et sûres si elles sont utilisées correctement. Elles intègrent souvent des systèmes de gestion de la batterie (Battery Management System - BMS) pour prévenir les surcharges, les décharges excessives ou la surchauffe, garantissant ainsi un fonctionnement sécurisé.
- ❖ **Large gamme d'applications** : Grâce à leurs caractéristiques techniques, les batteries Li-ion sont utilisées dans une multitude de secteurs, allant de l'électronique grand public aux systèmes de stockage d'énergie renouvelable et à l'industrie automobile. Leur adaptabilité les rend extrêmement polyvalentes.
- ❖ **Impact environnemental plus faible** : Bien que la fabrication de batteries Li-ion nécessite des métaux rares, elles sont souvent considérées comme plus écologiques que d'autres technologies de batteries, notamment en raison de leur efficacité énergétique et de leur durée de vie plus longue. Elles sont également recyclables, ce qui permet de récupérer une partie des matériaux utilisés.
- ❖ **Légèreté** : Comparées aux autres types de batteries, les batteries Li-ion sont beaucoup plus légères, ce qui est un atout majeur pour les appareils portables et les véhicules où chaque kilogramme de moins compte pour la performance et l'autonomie.

Les batteries au lithium-ion sont devenues une technologie incontournable en raison de leur performance énergétique, de leur durabilité et de leur impact environnemental modéré. Leur utilisation croissante dans divers secteurs témoigne de leurs nombreux avantages, que ce soit pour l'électronique portable, les véhicules électriques ou encore le stockage d'énergie.

2.1.3.2 Inconvénients des batteries Li-ion

Malgré leurs nombreux avantages, les batteries au lithium-ion (Li-ion) présentent également certaines limitations et inconvénients qui peuvent poser des défis dans certaines applications.

Voici les principaux inconvénients liés à cette technologie :

- ❖ **Coût élevé** : La fabrication des batteries Li-ion est coûteuse par rapport à d'autres types de batteries, telles que les batteries au plomb-acide ou au nickel-métal-hydrure (NiMH). Cela est principalement dû à l'utilisation de matériaux rares et chers comme le lithium, le cobalt ou le nickel, ce qui augmente le coût global des produits utilisant ces batteries.

- ❖ **Sensibilité aux températures extrêmes** : Les batteries Li-ion sont sensibles aux températures élevées et basses. Une utilisation ou une exposition prolongée à des températures extrêmes peut réduire considérablement leur durée de vie, voire provoquer des défaillances. À des températures élevées, elles peuvent surchauffer, augmentant le risque d'incendie ou d'explosion, tandis que les basses températures diminuent temporairement leurs performances.
- ❖ **Risque d'incendie et d'explosion** : Bien que relativement stables, les batteries Li-ion peuvent devenir dangereuses en cas de surcharge, de court-circuit ou de dommages physiques. Cela peut entraîner une surchauffe, un emballement thermique et, dans certains cas, provoquer un incendie ou une explosion. Pour cette raison, elles nécessitent des systèmes de gestion (BMS) sophistiqués pour éviter ces risques.
- ❖ **Durée de vie limitée** : Bien que les batteries Li-ion aient une durée de vie plus longue que certaines autres technologies de batteries, elles se dégradent avec le temps et l'utilisation. Le nombre de cycles de charge-décharge est limité, et chaque cycle diminue légèrement la capacité de la batterie. Après quelques années d'utilisation régulière, la batterie perdra inévitablement en efficacité.
- ❖ **Dépendance à des ressources limitées** : Les batteries Li-ion nécessitent des métaux rares tels que le lithium, le cobalt, et le nickel, dont les réserves sont limitées. L'extraction de ces métaux pose des défis écologiques et éthiques, notamment en ce qui concerne les conditions de travail dans certaines régions productrices de cobalt.
- ❖ **Problèmes liés au recyclage** : Le recyclage des batteries Li-ion est complexe et coûteux. Les procédés actuels de recyclage ne permettent pas toujours de récupérer tous les matériaux de manière efficace, ce qui pose des défis environnementaux. De plus, la demande croissante en batteries Li-ion génère une pression supplémentaire sur l'extraction des ressources naturelles, telles que le cobalt et le lithium, exacerbant les problèmes environnementaux et sociaux dans les régions minières.
- ❖ **Temps de recharge** : Bien que les batteries Li-ion offrent une recharge rapide comparée à certaines autres technologies, le temps de recharge peut encore être considéré comme un inconvénient pour certaines applications, notamment les véhicules électriques. Il existe des limites physiques à la vitesse à laquelle une batterie Li-ion peut être rechargée en toute sécurité sans provoquer une surchauffe ou une dégradation prématurée.
- ❖ **Dégradation chimique** : Au fil du temps, les batteries Li-ion subissent une dégradation chimique naturelle, même si elles ne sont pas utilisées. Cette autodégradation entraîne une perte de capacité au fil des ans, ce qui affecte les performances globales de la batterie, surtout si elle est stockée longtemps ou utilisée de manière irrégulière.
- ❖ **Limites de capacité** : Bien que les batteries Li-ion offrent une bonne densité énergétique, elles ont encore des limites en termes de capacité de stockage d'énergie. Par exemple, dans les véhicules électriques, l'autonomie reste un enjeu, car les batteries actuelles ne permettent pas encore d'offrir des autonomies comparables à celles des moteurs à combustion interne, surtout pour les trajets longue distance.

Bien que les batteries Li-ion dominent le marché en raison de leur densité énergétique élevée et de leur polyvalence, elles présentent des inconvénients non négligeables, tels que des coûts élevés, des risques liés à la sécurité, et des problèmes de recyclage. Ces limitations soulignent la nécessité d'innovation dans la conception des batteries pour améliorer leur durabilité, leur sécurité et leur impact environnemental.

2.2 Hydrogène : présentation et caractéristiques, avantages et inconvénients, utilisations possibles, potentiels de dangers.

2.2.1 Présentation et caractéristiques de l'hydrogène

L'hydrogène est l'atome le plus simple qui existe : il s'agit d'un noyau constitué d'un proton, et d'un électron périphérique. C'est donc aussi l'atome le plus léger. Il est très abondant sur terre, sous forme atomique (eau, hydrocarbures, ...) et quasi inexistant à l'état naturel sous forme moléculaire (H₂ ou dihydrogène).

Il est incolore, sans odeur et sans saveur.

PROPRIETES	VALEURS
Nom	Hydrogène
Formule chimique	H ₂
N° CAS	1333-74-0
Etat physique	Incolore et inodore Gaz comprimé ou liquéfié
Poids Moléculaire	2,016 g/mol
Densité (air=1)	0,07
Masse volumique du gaz	0,08342 kg/Nm ³ (20°C/ 1 atm)
Solubilité dans l'eau	0,019 (vol/vol à 15,6°C)

Tableau 1 : Caractéristiques physico-chimique de l'hydrogène

L'hydrogène est un gaz léger qui :

- a la qualité d'être beaucoup plus léger que l'air et donc de diffuser rapidement, ce qui est un élément très favorable à la sécurité lors de son utilisation en espace non confiné ;
- du fait de sa faible densité à température et pression normales, devient un inconvénient pour son transport dans la mesure où elle impose soit une mise en pression, soit une liquéfaction ou l'absorption dans des hydrures, les trois techniques pénalisant la dépense énergétique qui accompagne son utilisation.

2.2.2 Potentiels de dangers de l'hydrogène

L'hydrogène est un gaz sans toxicité propre. Toutefois, il peut causer l'asphyxie à concentration élevée du fait de la substitution de l'oxygène de l'air.

L'hydrogène est un gaz extrêmement inflammable qui peut brûler dans l'air à conditions normales de pression et de température.

PROPRIETES	VALEURS
Plage d'inflammabilité (% vol)	4,0 à 75 (dans l'air à TPN) 4,1 à 94 (dans l'oxygène à TPN)
Energie minimale d'inflammation	17 μ J dans l'air 1,2 μ J dans l'oxygène
Température d'auto-inflammation	585°C/ 858°K
Vitesse fondamentale de combustion laminaire dans l'air à TPN	2,65 à 3,25 m/s
Température de flamme dans l'air	2045°C
Energie théorique d'explosion	2,02 kg TNT/m ³ gaz

Tableau 2 : Caractéristiques d'inflammabilité de l'hydrogène

Plusieurs caractéristiques spécifiques de l'hydrogène sont :

Très faible énergie d'inflammation

L'énergie d'inflammation de l'hydrogène dans l'air est de 17 μ J (dans les proportions stœchiométriques), soit plus de 10 fois inférieure à celle du propane (260 μ J) ou du gaz naturel (290 μ J), et son domaine inflammable est très étendu (de 4 % à 75 % en volume). La probabilité d'inflammation de l'hydrogène dans l'air est donc très grande, même si des précautions sont prises pour éviter toute flamme ou étincelle à proximité de la zone à risque.

Plage d'explosivité

La limite inférieure d'explosivité à TPN se situe à 4 vol % d'hydrogène dans l'air.

Il faut noter que l'étendue de la plage d'explosivité est fonction de la température et de la pression. A pression constante, elle croît avec la température.

Pour rappel, la limite supérieure d'explosivité est 75 % d'hydrogène dans l'air.

Caractéristiques spécifiques de la flamme d'hydrogène

La flamme d'hydrogène est très peu éclairante car le rayonnement de l'hydrogène chauffé se situe essentiellement dans le domaine ultra-violet. Le rayonnement le plus visible (de couleur orangée) se situe généralement au niveau de la vapeur d'eau résultant de la combustion. Le cœur de la flamme très chaud (supérieur à 2000°C) est pratiquement invisible en plein le jour, (cependant la flamme est bien visible dans l'obscurité). Cette caractéristique constitue un danger supplémentaire en particulier pour les équipes d'intervention en cas d'incendie. Cependant, la flamme d'hydrogène rayonne peu, ce qui limite les effets du rayonnement thermique.



Figure 3 : Jet enflammé d'hydrogène sous pression en laboratoire à l'Ineris

L'hydrogène est un réducteur très puissant qui a une grande affinité pour l'oxygène et tous les oxydants. Il est non corrosif.

Plusieurs caractéristiques spécifiques de l'hydrogène sont de nature à augmenter le risque².

Facilité à fuir

La petite taille de la molécule d'hydrogène et la faible viscosité de ce gaz lui permettent de circuler à travers des ouvertures de taille extrêmement faible. Le risque de fuite est donc plus élevé avec l'hydrogène qu'avec la plupart des autres gaz. De ce point de vue l'hydrogène n'est comparable qu'à l'hélium, gaz non inflammable, qui est d'ailleurs souvent utilisé pour tester sans risque l'étanchéité des installations destinées à contenir de l'hydrogène. Il faut s'attendre à ce que le débit volumique de fuite soit plus important que celui de combustibles traditionnels, toutes choses égales par ailleurs (débit de fuite environ trois fois supérieur à celui du propane par exemple).

Perméation à travers les matériaux

Dans certains cas, la petite taille de la molécule d'hydrogène lui permet également de traverser certains matériaux par perméation. C'est le cas en particulier d'un certain nombre de matériaux polymères. Le moteur de cette diffusion est la différence de concentration ou de pression partielle de l'hydrogène entre les parois du matériau.

Fragilisation de certains matériaux métalliques

Pour l'hydrogène, des problèmes de compatibilité se posent avec les matériaux : on parle de fragilisation. Il s'agit de la propension des atomes d'hydrogène à pénétrer dans certains alliages métalliques, endommageant la structure cristalline, rendant le matériau fragile et accélérant la propagation des microfissures notamment sous contrainte. Ce phénomène peut aller jusqu'à provoquer des ruptures brutales du matériau bien en dessous de sa limite de rupture en l'absence d'hydrogène. Les alliages d'aluminium sont en général assez peu sensibles à la fragilisation de même que les aciers inoxydables du type 316L.

2.2.3 Avantages et inconvénients

2.2.3.1 Avantages de l'utilisation d'hydrogène comme carburant

L'hydrogène est de plus en plus envisagé comme une alternative prometteuse aux carburants fossiles traditionnels, notamment dans les secteurs des transports, de l'industrie, et de la production d'électricité. Voici les principaux avantages de l'utilisation de l'hydrogène en tant que carburant :

- ❖ **Zéro émission directe de gaz à effet de serre** : Lorsque l'hydrogène est utilisé comme carburant, que ce soit dans des piles à combustible ou pour la combustion directe, la seule émission produite est de la vapeur d'eau. Contrairement aux combustibles fossiles, il n'émet pas de dioxyde de carbone (CO₂) ou d'autres gaz à effet de serre, ce qui en fait un choix judicieux dans la lutte contre le changement climatique.
- ❖ **Énergie renouvelable et abondante** : L'hydrogène est l'élément le plus abondant dans l'univers. Il peut être produit à partir de nombreuses sources, y compris l'eau, par un processus d'électrolyse utilisant des énergies renouvelables (solaire, éolienne, hydraulique).
- ❖ **Stockage d'énergie efficace** : L'hydrogène permet de stocker l'énergie produite à partir de sources renouvelables. Par exemple, lorsque les énergies éolienne ou solaire produisent plus d'électricité que nécessaire, cette électricité peut être utilisée pour produire de l'hydrogène par électrolyse, qui peut ensuite être stocké et utilisé ultérieurement, ce qui peut contribuer à résoudre le problème de l'intermittence des énergies renouvelables.
- ❖ **Grande densité énergétique** : L'hydrogène possède une densité énergétique massique élevée, supérieure à celle des combustibles fossiles. Un kilogramme d'hydrogène contient environ trois fois plus d'énergie que le même poids de diesel ou d'essence. Cela permet d'envisager des applications à grande échelle, notamment dans les transports longue distance (camions, navires, avions) où la légèreté du carburant est un atout.
- ❖ **Autonomie accrue dans les véhicules** : Les véhicules fonctionnant à l'hydrogène, notamment ceux utilisant des piles à combustible, ont souvent une autonomie plus longue que les véhicules électriques à batterie. De plus, le ravitaillement en hydrogène est beaucoup plus rapide que la

² AFHYPAC, Mémento de l'hydrogène fiche 7.2 - Sécurité : transport, stockage et utilisation

recharge des batteries, ce qui en fait une solution pratique pour les transports de marchandises, les bus ou encore les véhicules utilitaires.

- ❖ **Diversité des modes de production :** L'hydrogène peut être produit à partir de diverses sources d'énergie, y compris les énergies renouvelables (électrolyse de l'eau), les combustibles fossiles (vaporeformage du gaz naturel), ou encore la biomasse. Cela offre une flexibilité dans son approvisionnement, réduisant la dépendance aux ressources spécifiques et permettant à différents pays de produire leur propre hydrogène selon leurs ressources disponibles.
- ❖ **Réduction de la pollution atmosphérique :** Contrairement aux carburants fossiles, la combustion de l'hydrogène ne produit pas de particules fines, d'oxydes d'azote (NOx) ou de dioxyde de soufre (SO₂), qui sont responsables de la pollution atmosphérique et des problèmes de santé publique. Son utilisation permet donc de réduire la pollution de l'air, notamment dans les zones urbaines densément peuplées.
- ❖ **Applications dans plusieurs secteurs :** L'hydrogène est extrêmement polyvalent et peut être utilisé non seulement dans les transports (voitures, camions, trains, avions), mais aussi dans l'industrie pour des processus tels que la production d'acier, le raffinage de pétrole, ou la production d'ammoniac. Il peut également être utilisé dans la production d'électricité via des piles à combustible pour alimenter des bâtiments ou des réseaux électriques isolés.
- ❖ **Sécurité d'approvisionnement énergétique :** L'hydrogène peut être produit localement, ce qui réduit la dépendance aux importations de pétrole ou de gaz naturel. Pour de nombreux pays, développer une infrastructure de production et de distribution d'hydrogène pourrait contribuer à renforcer leur sécurité énergétique et à réduire leur vulnérabilité face aux fluctuations des marchés mondiaux des combustibles fossiles.

L'hydrogène en tant que carburant offre de nombreux avantages, notamment en termes d'écologie, de stockage d'énergie, et de polyvalence. En tant que solution zéro émission, il représente un atout essentiel pour la transition énergétique et la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Toutefois, pour maximiser ces bénéfices, des efforts supplémentaires sont nécessaires pour rendre sa production plus accessible, moins coûteuse et plus durable, en particulier via l'utilisation d'énergies renouvelables.

2.2.3.2 Inconvénients de l'utilisation d'hydrogène comme carburant

Bien que l'hydrogène soit souvent présenté comme une solution prometteuse pour la transition énergétique, son utilisation en tant que carburant présente également plusieurs inconvénients. Ces défis technologiques, économiques et logistiques doivent être pris en compte avant de généraliser son adoption. Voici les principaux inconvénients de l'utilisation de l'hydrogène comme carburant :

- ❖ **Production coûteuse et énergivore :** La production d'hydrogène pur, notamment par électrolyse de l'eau, nécessite une grande quantité d'énergie. Si cette énergie provient de sources fossiles, l'avantage écologique de l'hydrogène est fortement diminué. La production d'hydrogène à partir d'énergies renouvelables reste encore coûteuse par rapport à d'autres sources d'énergie, rendant l'hydrogène ainsi produit moins compétitif sur le plan économique.
- ❖ **Efficacité énergétique faible :** L'une des principales critiques de l'hydrogène est son faible rendement global. Lorsque l'électricité est utilisée pour produire de l'hydrogène par électrolyse, puis reconvertie en électricité via une pile à combustible, une grande partie de l'énergie est perdue à chaque étape. Ce processus est souvent moins efficace que le stockage direct de l'électricité dans des batteries.
- ❖ **Infrastructure insuffisante :** L'infrastructure nécessaire pour produire, transporter et distribuer l'hydrogène est encore très limitée dans la plupart des pays. Les stations de ravitaillement en hydrogène sont peu nombreuses, ce qui limite l'adoption des véhicules à hydrogène. La mise en place d'un réseau d'infrastructures adéquat représente un coût élevé et prend du temps, ce qui ralentit la transition vers une économie basée sur l'hydrogène.
- ❖ **Stockage et transport complexes :** L'hydrogène est une molécule très légère et doit être stocké sous forme gazeuse à haute pression (souvent à 700 bars) ou sous forme liquide à des températures extrêmement basses (-253°C). Cela complique le stockage et le transport de l'hydrogène, nécessitant des réservoirs spécialisés et coûteux. De plus, la liquéfaction de l'hydrogène est un processus énergivore, ce qui réduit encore son efficacité globale.

- ❖ **Risque de sécurité** : L'hydrogène est hautement inflammable et présente un risque accru d'explosion lorsqu'il est manipulé ou stocké de manière incorrecte. Sa petite taille moléculaire le rend difficile à contenir, augmentant le risque de fuites. Bien que les technologies actuelles aient progressé en matière de sécurité, la manipulation de l'hydrogène à grande échelle nécessite une vigilance accrue et des normes de sécurité rigoureuses. Les risques sont liés à la présence dans le véhicule mais également pendant les phases de transport et de chargement.
- ❖ **Dépendance aux énergies fossiles pour la production actuelle** : Actuellement, la majorité de l'hydrogène produit dans le monde provient du vaporeformage du gaz naturel, un processus qui émet du dioxyde de carbone (CO₂). Cela signifie que l'hydrogène, tel qu'il est produit aujourd'hui, contribue encore à l'alourdissement de l'empreinte carbone. La production dite "d'hydrogène vert", qui utilise uniquement des énergies renouvelables, reste marginale en raison de son coût élevé.
- ❖ **Coût des technologies de conversion** : Les piles à combustible utilisées pour convertir l'hydrogène en électricité dans les véhicules ou les applications stationnaires sont encore très coûteuses. Bien que les coûts aient diminué ces dernières années, ces technologies restent moins accessibles que d'autres solutions énergétiques comme les batteries électriques.
- ❖ **Durée de vie limitée des réservoirs à hydrogène** : Les réservoirs utilisés pour stocker l'hydrogène sous haute pression ont une durée de vie limitée, en raison de la fatigue des matériaux. Cela impose un remplacement périodique, ce qui représente un coût supplémentaire pour les utilisateurs de technologies à hydrogène. De plus, l'usure des matériaux sous haute pression ou basse température pose des défis techniques.
- ❖ **Compétition avec d'autres solutions alternatives** : L'hydrogène est en concurrence avec d'autres solutions de transition énergétique, comme les batteries électriques ou les biocarburants. Dans de nombreux cas, ces alternatives peuvent offrir des avantages en termes de coûts, d'efficacité énergétique et d'infrastructure déjà existante. Par exemple, pour les voitures particulières, les véhicules électriques à batterie (VEB) ont une longueur d'avance en termes de maturité technologique et de réseau de recharge.

L'hydrogène, bien qu'il présente un potentiel indéniable en tant que carburant propre, est confronté à plusieurs défis techniques, économiques et environnementaux. Les coûts élevés de production, la faible efficacité énergétique et les problèmes d'infrastructure sont autant d'obstacles qui ralentissent son adoption à grande échelle. Pour que l'hydrogène devienne une solution viable à long terme, des innovations technologiques et des investissements majeurs seront nécessaires pour surmonter ces inconvénients.

2.3 Comparaison de la maturité des deux sources d'énergies

2.3.1 Maturité de l'hydrogène comme source d'énergie

L'utilisation de l'hydrogène comme source d'énergie est encore considérée comme une technologie en phase de développement, bien que des progrès significatifs aient été réalisés ces dernières années. La maturité de l'hydrogène pour cette utilisation varie selon les secteurs d'application, mais il reste plusieurs défis à surmonter avant une adoption à grande échelle.

Voici un aperçu de l'état de maturité de l'hydrogène comme source d'énergie³ :

- **Transport**

- Véhicules à hydrogène (voitures, bus, camions) : Les véhicules à hydrogène utilisant des piles à combustible (FCEV - Fuel Cell Electric Vehicles) existent déjà sur le marché, comme les modèles de Toyota (Mirai) et Hyundai (Nexo). Cependant, leur adoption est encore limitée en raison des coûts élevés des véhicules, du manque d'infrastructures de ravitaillement en hydrogène et de la concurrence des véhicules électriques à batterie (VEB).

³ La rédaction de ce paragraphe a été réalisée à l'aide des informations trouvées sur les sites suivants : Agence Internationale de l'Énergie (AIE), Hydrogen Council, BloombergNEF (BNEF), Centre commun de recherche de la Commission européenne (JRC). Ainsi que des revues comme Nature Energy, Journal of Power Sources, et International Journal of Hydrogen Energy.

Les bus et camions à hydrogène sont testés dans certaines régions, avec des projets pilotes dans plusieurs villes. Cependant, l'infrastructure pour les flottes commerciales reste limitée.

- Transports lourds (camions, trains, avions, navires) : L'utilisation de l'hydrogène pour les transports lourds est souvent perçue comme plus prometteuse que pour les véhicules légers, en raison des avantages en termes de densité énergétique et d'autonomie. Dans ce secteur, les technologies sont encore en phase de démonstration ou de projet pilote, notamment pour les trains à hydrogène (comme ceux d'Alstom) et les camions longue distance. Pour les navires et avions, les projets d'hydrogène en sont au stade de la recherche et du développement, mais l'adoption à grande échelle n'est pas encore proche.

- **Industrie**

- L'hydrogène est déjà utilisé dans l'industrie depuis des décennies, notamment dans la production d'ammoniac et le raffinage de pétrole. Cependant, la transition vers de l'hydrogène "vert" (produit par électrolyse avec des énergies renouvelables) en remplacement de l'hydrogène "gris" (produit à partir de gaz naturel) est encore très limitée. Les coûts de production du « vert » restent élevés et les infrastructures doivent encore être développées.
- De plus, des initiatives sont en cours pour décarboner des industries énergivores comme la production d'acier ou de ciment, en remplaçant les combustibles fossiles par de l'hydrogène. Ces projets sont cependant en phase de test et nécessiteront encore plusieurs années avant de pouvoir être mis en œuvre à grande échelle.

- **Production d'électricité et stockage d'énergie**

- L'utilisation de l'hydrogène pour produire de l'électricité via des piles à combustible est également en cours de développement, mais reste pour le moment limitée à des projets pilotes ou des applications spécifiques, comme l'alimentation de sites isolés ou de véhicules.
- En revanche, l'hydrogène est perçu comme une solution prometteuse pour le stockage d'énergie, en permettant de stocker l'électricité excédentaire produite par des sources renouvelables. Les systèmes de stockage à grande échelle sont cependant encore au stade de démonstration, avec des coûts élevés et des problèmes d'efficacité à résoudre.

- **Infrastructure**

- Le développement d'une infrastructure de ravitaillement en hydrogène est l'un des principaux obstacles à l'adoption à grande échelle. Actuellement, il existe très peu de stations de ravitaillement à hydrogène dans le monde, bien que certains pays, comme le Japon, l'Allemagne, et la Californie, aient pris de l'avance dans ce domaine. Le coût de mise en place de cette infrastructure est élevé, ce qui freine son expansion rapide.
- En parallèle, des investissements massifs sont nécessaires pour construire des capacités de production d'hydrogène "vert", via l'électrolyse, et les technologies de distribution (pipelines, transport sous haute pression, etc.).

- **Réglementation et politiques**

- Plusieurs pays ont lancé des **stratégies nationales de l'hydrogène** et offrent des subventions pour stimuler la recherche, le développement et l'adoption de cette technologie. L'Union européenne, la Corée du Sud, le Japon, et des États comme la Californie ont déjà pris des mesures dans ce sens. Ces initiatives sont essentielles pour accélérer l'adoption et le déploiement à grande échelle.
- Toutefois, il existe encore des défis réglementaires concernant la sécurité de l'utilisation de l'hydrogène, notamment pour son transport et son stockage, ainsi que pour l'intégration de cette technologie dans les systèmes énergétiques existants.

L'hydrogène comme carburant en est encore à un stade intermédiaire de maturité. Certaines applications (véhicules légers, bus, camions, industrie) ont franchi les premières étapes avec des projets pilotes et des démonstrations, mais de nombreux défis restent à relever pour passer à l'échelle industrielle et commerciale. Le coût élevé de la production, le manque d'infrastructure et l'efficacité énergétique faible constituent encore des obstacles majeurs. Toutefois, avec l'augmentation des

investissements publics et privés, l'hydrogène pourrait jouer un rôle important dans la transition énergétique à moyen et long termes.

2.3.2 Maturité des batteries Li-ion comme source d'énergie

L'utilisation des batteries lithium-ion (Li-ion) pour alimenter des véhicules électriques et des dispositifs électroniques est déjà à un stade assez avancé en maturité, surtout par rapport à d'autres technologies comme l'hydrogène. Elles dominent aujourd'hui les marchés des véhicules électriques, des appareils électroniques portables et des systèmes de stockage d'énergie. Voici un aperçu de la maturité de l'utilisation des batteries Li-ion dans divers secteurs⁴ :

- **Véhicules électriques (VEB)**

- **Voitures électriques** : Les batteries Li-ion sont largement adoptées dans les véhicules électriques ou encore dans les véhicules hybrides. Elles sont considérées comme la norme en raison de leur haute densité énergétique, de leur durée de vie relativement longue et de leurs capacités de recharge rapide. L'infrastructure de recharge pour les véhicules électriques est également bien développée dans de nombreux pays, avec des réseaux de stations de recharge en expansion. Le marché des véhicules électriques Li-ion connaît une croissance rapide et est largement prêt pour une adoption massive.
- **Camions et bus électriques** : Des progrès importants ont été réalisés pour les camions et bus électriques utilisant des batteries Li-ion. Des entreprises comme BYD et Proterra produisent des bus électriques en masse, et les camions électriques commencent à entrer sur le marché, bien que l'autonomie et la recharge rapide soient encore des défis pour les longs trajets. Pour ces véhicules plus lourds, des alternatives telles que l'hydrogène commencent également à être testées, mais les batteries Li-ion sont déjà largement utilisées dans les transports urbains et de courte distance.
- **Deux-roues et scooters électriques** : Le marché des scooters et des vélos électriques est également en pleine expansion grâce aux batteries Li-ion. Ces véhicules sont particulièrement populaires en Asie, mais leur adoption augmente rapidement dans les pays occidentaux. Le rapport coût-efficacité et la densité énergétique des batteries Li-ion en font la meilleure option pour ces applications.

- **Appareils électroniques portables**

Les batteries Li-ion dominent l'industrie des appareils électroniques depuis des années. Elles sont utilisées dans les smartphones, ordinateurs portables, tablettes, et autres appareils électroniques portables. Cette application est totalement mature, avec des optimisations constantes pour améliorer la densité énergétique et la durée de vie des batteries, sans révolution majeure à l'horizon à court terme.

- **Stockage d'énergie stationnaire**

Les batteries Li-ion sont également utilisées dans les systèmes de stockage d'énergie pour les maisons, les entreprises, et les réseaux électriques. Des entreprises comme Tesla (avec ses systèmes Powerwall et Powerpack) ont popularisé ces solutions, permettant de stocker l'énergie renouvelable, comme l'énergie solaire, pour une utilisation ultérieure. Cette application est en pleine croissance, bien que la demande de capacités plus grandes et la gestion de la durée de vie des batteries soient des enjeux importants. Pour les grandes installations de stockage à l'échelle des réseaux, les batteries Li-ion sont bien établies, mais des alternatives comme les batteries à flux redox ou d'autres technologies sont également explorées.

L'utilisation des batteries Li-ion comme source d'énergie pour les véhicules électriques et pour des applications diverses est aujourd'hui très mature. Ces batteries sont au cœur de la révolution des transports électriques, avec une large adoption dans les voitures, les bus, les camions légers, et les appareils électroniques. Bien que des défis subsistent en termes de densité énergétique, de durée de vie et de sécurité, la technologie continue d'évoluer et de s'améliorer. De nombreuses recherches visent

⁴ La rédaction de ce paragraphe a été réalisée à l'aide des informations trouvées sur les sites suivants : Agence Internationale de l'Énergie (AIE), BloombergNEF (BNEF), Union of Concerned Scientists (UCS), Rapports du Consortium Batteries Europe et Centre commun de recherche (JRC), et des revues telles que le Journal of Power Sources, Energy Storage Materials, et Nature Energy.

à prolonger la durée de vie, améliorer les performances et réduire les coûts, mais la technologie actuelle est déjà prête pour une utilisation à grande échelle dans de nombreux secteurs.

3 Analyse du cadre réglementaire et normatif par rapport à ces énergies

Dans la mesure où les batteries sont à un stade plus avancé de maturité pour l'utilisation en tant que source d'énergie, il a été décidé de se focaliser un peu plus sur les batteries dans le cadre de ce paragraphe.

3.1 Réglementation RGIE

3.1.1 Réglementation actuelle

Un premier travail global a été réalisé sur l'analyse de la compatibilité du RGIE par rapport à ces sources d'énergie émergentes.

Les articles actuels pouvant avoir un impact sur l'utilisation de ces sources d'énergie sont listés ci-après :

❖ **Titre : Aérage – Dispositions utiles en lien avec les débits d'air – maîtrise du risque d'explosion**

L'article 4 spécifie notamment que les travaux doivent être suffisamment aérés pour éviter l'accumulation de gaz dangereux.

Dans le cadre de l'utilisation d'hydrogène, des scénarios de fuite ou de rejet d'hydrogène pourraient conduire, en l'absence d'une ventilation suffisante, à former une atmosphère explosive de volume conséquent.

Dans le cadre de l'utilisation de véhicules à batterie, les fumées en cas d'incendie, en l'absence d'une ventilation suffisante, pourraient porter atteinte au personnel.

L'article 10 prévoit que le personnel soit prévenu en cas d'incident portant atteinte à la circulation normale de l'air. Ce point sera particulièrement sensible dans le cadre de l'exploitation des véhicules à hydrogène ou à batterie. Le dossier technique d'aérage prévu à l'article 7 devra intégrer les exigences relatives à l'aérage minimum pour l'exploitation des véhicules à hydrogène ou à batterie.

Concernant les emplacements de recharge des véhicules à batterie, leur positionnement devra être étudié afin de respecter au mieux l'aérage de l'exploitation.

❖ **Atmosphère irrespirable – Dispositions relatives à l'alerte et la mise à l'abri**

L'article 4 du titre Atmosphère irrespirable stipule que l'exploitant doit définir une procédure d'alerte et des mesures de mise à l'abri des personnes susceptibles de se trouver environnées par une atmosphère explosive. Ces dispositions devront être complétées pour intégrer les scénarios éventuels pour les véhicules utilisant des sources d'énergie émergentes.

❖ **Titre : Explosifs**

L'utilisation des explosifs est fortement encadrée par le RGIE. Un décret reprenant les dispositions du décret n°87-231 du 27 mars 1987 et de ce titre est en cours d'établissement par la DGT, avec l'appui du BSSS et de l'Ineris. L'article 22 spécifie notamment les précautions avant le tir, notamment l'évacuation du chantier et de la zone dangereuse environnante. Afin d'éviter tout scénario de fuite d'hydrogène qui pourrait résulter de l'impact d'ondes de pression sur les composants du véhicule, la présence de véhicules à hydrogène devrait être proscrite dans la zone de tir.

❖ **Titre : Moteurs thermiques**

L'article 2 spécifie que l'emploi de moteurs fonctionnant avec un gaz combustible est interdit. Cet article ne concerne a priori que les moteurs thermiques et non les systèmes de propulsion électrique. Il en est ressorti que l'hydrogène peut être employé pour alimenter un système de propulsion électrique alimenté par une pile à combustible sans restriction. Il en est de même pour l'utilisation de véhicules alimentés par batterie.

3.1.2 Dispositions complémentaires pour encadrer l'utilisation des batteries en souterrain

Cependant, la réglementation RGIE montre des limites par rapport à l'émergence de ces nouvelles technologies. En effet, l'intégration de véhicules à batterie dans les milieux souterrains, notamment dans les industries extractives, nécessite des ajustements spécifiques à ce règlement pour garantir la sécurité, l'efficacité, et la durabilité des opérations. Voici quelques suggestions de modifications à envisager :

- **Normes de sécurité et de prévention des risques :**
 - Évaluation des risques spécifiques : Inclure des exigences pour des évaluations de risques spécifiques liées à l'utilisation de véhicules électriques dans des environnements souterrains, prenant en compte des facteurs tels que la température, l'humidité, et la présence de gaz combustibles ou toxiques.
 - Normes de conception et de fabrication : Exiger que les véhicules à batterie respectent des normes strictes de sécurité, de conception et de fabrication adaptées aux conditions de travail souterraines.
- **Ventilation et qualité de l'air :**
 - Exigences de ventilation : Adapter les normes de ventilation pour assurer une circulation d'air suffisante dans les galeries souterraines où des véhicules à batterie sont utilisés, afin de minimiser le risque d'accumulation de gaz dangereux.
 - Surveillance de la qualité de l'air : Intégrer des exigences pour des systèmes de détection de gaz et de surveillance de la qualité de l'air, permettant de détecter la présence de polluants et de garantir la sécurité des travailleurs.
- **Infrastructure de recharge :**
 - Normes pour les stations de recharge : Établir des exigences spécifiques concernant la conception, l'emplacement et la sécurité des stations de recharge pour les véhicules à batterie dans les carrières et autres environnements souterrains.
 - Gestion de l'alimentation électrique : Introduire des règles pour la gestion de l'alimentation électrique des systèmes de recharge, y compris des recommandations sur l'utilisation d'énergie renouvelable lorsque cela est possible.
- **Systèmes de gestion et de contrôle :**
 - Systèmes de suivi et de monitoring : Mettre en place des exigences pour l'intégration de systèmes de surveillance des véhicules à batterie, permettant de suivre l'état de charge, l'autonomie, et d'autres paramètres de performance en temps réel.
 - Protocoles d'urgence : Développer des procédures d'urgence claires pour la gestion des incidents liés aux batteries, y compris les fuites, les incendies, ou les défaillances des systèmes électriques.
- **Formation et sensibilisation/**
 - Programmes de formation spécifiques : Exiger que tous les travailleurs utilisant des véhicules à batterie reçoivent une formation spécifique sur la sécurité électrique, la manipulation des batteries, et les procédures à suivre en cas d'urgence.
 - Sensibilisation aux risques associés : Organiser des sessions de sensibilisation pour les travailleurs concernant les risques potentiels liés à l'utilisation de véhicules électriques en milieu souterrain.

- **Maintenance et inspection**

- Protocoles d'inspection réguliers : Établir des exigences pour des inspections régulières et des tests de sécurité pour les véhicules à batterie et leurs systèmes associés.
- Maintenance préventive : Introduire des normes concernant la maintenance préventive des véhicules électriques, en s'assurant qu'ils soient régulièrement vérifiés pour détecter d'éventuels problèmes avant qu'ils ne deviennent critiques.

- **Gestion des déchets et recyclage :**

- Exigences pour le recyclage des batteries : Mettre en place des règlements concernant la gestion des déchets de batteries, en incluant des directives sur le recyclage et l'élimination appropriés des batteries usagées.
- Procédures de stockage : Établir des normes de stockage pour les batteries afin de minimiser les risques d'incendie ou d'accidents liés aux batteries lithium-ion.

L'intégration des véhicules à batterie dans les industries extractives souterraines nécessite des modifications du Règlement Général des Industries Extractives pour aborder les spécificités de ces environnements. En se concentrant sur la sécurité, la gestion de l'énergie, la formation, et le recyclage, il est possible de maximiser les avantages des véhicules électriques tout en minimisant les risques associés à leur utilisation en milieu souterrain. La mise à jour de la réglementation devrait impliquer la collaboration de toutes les parties prenantes pour garantir des normes adéquates et efficaces.

3.2 Aspects réglementaires et normatifs

Des normes et des réglementations spécifiques régissent l'utilisation des batteries Li-ion. Ces normes établissent des exigences en matière de sécurité, de transport, de stockage et d'élimination des batteries. Les entreprises doivent se conformer à ces réglementations pour minimiser les risques.

Sur le volet réglementaire, on retrouve notamment :

- au niveau européen :
 - la Directive 2006/66/CE qui est devenue le Règlement Européen UE 2023/1542 en juillet 2023 ;
 - le règlement R100 rev.3 pour la mise sur le marché de véhicules électriques ;
- au niveau international :
 - la réglementation liée aux transports des batteries via le manuel ONU (section 38.3 pour les batteries) ;
- la réglementation Française notamment celle relative aux Installations Classées pour la Protection de l'Environnement se basant sur le Code de l'Environnement.

Sur le volet normatif, plusieurs normes concernent en particulier la mise sur le marché des engins de chantier à traction électrique :

- IEC 62219: "Industrial application testing",
- UL 2580: "Batteries for Use in Electric Vehicles",
- IEC 62485: 6 "Battery installations used for electric off road vehicles",
- IEC 63660:3 "Safety requirements for secondary batteries (Traction battery)",
- IEC 60204: 1 "Safety requirements for secondary batteries and battery installations".

3.3 Aspects conception / technique

La conception des systèmes de batteries Li-ion joue un rôle clé dans la sécurité. Des mesures techniques telles que la gestion thermique, la protection contre les courts-circuits et la surveillance continue contribuent à assurer la sécurité en minimisant le risque d'emballement thermique.

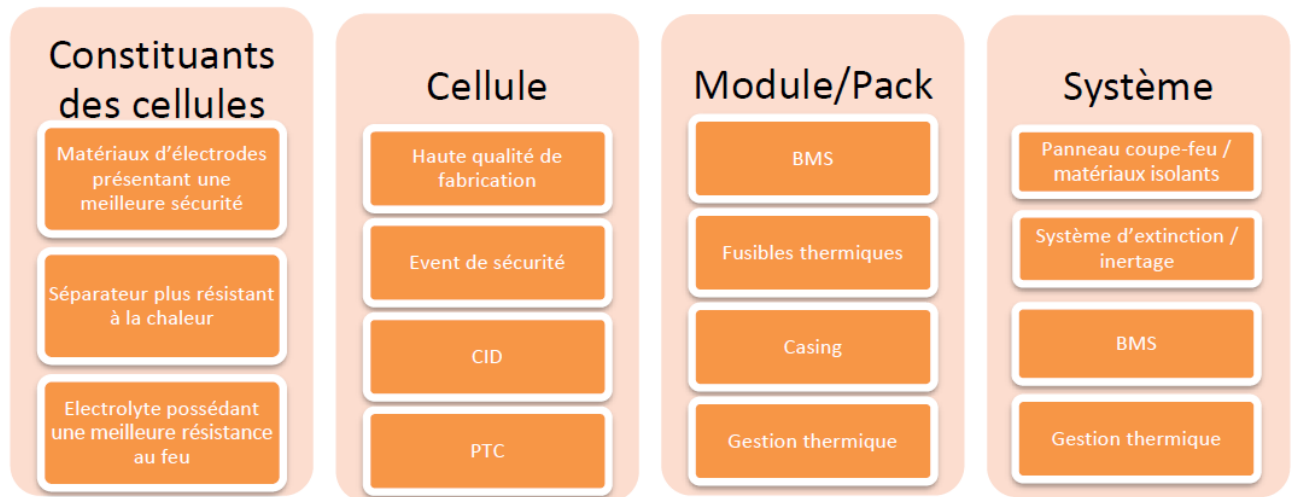


Figure 4: La maîtrise du risque des batteries dès la conception (Source Ineris)

A l'échelle des constructeurs de cellules, l'objectif est d'avoir des matériaux résistants à la chaleur. Concernant la cellule, il est important d'assurer une qualité de fabrication pour éviter les particules internes qui pourraient générer des courts circuits internes par exemple. La présence d'un événement peut permettre d'évacuer une pression interne à la cellule.

A l'échelle du module et du pack, la sécurité repose sur le BMS, la présence de fusibles thermiques, une enveloppe adaptée à l'application et une gestion thermique de la batterie.

A l'échelle du système tel qu'un container de stockage d'énergie électrochimique, les mêmes fonctions de maîtrise du risque sont retrouvées auxquelles sont ajoutées des fonctions de détection incendie, d'inertage et d'extinction.

4 Analyse des Risques

4.1 Méthodologie de l'analyse des risques

L'Analyse Préliminaire des Risques (APR) conduit à la hiérarchisation de l'ensemble des phénomènes dangereux redoutés selon une grille de criticité préliminaire et à la sélection des phénomènes dangereux critiques.

Cette méthodologie s'appuie sur les pratiques mises en œuvre dans les études de dangers pour les installations classées.

L'objectif de l'analyse des risques est d'identifier le plus exhaustivement possible les phénomènes dangereux susceptibles de se produire.

Le périmètre de ces analyses de risques porte sur les deux sources d'énergie présentées dans le rapport précédemment à savoir les batteries Lithium-ion et l'hydrogène pour des véhicules de type camion ou chargeuse lors des phases d'exploitation, de stockage et de transport.

Les deux analyses de risque présentées pour les deux technologies sont basées sur une revue documentaire, mais pas un groupe de travail. Elles ne doivent pas être considérées comme exhaustive, mais peut participer à une prise de conscience des risques accidentels liés à l'utilisation de ces sources d'énergie.

4.2 Batteries

Le tableau ci-après présente les causes pour le cas de l'utilisation d'une batterie auxiliaire Li-ion en tant que source d'énergie pour un véhicule dans un milieu souterrain.

Le tableau se compose de 4 colonnes :

- La colonne « Evènement Redouté Central » dit ERC correspond à un incident pouvant mener à un phénomène dangereux avec des conséquences plus ou moins importantes.
- La colonne « Défaillance » correspond aux défaillances pouvant survenir qui mènent à l'ERC.
- La colonne « Dérive » détaille l'ensemble des éléments pouvant mener aux défaillances identifiées au préalable.
- La colonne « Cause » permet de définir la cause des dérives identifiées lorsque cela est possible.

L'objectif de ce tableau est d'identifier les situations de danger et de remonter sur l'ensemble des défaillances, dérives et causes pouvant y mener.

Causes	Dérives	Défaillances	Evènement Redouté Central
	Choc externe	Echauffement lié à une agression externe	Emballement thermique d'un module
Fuite du liquide caloporteur du système de régulation de la température Condensation de l'air humide dans la batterie	Infiltration de liquide dans la batterie	Court-circuit externe du module	
	Défaut de conception ou d'assemblage (provoquant un défaut d'isolement) Mise en contact des parties actives du module par un objet extérieur métallique Vieillissement des connectiques, de l'électronique		
		Erreur de raccordement du système de charge	
	Défaillance du système de régulation de la température Surchauffe d'une cellule	Surchauffe du module	
	Défaillance électronique de la borne de charge Chargeur mal dimensionné par rapport au module Défaut d'équilibrage des tensions des modules	Surcharge du module	

	Défaillance BMS (acquisition, mesure ou valeur seuil de la tension)	
Choc externe	Echauffement lié à une agression mécanique externe de la cellule	Emballement thermique d'une cellule
Présence de rongeurs ou d'animaux Défaut de conception ou d'assemblage Infiltration de liquide dans la cellule	Court-circuit externe à la cellule	
Défaillance du système de régulation de la température Mauvaise conception de dissipation de chaleur de la cellule	Surchauffe d'une cellule (en charge ou décharge)	
Défaillance BMS Défaut d'équilibrage des tensions des cellules	Surcharge de la cellule	
Formation de dendrites ⁵ Défaut de conception ou de fabrication de la cellule Vieillessement des matériaux Perte de confinement de la cellule	Court-circuit interne à la cellule	
	Incendie d'un convertisseur Départ de feu à l'intérieur de l'habitacle Défaillance d'un équipement électrique	Incendie d'un équipement de la cabine

Tableau 3 : Arbre des causes pour le cas de l'utilisation d'une Batterie auxiliaire Li-ion en tant que source d'énergie pour un véhicule dans un milieu souterrain.

⁵ Formation d'aiguille sur les électrodes pouvant entraîner une défaillance du système

Le tableau ci-après présente les conséquences redoutées en cas d'emballlement thermique.

Evénement Redouté Central	Phénomènes dangereux	Conséquences environnementales	Conséquences sur le personnel
Emballlement thermique d'un module	Dégazage du module : rejet de gaz dans la batterie	Montée en pression dans la batterie, éclatement de la batterie, éclatement de la batterie Effets de surpression	Projections physiques
		Formation d'une ATEX dans la batterie si inflammable, explosion interne dans la batterie. Incendie de la batterie	Brûlures Projections physiques
		Feu torche, effets thermiques. Propagation à des éléments combustibles à proximité	Brûlures
		Fuite de gaz	Intoxication
		Fuite de gaz, formation d'une ATEX, explosion interne dans la batterie	Intoxication Projections physiques
	Départ de feu d'un module	Incendie Propagation à des éléments combustibles à proximité	Brûlures
	Eclatement du module	Montée en pression avec effets de surpression. Projection d'électrolyte et de matière incandescente	Projections physiques Brûlures

Tableau 4 : Conséquences pour le cas d'étude d'une Batterie auxiliaire Li-ion en tant que source d'énergie pour un véhicule dans un milieu souterrain

Afin de limiter l'apparition de défaillances causant l'événement central redouté, et afin de limiter les conséquences causées par l'événement central redouté, des barrières de prévention et de protection sont nécessaires.

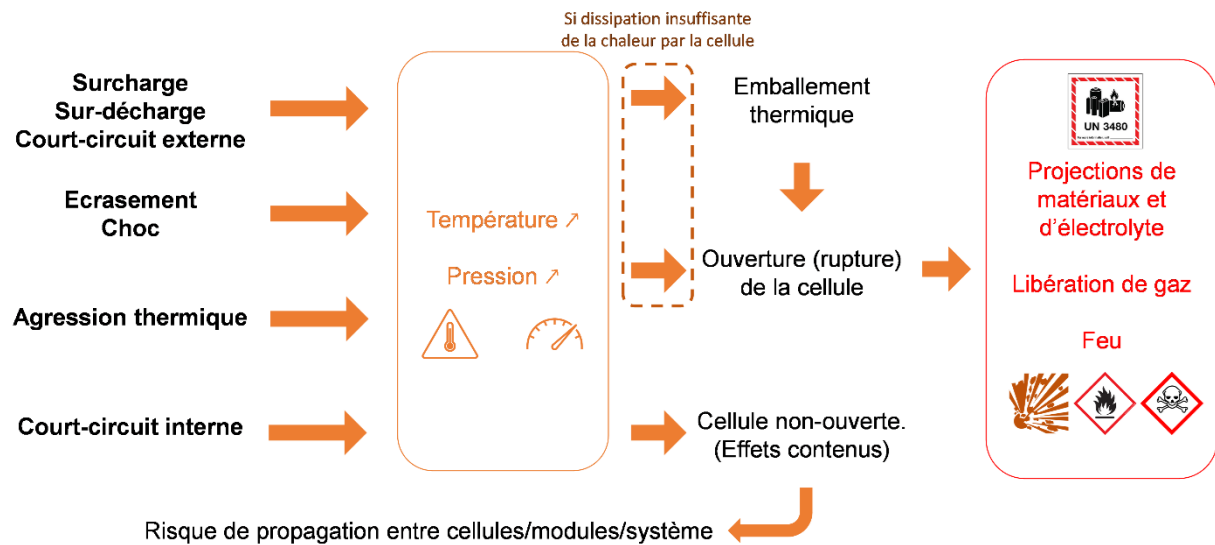


Figure 5 : Cartographie des défaillances d'une batterie et leurs conséquences

En plus des risques inhérents aux batteries elles-mêmes, leur utilisation en milieu souterrain implique également un ensemble de risques propres aux industries extractives, tel que :

- Difficulté à évacuer les fumées et gaz toxiques et inflammables,
- Accélération de la flamme en cas d'explosion,
- Propagation rapide d'un incendie,
- Difficulté d'évacuation des personnes travaillant en souterrain (fumées opaques).

4.3 Hydrogène

4.3.1 Evénements redoutés centraux

L'analyse préliminaire des risques a porté sur les événements dangereux suivants, pour lesquels les causes et conséquences ont été analysées en fonction du contexte spécifique dans lequel se situe les véhicules à hydrogène au cours de ses différentes phases de fonctionnement :

- Eclatement de réservoir
 - Sous l'effet d'un choc
 - Sous l'effet d'un incendie
 - Sous l'effet d'une explosion interne (liée à une contamination de l'hydrogène par de l'oxygène au niveau de l'électrolyseur – ce scénario n'est pas développé en détail, relevant des sécurités au niveau de la production d'hydrogène)
- Perte de confinement au niveau du dispositif de décompression activé par la chaleur
 - Sur sollicitation en cas d'incendie
 - Ouverture intempestive
- Perte de confinement au niveau des soupapes de sécurité
 - Du fait d'une défaillance en amont
 - Du fait d'un défaut d'étanchéité
- Fuite sur le circuit H₂
 - Sous l'effet d'un choc (fuite majeure)
 - Fuite sur raccord du fait de vibrations, détérioration d'un joint, mauvais serrage...
- Rejet d'hydrogène à l'échappement
 - Dysfonctionnement de la pile à combustible
- Feu
 - D'origine électrique (notamment issu des batteries électriques)
 - D'origine mécanique (échauffement d'un frein)
 - Feu de fluide hydraulique
 - Feu de pneumatiques
 - Fuite d'hydrogène enflammée
 - Autre véhicule en feu à proximité

4.3.2 Causes spécifiques suivant les phases

Les causes suivantes ont été envisagées pour les événements redoutés centraux étudiés.

- Phase de roulage ou déchargement
 - Chute de bloc
 - Accident de circulation
 - Impact avec un autre véhicule
 - Impact contre une paroi
 - Choc avec un bloc tombé au sol
 - Incendie d'origine électrique
 - Incendie d'origine mécanique
- Phase de chargement (en surface)
 - Chocs (chute de blocs au cours du chargement)
- Intervention en cas de panne en fond
 - Incendie lié à l'intervention
 - Purge du circuit hydrogène
 - Purge des réservoirs
- Stationnement en fond
 - Incendie

4.3.3 Phénomènes dangereux résultant des événements redoutés centraux

Les phénomènes dangereux qui résultent des événements redoutés centraux sont :

- L'explosion d'un nuage de gaz résultant d'une fuite ou de l'ouverture du dispositif de décompression activé par la chaleur. Ce nuage se forme à proximité de l'orifice de fuite et proche du plafond de la galerie ;

- Le feu torche, flamme alimentée par la fuite ou le rejet d'hydrogène au dispositif de décompression activé par la chaleur ;
- L'explosion (suivie d'un feu torche) d'une atmosphère explosive accumulée à l'intérieur d'un espace confiné du véhicule en cas de fuite dans cet espace confiné ;
- L'éclatement de réservoir sous l'effet d'un feu ou d'un impact de projectile.

Comme pour les batteries, en plus des risques inhérents à l'hydrogène lui-même, son utilisation en milieu souterrain implique également un ensemble de risques propres aux industries extractives, tel que :

- Difficulté à évacuer les fumées et gaz toxiques et inflammables,
- Accélération de la flamme en cas d'explosion,
- Propagation rapide d'un incendie,
- Difficulté d'évacuation des personnes travaillant en souterrain (fumées opaques).

5 Fiche synthèse des éléments à considérer lors de l'instruction de dossier incluant ces sources d'énergies émergentes

La fiche suivante a été établie afin de présenter les éléments à considérer lors de l'instruction de dossier pour l'utilisation de sources d'énergies émergentes en milieu souterrain. Cette fiche ne traite que des aspects accidentels.

Cette fiche n'est pas exhaustive et n'est basée que sur une revue documentaire.

FICHE SYNTHÈSE DES ÉLÉMENTS À CONSIDÉRER DANS L'INSTRUCTION D'UN DOSSIER AVEC DES SOURCES D'ÉNERGIES ÉMERGENTES EN SOUS TERRAIN	
Type d'énergie et technologie utilisée :	
Santé et sécurité au travail	
Risques spécifiques liés aux véhicules à batterie : - Sécurité incendie - Gestion des risques d'accidents électriques - Incendies, fumées toxiques et explosions liés à la technologie des batteries. - Fuite d'électrolyte et gestion des produits chimiques Formation des opérateurs aux risques spécifiques des batteries et des moyens de secours et d'intervention Évaluation des risques professionnels attendue Plan d'intervention d'urgence incluant un plan en cas d'accident, incendie ou fuite d'électrolyte des batteries	Risques spécifiques liés à l'utilisation de véhicules à hydrogène : - Risques d'explosion (l'hydrogène étant un gaz inflammable). - Sécurité dans le stockage et la manipulation de l'hydrogène comprimé. Formation des opérateurs à la manipulation des équipements à hydrogène, installation de systèmes de détection de fuites, procédures d'évacuation et de confinement. Évaluation des risques professionnels attendue Plan d'intervention d'urgence : Élaborer des plans de gestion de crise en cas d'accident ou d'incendie liés à l'hydrogène (protocoles d'intervention des équipes d'urgence).
Gestion des risques accidentels	
Scénarios d'accidents : Étudier des scénarios en cas de sinistres et leur impact sur l'environnement (au sens large). Scénarios à retrouver : emballement thermique d'une batterie. Scénarios devant être modélisés : - Départ de feu lié à l'emballement thermique d'une batterie, - Formation d'une zone ATEX et risque d'explosion. Modélisation des risques d'incendie et de dispersion des fumées. La liste des mesures de sécurité devra être détaillée	Scénarios d'accidents : Étudier des scénarios en cas de sinistres et leur impact sur l'environnement (au sens large). Scénarios à retrouver : perte de confinement d'hydrogène Scénarios devant être modélisés : - Explosion d'un nuage de gaz d'hydrogène, - Feu torche lié à une fuite d'hydrogène, - Formation d'une zone ATEX et risque d'explosion. Modélisation des risques d'explosion et de dispersion de l'hydrogène. La liste des mesures de sécurité devra être détaillée
Station de charge et remplissage	

FICHE SYNTHÈSE DES ÉLÉMENTS À CONSIDÉRER DANS L'INSTRUCTION D'UN DOSSIER AVEC DES SOURCES D'ÉNERGIES ÉMERGENTES EN SOUS TERRAIN
Les zones de station de charge et de remplissage en fonction de la technologie utilisée doivent être clairement définies et détaillées. L'ensemble des risques associée à ces zones doit être explicitée.
Inspection et suivi périodique
Prévoir des inspections périodiques sur ces thématiques en vérifiant l'application des obligations réglementaires et de l'engagement en termes de sécurité. Prévoir également le contrôle des équipements de sécurité associés à ces technologies.

6 Conclusion

L'intégration des technologies émergentes dans les véhicules et engins destinés aux opérations souterraines représente une opportunité majeure pour réduire l'empreinte environnementale et les contraintes liées aux énergies fossiles. Cependant, cette transition s'accompagne de nouveaux défis en matière de sécurité et de gestion des risques, tant pour les travailleurs que pour les installations.

Les analyses menées dans ce rapport ont mis en lumière les dangers potentiels associés à ces technologies, tout en soulignant leur degré de maturité variable selon les applications envisagées. Il apparaît également que le cadre réglementaire actuel, bien qu'adapté à l'exploitation traditionnelle, nécessite des ajustements pour prendre en compte les spécificités de ces nouvelles sources d'énergie.

La généralisation de ces technologies dans les environnements souterrains devra s'accompagner d'une vigilance accrue et d'une approche rigoureuse de l'analyse des risques. En outre, la mise en place de recommandations claires et d'une réglementation adaptée sera essentielle pour assurer une transition technologique sûre et durable. Ce rapport, en fournissant des outils et des éléments d'analyse, vise à accompagner les inspecteurs dans leur mission d'évaluation et de contrôle de ces nouvelles technologies.

