

Décryptage

LE STOCKAGE DE L'ÉNERGIE: CARTOGRAPHIE, RISQUES ET PISTES DE PRÉVENTION

Cet article décrit les différents modes de stockage d'énergie, leurs fonctionnements et leurs répartitions, ainsi que les risques associés à leurs installations, mises en œuvre et entretiens ou opérations de maintenance/réparation. Des pistes pour la prévention des risques professionnels sont détaillées en ce qui concerne le stockage dit « électrochimique », forme de stockage permettant une très grande diversité d'applications et d'utilisations (stockage stationnaire ou nomadisme). De nombreux salariés sont potentiellement exposés à des risques liés à cette technologie pour laquelle des incidents et des accidents sont régulièrement rapportés.

ENERGY STORAGE: MAPPING, RISKS AND WAYS OF PREVENTION – This article describes different energy storage methods, how they operate and are distributed as well as the risks associated with their installation, use and servicing and their maintenance/repair operations. Ways of preventing occupational risks are described for electrochemical energy storage, which is a form of storage enabling a very wide range of applications and uses (stationary or portable storage). Many employees are potentially exposed to risks related to this technology for which incidents and accidents are regularly reported.

STÉPHANE
MIRAVAL,
FLORIAN
MARC
INRS,
département
Expertise
et conseil
technique

MAXIME
VAUFLEURY
INRS,
département
Ingénierie
des procédés

Il y a plusieurs centaines de milliers d'années, les hommes préhistoriques commencèrent à utiliser le feu de bois pour se chauffer et cuire leurs aliments. La première source d'énergie domptée par l'homme était née. Si le besoin d'énergie est resté limité (en quantités globales d'énergie) jusqu'à la révolution industrielle au XIX^e Siècle, il a été multiplié par un facteur dix au cours des cent dernières années (cf. Figure 1).

Les sources d'énergie ont d'abord été d'origines humaine et animale, renouvelables (eau, vent, bois, graisses animales, huiles végétales) [1] puis, à partir de l'ère industrielle, très majoritairement fossiles et non renouvelables (charbon, pétrole, gaz naturel...). En raison de préoccupations géopolitiques et de l'épuisement des stocks, mais également des inquiétudes croissantes concernant les impacts environnementaux et les émissions en dioxyde de carbone (CO₂) de ces dernières, le développement d'énergies alternatives renouvelables, ainsi que leur stockage, sont devenus une préoccupation majeure depuis la fin du XX^e Siècle.

La plupart des énergies renouvelables étant intermittentes, leur stockage devient essentiel pour ajuster production et consommation. L'énergie est stockée lorsque sa disponibilité est supérieure aux besoins et restituée quand la demande s'avère plus importante. Par ailleurs, les appareils qui fonctionnent en situation de mobilité se sont multipliés, ce qui a renforcé ce besoin de stockage d'énergie. Il existe aujourd'hui un grand nombre de technologies de stockage d'énergie: sous forme mécanique, thermique, chimique ou électrochimique [2, 3].

Cet article présente succinctement les différents types de stockage d'énergie actuellement utilisés au niveau mondial. Une attention particulière est portée au stockage électrochimique qui permet une grande diversité d'applications et d'utilisations. De nombreux salariés sont potentiellement exposés à des risques liés à ces technologies pour lesquelles des incidents et des accidents ont été rapportés. Des pistes de prévention sont proposées, afin de mieux maîtriser ces risques.

Le stockage mécanique

Stockage par pompage (STEP)

Une station de pompage se compose principalement de deux réservoirs situés à des hauteurs différentes, reliés par un système de canalisations: le premier dit haut (artificiel ou d'apport) et le second dit bas (retenue d'eau, mer). Dans un tel système, l'eau est pompée vers le réservoir supérieur lors des périodes de faible demande, et restituée à travers une turbine en produisant de l'énergie électrique - à l'image d'une centrale hydroélectrique classique - lors des périodes de fortes demandes. Les stations de pompage ont un temps de démarrage court et peuvent répondre aux fluctuations soudaines de la demande. Cette technologie a émergé dès le début du XX^e Siècle, ce qui en fait un procédé mature. Mais son empreinte de surface est élevée, son temps de construction et son principe même impliquent des restrictions géographiques. En 2018, le stockage par pompage représentait cependant 99% des capacités mondiales de stockage d'électricité [4].

Stockage par air comprimé (CAES)

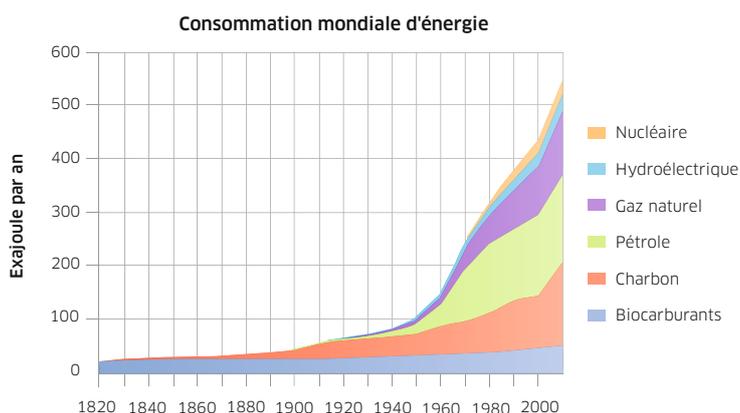
Le principe repose, là encore, sur l'utilisation de l'énergie mécanique d'un fluide: de l'air est pompé lorsque l'électricité est à faible coût, stocké sous pression dans de grands réservoirs ou des cavités naturelles, et libéré lors de périodes de forte demande [5]. Le stockage d'énergie à air comprimé représente moins de 1% des capacités mondiales de stockage de l'électricité. Il n'en existe aucun site en France.

Stockage inertiel (volant d'inertie)

Un volant d'inertie est un dispositif mécanique rotatif comprenant une masse en rotation, entraînée à forte vitesse par un moteur. Le principe est de conserver l'énergie sous forme d'énergie cinétique de rotation. Ce dispositif convertit de l'énergie électrique en énergie cinétique de rotation puis en électricité. Dans le domaine du stockage d'énergie, les volants d'inertie sont surtout utilisés dans le secteur éolien.

Risques spécifiques liés aux modes de stockage mécanique

Les principaux risques liés au stockage mécanique de l'énergie sont avant tout d'ordres environnemental et de sécurité civile et résident essentiellement dans une potentielle défaillance des infrastructures nécessaires à sa mise en œuvre. Celles-ci requièrent une grande technicité de conception ainsi qu'une surveillance et une maintenance sans faille lors de leur utilisation, afin de limiter les risques d'accidents majeurs qui provoquent la libération incontrôlée de très grandes quantités d'énergie stockée, dont les conséquences



peuvent être catastrophiques (la rupture du barrage de Malpasset en 1959 causa la mort de 423 personnes).

Le stockage thermique

Stockage par chaleur sensible

Le stockage par chaleur sensible est une technologie mature, qui consiste à stocker l'énergie en chauffant un liquide ou un milieu de stockage solide. Les fluides et matériaux utilisés doivent avoir une capacité thermique et un point d'ébullition ou de fusion élevés. Le stockage s'effectue en réservoirs souterrains ou de surface.

L'eau est majoritairement utilisée pour des températures inférieures à 100°C, alors que des sels fondus ou des huiles organiques le sont pour des températures plus élevées.

Cette technologie est simple, utilise des matériaux facilement disponibles et la durée de vie des installations est longue. Cependant, les volumes requis ainsi que les pertes de chaleur liées au procédé en limitent les applications.

Stockage par chaleur latente

Cette technologie consiste à stocker de l'énergie thermique dans un matériau en exploitant ses propriétés de changement de phase, c'est-à-dire un passage de son état initial - solide ou liquide - à un autre état.

Lorsque la température diminue, le matériau va retrouver son état initial en dégageant la même quantité de chaleur que celle qui lui avait permis de changer d'état initialement. Ce type de technologie occupe souvent un petit volume et la densité énergétique est élevée par rapport au stockage par chaleur sensible. Cependant, le coût, la nature corrosive des matériaux le plus souvent rencontrés (sels), ainsi que les pertes thermiques liées au procédé, limitent son développement.

Stockage par thermochimie ou sorption

Le stockage d'énergie thermochimique est basé sur la réversibilité d'une réaction chimique ou d'une réaction d'adsorption-désorption.

↑ FIGURE 1
Consommation mondiale d'énergie par ressource

(Source: estimations de Vaclav Smil tirées de: Transitions énergétiques: historique, exigences et perspectives - Energy Transitions: History, Requirements, Prospects).



Dans le cas d'une réaction chimique, une molécule initiale est fractionnée par apport de chaleur. Les molécules résultant de cette réaction endothermique (qui consomme de l'énergie thermique) sont stockées séparément. Au besoin, elles sont réunies afin de réagir pour reconstituer la molécule initiale, ce qui s'accompagne d'une libération de chaleur (réaction exothermique) [6].

Dans le cas d'une réaction d'adsorption-désorption, des molécules de gaz adsorbées à la surface de matériaux poreux (charbons, zéolithes, alumines) sont désorbées par chauffage (réaction endothermique). La réadsorption de ces molécules sur le support solide poreux permet de restituer l'énergie emmagasinée. Le rendement est élevé et permet un stockage d'énergie très compact. Cependant, cette technologie est onéreuse et techniquement complexe.

Risques spécifiques liés aux modes de stockage thermique

La majorité des technologies de stockage thermique sont bien maîtrisées. Elles peuvent cependant présenter des risques, aussi bien pour l'environnement que pour les salariés qui les mettent en œuvre, associés à la toxicité ou à l'inflammabilité des fluides et matériaux utilisés.

Le stockage chimique Stockage par hydrogène

L'hydrogène est essentiellement produit par reformage du gaz naturel, en faisant réagir du méthane et de l'eau, avec une consommation importante d'énergie et une émission massive de dioxyde de carbone. Il peut également être obtenu par électrolyse de l'eau, à partir d'énergies renouvelables. L'hydrogène peut alors être compressé dans des récipients sous haute pression, liquéfié ou encore absorbé dans des hydrures métalliques, pour assurer son stockage et permettre une utilisation différée dans une pile à combustible ou pour l'alimentation d'une centrale à gaz. Cependant, le coût élevé de production de l'hydrogène par hydrolyse de l'eau représente un frein à son développement rapide.

Stockage par méthane

L'intérêt du méthane dans le stockage d'énergie a augmenté car il s'agit de l'énergie fossile la moins carbonée, permettant ainsi de réduire les émissions de dioxyde de carbone.

L'hydrogène produit par électrolyse de l'eau à partir d'énergies renouvelables (éolienne ou solaire) est transformé en méthane par réaction avec le dioxyde de carbone (procédé Sabatier).

La production et l'utilisation de biométhane, obtenu par fermentation de déchets organiques, permettent de réduire jusqu'à 10 fois ces émissions de dioxyde de carbone.

Le méthane peut alors être stocké dans des cavernes ou dans un réseau de gaz naturel pour un éventuel transport sur de longues distances.

Risques spécifiques liés aux modes de stockage chimique

Les principaux risques liés à ces technologies proviennent des gaz qu'elles mettent en œuvre et concernent avant tout les professionnels qui produisent ces gaz, mais également et dans une moindre mesure, les consommateurs (particuliers et professionnels) qui les utilisent en cas de dysfonctionnement du matériel. Le méthane et l'hydrogène sont en effet des gaz extrêmement inflammables, l'hydrogène étant par ailleurs très réactif. Des fuites de ces gaz entraînent la formation d'atmosphères explosives (« Atex ») qui, en présence d'une source d'inflammation, peuvent générer une explosion.

Le stockage de ces gaz sous pression présente également des risques liés à la pression ou aux basses températures de stockage, quand ils sont liquéfiés.

Risques associés aux modes de stockage mécanique, thermique ou chimique et leur prévention

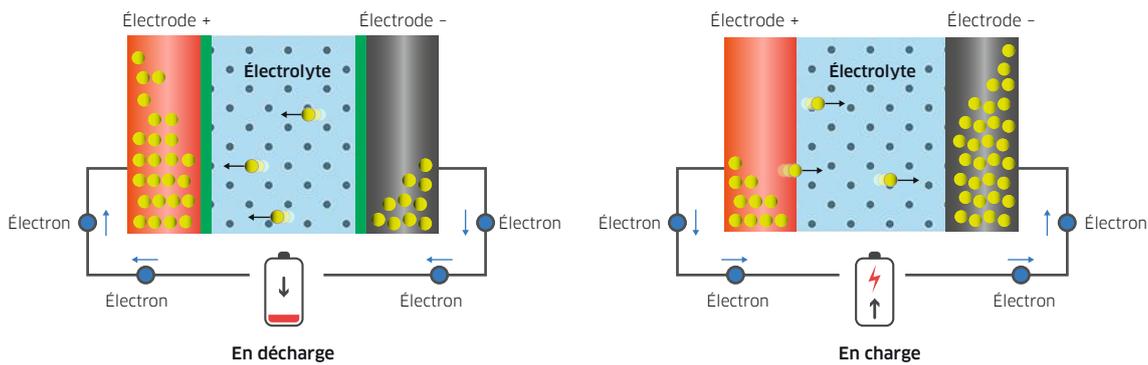
Les risques auxquels sont confrontés les travailleurs, lors de l'installation, de la mise en œuvre ou de l'entretien de ces installations, outre ceux qui ont été détaillés plus haut, sont essentiellement liés à la conception, la construction, l'utilisation et la maintenance de ces ouvrages. La prévention des risques, qui peut recouvrir de nombreux domaines, est détaillée dans de nombreuses publications consacrées à la prévention, notamment publiées par l'INRS¹ et par de nombreux organismes en France ou dans le monde: OPPBTP, EU-Osha, etc.

Le stockage électrochimique Supercondensateurs

Les supercondensateurs sont des dispositifs de stockage de charges électriques, rechargeables, capables de délivrer de fortes puissances pendant des temps assez courts. Ils sont constitués d'électrodes spécifiques séparées par un électrolyte. On distingue les supercondensateurs électrostatiques (pour lesquels l'énergie est stockée grâce au déplacement de charges électroniques et ioniques) et les supercondensateurs électrochimiques, qui rassemblent les caractéristiques d'un supercondensateur électrostatique et d'une batterie plus classique (pour lesquels le stockage de l'énergie repose sur les matériaux des électrodes et les réactions chimiques s'y déroulant).

Accumulateurs électrochimiques

Un accumulateur électrochimique stocke de l'énergie électrique sous forme d'énergie chimique.



← **FIGURE 2**
Schéma d'une batterie lors de la charge et la décharge.

Une batterie est définie comme un assemblage d'accumulateurs reliés entre eux, en série et/ou en parallèle.

Lors de la décharge, l'électrode positive - la cathode - est le siège d'une réaction de réduction (consommation d'électrons). L'électrode négative - l'anode - est le siège d'une réaction d'oxydation (productions d'électrons). Lors de la charge, les réactions s'inversent et l'anode et la cathode de la décharge deviennent réciproquement la cathode et l'anode de la charge (Cf. Figure 2).

En 1800, Volta invente la première pile zinc-cuivre (Zn-Cu). Mais c'est réellement à partir de 1859 que l'histoire du stockage électrochimique industriel démarre avec l'apparition des accumulateurs au plomb. À l'époque, un tel accumulateur se compose de deux feuilles de plomb roulées en spirale, séparées par une toile de lin et plongées dans un bac d'une solution d'acide sulfurique. Au XX^e Siècle, plusieurs technologies voient le jour: mercure, nickel-cadmium, nickel-hydrure métallique (Ni-MH) et lithium-ion, cette dernière technologie ayant valu le prix Nobel de chimie à ses inventeurs. Au cours des vingt dernières années, de nouveaux développements plus ou moins matures voient le jour, telles les technologies métal-air (lithium, zinc ou sodium-air) ou sodium-soufre.

En 2019, en France, on estimait qu'une personne possède en moyenne trois appareils mobiles fonctionnant avec de telles batteries. Selon le *Boston Consulting Group*, le marché mondial de ces batteries électrochimiques dédiées à la mobilité pourrait quadrupler d'ici à 2027. Ceci fait de la recherche et développement dans ce domaine un véritable enjeu stratégique.

En ce qui concerne les batteries lithium-ion, il existe un grand nombre de technologies. Elles se différencient principalement par la composition de leurs électrodes: structure cristallographique, éléments métalliques d'addition. Les deux principales sont les batteries lithium-oxyde de cobalt (LCO) et lithium-nickel-manganèse-cobalt (NMC) qui représentaient en 2017 presque 70% du marché des batteries lithium-ion, avec une forte croissance de la technologie NMC (+28% entre 2016 et 2017). Ces technologies sont utilisées respectivement dans les téléphones et ordinateurs, d'une

part, et les outils électroportatifs, les vélos électriques et les voitures, d'autre part.

Par ailleurs, des technologies à base d'électrolyte gélifié se développent (Li-Po: Lithium-ion polymère ou encore LMP, Lithium-métal-polymère), notamment au profit d'une sécurité *a priori* accrue, de la souplesse potentielle des accumulateurs et de l'utilisation qui peut en découler (véhicule, modélisme...).

Risques liés à l'utilisation d'accumulateurs

De par sa conception et considérant les substances chimiques qui la composent, une batterie électrochimique peut présenter des risques lors de son utilisation ou de son stockage et doit être manipulée avec précaution.

Les batteries au plomb sont constituées de plomb sous forme métallique ou d'oxydes (électrodes) et d'acide sulfurique (électrolyte corrosif). Elles peuvent être source d'électrisation voire d'électrocution. Un contact avec l'électrolyte est possible lors de l'ouverture de la batterie et des dégagements d'hydrogène, responsables de la formation d'atmosphères explosives, surviennent lors des périodes de charge de ces batteries. De plus, ces batteries sont souvent lourdes à manipuler.

Les batteries nickel-cadmium (Ni-Cd) sont interdites depuis 2016, hors appareil d'urgence, du fait de la présence d'une électrode en cadmium (substance pouvant notamment s'avérer mortelle par inhalation, cancérogène pour l'homme et réglementée au niveau européen).

Les batteries nickel-hydrure métallique (Ni-MH) ne présentent pas de composant toxique comme celles au cadmium. Cependant, l'électrolyte est composé de substances corrosives et les opérations de charge et décharge peuvent générer des gaz très inflammables pouvant être responsables de la formation d'atmosphères explosives.

Concernant les batteries lithium-ion (Li-ion), l'électrolyte est le principal facteur de risque. Il contient des sels de lithium, ce qui le rend inflammable et réactif avec l'eau en dégageant des gaz toxiques et corrosifs. En cas d'échauffement, il peut être responsable d'un emballement thermique de la



TYPE DE STOCKAGE		TEMPS DE STOCKAGE (*)	DURÉE DE VIE	PUISSANCE (MW)	RENDEMENT **
Mécanique	Pompage	Jours - Mois	> 40 ans	< 2000	0,65 - 0,8
	Air comprimé	Jours	> 30 ans	5 - 300	0,5 - 0,8
	Inertiel	Minutes - Heures	100 000 cycles	1 - 20	0,85 - 0,95
Thermique	Chaleur sensible	Heures - Années	20 - 30 ans	0,001 - 50	0,5 - 0,85
	Chaleur latente	Heures - Semaines	15 ans	0,001 - 1	0,75 - 0,9
	Thermochimique	Heures - Semaines	500 - 10 000 cycles	0,01 - 1	0,75 - 1
Chimique	Hydrogène	Heures - Mois	5 - 10 ans	0,1 - 1	0,25 - 0,5
	Méthane	-	5 - 10 ans	0,1 - 1	0,25 - 0,35
Électro-chimique	Supercondensateur	Minutes	500 000 cycles	0,01 - 5	0,9 - 0,95
	Plomb	Jours - Mois	300 - 1500 cycles	1 - 50	0,6 - 0,7
	Ni-MH	Jours - Semaines	1 000 - 1500 cycles	-	0,5
	Lithium	Jours - Mois	1 000 - 10 000 cycles	0,001 - 10	0,7 - 0,9

TABEAU 1 → Rentabilité, performance de technologies de stockage d'énergie.

(*) Sans perte de performance.

(**) Le rendement caractérise l'efficacité d'un procédé, '1' étant la valeur maximum.

batterie et causer un incendie voire une explosion. La technologie lithium-ion polymère (Li-Po) se différencie de la technologie Li-ion par la présence d'un électrolyte à base de gel, la rendant moins dangereuse en présence d'eau. Cependant, cette technologie est plus sujette aux courts-circuits, ce qui nécessite une vigilance accrue, notamment en période de charge.

Dans le cas de batteries lithium-métal polymère (LMP), la présence de lithium sous forme de métal constitue le principal risque. Celui-ci réagit violemment au contact de l'eau et de l'air. Cependant, l'électrolyte sous forme de gel solide diminue le risque d'écoulement et de dégagement gazeux. D'une manière générale, les batteries au lithium font courir des risques en cas de perte d'intégrité ou de dégradation de leur enveloppe protectrice.

Pistes de prévention des risques liés aux accumulateurs

Chaque technologie de batterie nécessite des mesures de prévention adaptées.

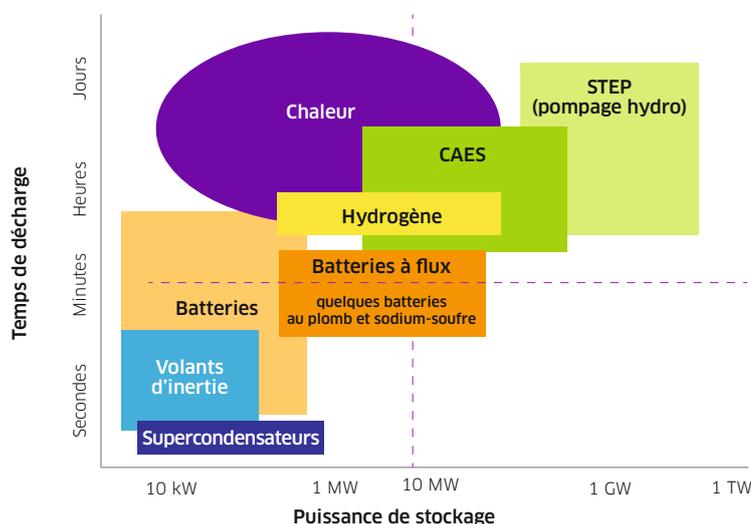
Les principales mesures de prévention pour les accumulateurs au plomb visent à réduire les risques liés à la corrosivité de l'électrolyte et à maîtriser la formation d'atmosphères explosives d'hydrogène lors de la charge. Ces mesures sont détaillées dans un document publié par l'INRS².

Pour les batteries nickel-hydrure métallique (Ni-MH), les mesures de prévention s'apparentent à celles des batteries au plomb, les risques étant similaires.

D'une manière générale, les batteries à base de lithium présentent un profil de sécurité satisfaisant, quand elles sont utilisées pour les usages et dans les conditions pour lesquelles elles ont été conçues. Leur utilisation et leur manipulation doivent donc se faire en respectant les préconisations du fabricant, que ce soit dans un contexte professionnel ou personnel, les risques présentés étant similaires. Les conditions de charge, de décharge, de stockage et de transport indiquées par le fabricant doivent tout particulièrement être respectées.

Ces systèmes électrochimiques sont en revanche beaucoup moins stables en cas d'utilisation abusive ou non recommandée ou encore si le système est détérioré, voire endommagé. Les incidents ou accidents mettant en cause des batteries à base de lithium sont le plus souvent dus à une mauvaise utilisation ou à une dégradation (choc, percement, surcharge, court-circuit...). Un guide de prévention dédié aux batteries au lithium sera publié par l'INRS fin 2020³; il abordera de façon détaillée les risques liés à ce type de batteries et les mesures de

FIGURE 3 Classification des différentes technologies de stockage d'énergie en fonction de leur puissance et du temps de décharge (source: IFPEN).



prévention à mettre en place tout au long du cycle de vie de ces batteries.

Il est primordial de les manipuler avec le plus grand soin, afin d'éviter de les faire tomber, les choquer, les percer... tout endommagement pouvant conduire à un emballement thermique.

Le bon déroulement des phases de charge et de décharge est également capital pour conserver la bonne santé d'une batterie au lithium: un chargeur adapté, un respect des plages de températures et de courant de charge préconisées par le fabricant sont notamment des points indispensables à respecter.

Si une batterie vient à être détériorée ou à présenter des signes d'emballement (température anormalement élevée, gonflement...), elle doit immédiatement être isolée dans un récipient incombustible et hermétique muni d'une soupape de surpression et contenant un matériau absorbant inerte et sec.

Concernant le stockage de batteries au lithium, le niveau des mesures de prévention est à adapter à l'état des batteries (détériorées ou non). Il faut, dans tous les cas, respecter les préconisations du fabricant (plages de température et taux de charge notamment). Un local, une zone dédiée ou une armoire résistant au feu au moins soixante minutes permettent le stockage des batteries non endommagées, tandis que les batteries endommagées sont mises systématiquement à l'écart, conservées dans les récipients évoqués précédemment, eux-mêmes disposés dans une armoire résistant au feu au moins soixante minutes, placée à l'extérieur ou dans un local dédié présentant également des caractéristiques de résistance au feu d'au moins une heure.

Ces mesures de prévention, adaptées aux batteries lithium actuelles et aux connaissances dont on dispose à leur sujet, devront être ajustées en fonction de l'évolution permanente des technologies et des retours d'expérience.

Si la manipulation de batteries à base de lithium ne présente pas de risques importants pour les travailleurs comme pour les utilisateurs quand elles sont utilisées dans des conditions conformes à celles préconisées par le fabricant, le recyclage de ces batteries est beaucoup plus problématique car il peut faire courir des risques professionnels significatifs, liés notamment aux composants métalliques de ces batteries⁴.

Le *Tableau 1* compare certains indicateurs de rentabilité et de performance pour les différentes technologies évoquées dans cet article.

À titre d'exemple, la *Figure 3* propose de comparer pour ces technologies deux paramètres importants lors de leur utilisation: la durée de restitution de l'énergie emmagasinée (temps de décharge) et la quantité d'énergie pouvant être restituée par unité de temps (puissance de stockage).

Conclusion

Le stockage de l'énergie est devenu un enjeu mondial et un défi majeur pour la société du XXI^e Siècle, que ce soit pour répondre à une problématique environnementale – afin d'assurer la transition écologique et énergétique nécessaire – ou pour satisfaire un besoin toujours plus important d'autonomie électrique.

Le stockage mécanique par pompage représente aujourd'hui la principale capacité de stockage d'énergie dans le monde. Cependant, le développement de nouvelles technologies et l'optimisation de technologies existantes se sont intensifiés ces dernières années. Les axes de recherche et développement s'articulent autour de la prise en compte de l'impact environnemental, de la gestion des ressources, de l'optimisation des caractéristiques et des performances des systèmes, de la diminution des coûts tout en assurant une sécurité toujours plus importante. Les contraintes du recyclage liées à l'hétérogénéité des matériaux et la possibilité de seconde vie de certaines technologies, rendent ces développements encore plus complexes et nécessaires. ●

1. Voir notamment sur le site de l'INRS: les pages « métiers » <http://www.inrs.fr/metiers.html> et les pages « risques » <http://www.inrs.fr/risques.html>.

2. Charge des batteries d'accumulateurs au plomb. Prévention du risque explosion, INRS, ED 6120. Accessible sur: www.inrs.fr

3. Batteries lithium: connaître et prévenir les risques. INRS, 2020, à paraître.

4. Un guide de prévention relatif au recyclage et au traitement des batteries en fin de vie est en cours d'élaboration. Une étude en biométrie a débuté à l'INRS en 2017 pour évaluer l'exposition aux métaux lors des procédés de tri, broyage et traitement (pyrométallurgie et hydrométallurgie) des batteries usagées.

BIBLIOGRAPHIE

[1] TVERBERG G. – Our finite world, mai 2012.

Accessible sur: <https://ourfiniteworld.com/2012/03/12/world-energy-consumption-since-1820-in-charts/>

[2] GUSTAVSSON J. – Energy storage technology comparison. Stockholm,

Thèse de Bachelor of Science, 2016. Accessible sur: www.diva-portal.org/smash/get/diva2:953046/FULLTEXT01.pdf

[3] ARABATZIS G., KYRIAKOPOULOS G.L. – Electrical energy storage systems in electricity generation: energy policies, innovative technologies, and regulatory regimes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 56/04, pp. 1044-1067. Accessible sur: www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211501429X

[4] LAVERGNE R., PAVEL I., FAUCHEUX I. – Rapport sur le stockage stationnaire d'électricité. Synthèse et recommandations du thème de l'année 2018 de la Section ICM du CGE, page 30. Accessible sur: https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions_services/cge/stockage_electricite.pdf

[5] SIMPORE S. – Modélisation, simulation et optimisation d'un système de stockage à air comprimé couplé à un bâtiment et à une production photovoltaïque, 2018. Accessible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02059339/document>

[6] ANDREWS J., JELLEY N. – Energy science: principles, technologies and impacts, 2nd ed. Oxford university press, 2013.