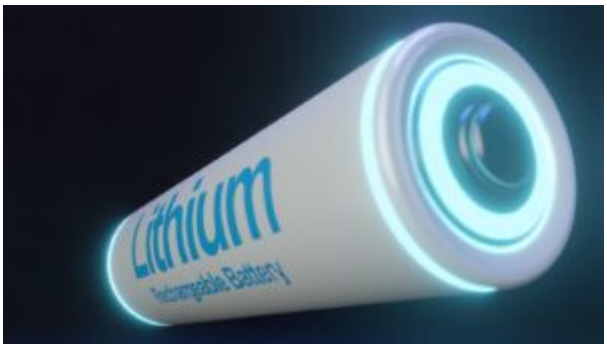
Batteries : l’envers chimique de notre monde électrique

written by Aurore Richel



Dans nos voitures ou nos smartphone, mobiles ou stationnaires, au lithium ou au plomb, les batteries semblent omniprésentes dans notre quotidien, sous des formes, des configurations et des compositions différentes. On les associe aux métaux rares, à la transition énergétique ou au recyclage. Éléments indispensables dans notre monde en quête d’énergie propre, les batteries semblent voir leur marché en expansion. Pourtant, rares sont ceux capables d’expliquer ce qu’est une batterie et pourquoi il existe autant d’architectures et de compositions différentes sur le marché.

Est-ce qu’une batterie stationnaire fonctionne différemment d’une batterie mobile ? Est-ce qu’il faut obligatoirement qu’elle contienne du lithium pour obtenir de hautes performances ? Est-ce que toutes les batteries offrent les mêmes capacités de stockage et les mêmes contraintes d’usage ? Et finalement, question centrale : comment fonctionne une batterie ?

Ce n’est pas parce que certaines technologies semblent acquises qu’elles sont forcément comprises par tous. C’est bien pour cette raison que je vous invite à plonger dans ce dossier qui explique, de la manière la plus simple possible, les mystères, enjeux et menaces des batteries.

Prologue

Irak, 1938. Il fait très chaud à Khujut Rabu, un petit village à quelques kilomètres de Bagdad. Pourtant, l’archéologue allemand Wilhelm König continue son travail de fouille, imperturbable. Il vient de mettre à jour un pot en argile d’une dizaine de

centimètres de long. Ce n'est pas une jarre conventionnelle. Celle-ci contient un cylindre de cuivre soigneusement ajusté, à l'intérieur duquel est insérée une tige de fer, le tout scellé à la base par une sorte de bouchon de bitume. Le récipient présente des signes de corrosion et des traces de vinaigre semblent encore présentes dans le fond du pot.[1]

En cette période, les archéologues sont nombreux à fouiller ces terres d'Irak, foyers d'antiques sites mésopotamiens, à la recherche de preuves d'anciens récits bibliques comme le déluge et l'arche de Noé. Mais ce que Wilhelm König vient de mettre au jour semble bien plus intrigant encore. Ce que König vient de découvrir ressemble en tous points à une sorte de « batterie électrique ».

Cela semble pourtant assez difficile à expliquer. Comment un dispositif daté de plus de deux siècles avant Jésus Christ aurait pu être utilisé pour générer un courant électrique ? Et surtout pour faire quoi ? L'objet, aussi surprenant qu'il soit, n'est pas unique. Une dizaine d'autres exemplaires ont été découverts dans d'autres sites de fouilles entourant la région de Bagdad. Certains estiment que ces « batteries » d'un autre temps auraient pu être utilisées à des fins médicinales, d'autres pensent qu'elles auraient pu servir à la pratique de rituels magiques. Une autre hypothèse serait que ces « batteries de Bagdad » aient été employées pour la galvanoplastie, une technique consistant à transférer, sous l'action d'un courant électrique, une fine couche de métal précieux sur une surface métallique moins « noble ». On aurait ainsi pu les utiliser pour déposer de fines couches d'argent à la surface de bijoux ou d'éléments de décoration. Quoi qu'il en soit, le mystère reste entier. Les batteries de Bagdad sont, encore aujourd'hui, de vraies énigmes pour les archéologues du monde entier.[2]

Batterie, pile, accumulateur : de quoi parle-t-on ?

Quand on lit les médias, des articles généralistes ou même des stratégies d'entreprises, on se retrouve souvent face à des termes tels que « pile » ou « batterie » dont il est complexe de comprendre la différence. Parfois, ces termes sont même employés de manière interchangeable, ce qui peut limiter la compréhension des technologies concernées ainsi que des enjeux et perspectives qui

leur sont associés. Cette difficulté est en partie renforcée par le fait que l'anglais ne distingue pas toujours ces notions avec la même précision que le français, le terme « *battery* » pouvant désigner aussi bien une « pile » qu'une « batterie »

Les deux termes « pile » et « batterie » ne sont pas vraiment des synonymes. Ils désignent des réalités techniques distinctes, reposant néanmoins sur le même principe.

La « batterie de Bagdad » découverte par l'archéologue Willem König est en réalité une **pile électrique** (**Figure 1**). C'est un dispositif qui a la capacité de convertir l'énergie d'une réaction chimique en énergie électrique. Les réactions qui se produisent dans le dispositif mettent en mouvement des électrons, créant ainsi un courant électrique. La pile de Bagdad aurait fonctionné grâce à l'association de deux métaux différents, le fer et le cuivre, plongés dans un liquide acide qui facilite le transport des électrons. Le fer se corrodait lentement, libérant des électrons qui circulaient vers le cuivre. Ce déplacement d'électrons générait un courant électrique, exactement comme dans une pile moderne, mais avec une tension beaucoup plus faible.

Une pile électrique possède une réserve limitée de réactifs chimiques. Lorsque ceux-ci sont consommés et que la réaction chimique est terminée, elle ne peut donc plus produire de courant. La pile est alors déchargée et n'est plus fonctionnelle. Outre la pile de Bagdad, qui a donc eu un temps de vie limité, des exemples plus récents de piles électriques sont les piles alcalines AA ou AAA utilisées dans les télécommandes ou dans certains jouets.

Contrairement à la pile électrique, un **accumulateur**, quant à lui, est rechargeable. Le principe de fonctionnement est le même que pour une pile, à savoir qu'une réaction chimique produit une énergie électrique. Cependant, contrairement à la pile, la réaction chimique qui s'y produit peut être inversée grâce à un apport d'énergie électrique extérieur. Une fois déchargé, l'accumulateur peut donc être rechargé et réutilisé de nombreuses fois. Les accumulateurs lithium-ion, donc rechargeables, qui équipent certaines dispositifs électroniques sont des exemples bien connus d'accumulateurs.

Enfin, une **batterie** est un assemblage soit de plusieurs piles soit de plusieurs accumulateurs qui sont reliés entre eux pour fournir davantage d'énergie. Par exemple, la batterie d'une voiture électrique est constituée de centaines, voire milliers, de cellules électrochimiques regroupées dans un même ensemble. Il existe donc des cas de batteries non rechargeables. Ces cas sont souvent plus anciens, moins utilisés, et englobaient, par exemple, des blocs de piles zinc-carbone utilisés dans certains équipements portables ou militaires, ainsi que des ensembles de piles scellées destinés à des dispositifs de signalisation ou d'éclairage de secours où la recharge n'était pas envisagée. Néanmoins, la majorité des batteries aujourd'hui mises sur le marché sont **rechargeables**.

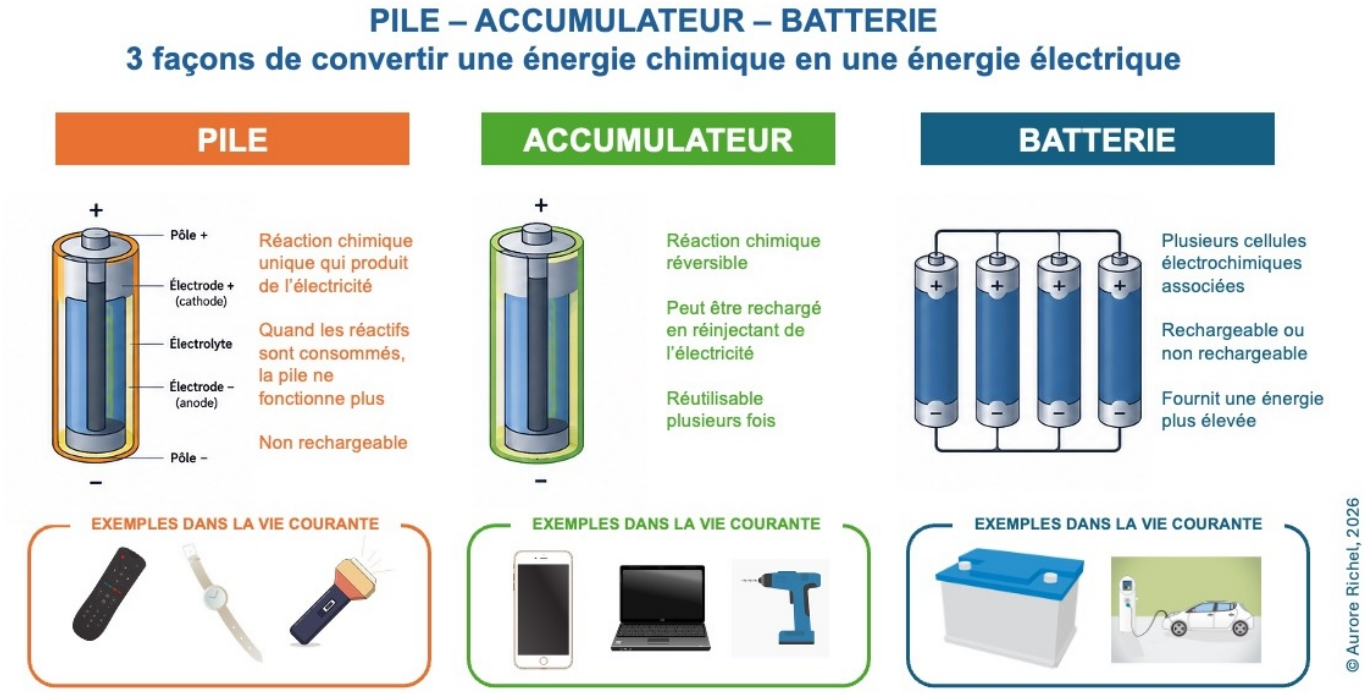


Figure 1. Illustration schématique de la différence entre une pile électrique, un accumulateur et une batterie

De la pile de Bagdad à la batterie Tesla : des siècles de perfectionnement

Outre le cas spécifique de la pile de Bagdad, il faut attendre le 18ème siècle pour que les savants s'intéressent à comprendre pourquoi et comment certaines réactions chimiques sont amenées à produire un courant électrique.

Le début de l'électrochimie, c'est-à-dire ce volet de la chimie qui étudie le lien entre les réactions chimiques et l'électricité, est

associé aux travaux du médecin italien Luigi Galvani. Celui-ci avait observé que les pattes d'une grenouille disséquée se contractaient quand elles étaient reliées par deux métaux différents. Galvani avait interprété ce phénomène comme la manifestation d'une « électricité animale » produite par les tissus vivants. Ses expériences avaient suscité un vif intérêt dans la communauté scientifique et avaient ouvert un débat sur l'origine de cette électricité.[3]

Parmi les savants qui s'intéressaient à ces observations figurait le physicien italien Alessandro Volta. Contrairement à Galvani, Volta était convaincu que l'électricité ne provenait pas des muscles des grenouilles, mais plutôt de la mise en contact de deux métaux de nature distincte reliés entre eux par les tissus de l'animal qui servaient de milieu conducteur. Voulant valider sa théorie, Volta avait empilé de manière alternée des disques de zinc et de cuivre séparés par une couche de tissus imbibés d'une solution conductrice (**Figure 2a**). Le dispositif s'était révélé capable de produire un courant électrique continu de manière relativement stable. Volta venait ainsi de mettre au point la **pile électrique**, nom tiré de cet empilement de métaux. Cette invention, datée de 1800, avait marqué la naissance officielle de la pile électrique et constitue, encore aujourd'hui, un évènement majeur dans l'histoire des sciences et techniques.



Figure 2. (**a, gauche**) Pile électrique de Volta exposée au musée pour l'histoire de l'université de Pavie. Markkv, CC BY-SA 4.0 <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0>, via Wikimedia Commons (**b, droite**) Pile électrique de Daniell exposée au National

Museum of American History, Washington, DC, USA. (domaine public)

Même si elle était capable de produire un courant électrique satisfaisant, la pile de Volta présentait quelques défauts dont une diminution progressive de ses performances. Pour pallier à cet inconvénient, de nombreux chercheurs avaient tenté d'améliorer son fonctionnement. En 1836, le chimiste britannique John Daniell avait mis au point une variante, baptisée pile de Daniell, au moment de l'apparition du télégraphe et de la nécessité de disposer de sources de courant portables, sûres et constantes. Le dispositif se présentait sous la forme de deux récipients séparés, dans l'un, du zinc dans une solution de sulfate de zinc, et dans l'autre, du cuivre dans une solution de sulfate de cuivre (**Figure 2b**). Cette nouvelle pile avait démontré des performances supérieures à celles de la pile de Volta, et s'était révélé fonctionnelle sur une plus longue durée.

Au cours du 19ème siècle, les chercheurs s'étaient attachés à améliorer les performances de ces piles électriques. Ils avaient testés de nouveaux matériaux, de nouvelles configurations, et les capacités à fournir du courant électrique de manière stable avaient augmenté. Une étape importante avait été franchie en 1866 avec la pile mise au point par le Français Georges Leclanché. Cette pile, connue également sous le nom de pile sèche ou pile saline, fonctionnait grâce à une tige en zinc reliée à du dioxyde de manganèse, le tout dans un milieu conducteur solide, ce qui la rendait transportable en toute sécurité. La pile Leclanché allait ainsi être à l'origine des « piles crayons » qui nous sont si familières.

La totalité des dispositifs électrochimiques conçus à cette époque reposait sur le concept de pile électrique (aussi appelé en langage scientifique rigoureux **générateur primaire**). Cela signifie qu'une fois les réactifs complètement consommés, la pile n'était plus opérationnelle et ne pouvait plus être utilisée. Une avancée décisive avait donc été réalisée dans le courant de la seconde moitié du 19ème siècle lorsque le physicien français Gaston Planté avait mis au point le **premier accumulateur**, donc rechargeable. Son dispositif reposait sur des électrodes de plomb plongées dans une

solution d'acide sulfurique. Contrairement aux piles précédentes, les réactions chimiques mises en jeu pouvaient être inversées grâce à l'apport d'une énergie électrique extérieure. L'accumulateur de Planté inaugurait ainsi une nouvelle famille de dispositifs électrochimiques capables de stocker l'énergie et d'être réutilisés à de nombreuses reprises.[4] Une vingtaine d'années plus tard, l'ingénieur français Camille Alphonse Faure avait considérablement amélioré cette technologie en augmentant la surface active des électrodes.[5] Ces innovations avaient rendu possible la fabrication industrielle d'accumulateurs de grande capacité et avaient contribué au développement des premières applications de traction électrique ainsi qu'à l'éclairage autonome.

La fin du 19ème et le début du 20ème siècles avaient marqué le développement d'une gamme plus large d'accumulateurs (appelés dans le langage scientifique **générateurs secondaires**). En 1901, l'Américain Thomas Edison et le Suédois Waldemar Jungner avaient mis au point l'accumulateur nickel-fer utilisés dans des conditions difficiles, notamment pour l'éclairage et la traction dans les mines de charbon. Jungner avait aussi été à l'initiative de l'accumulateur nickel-cadmium (performant mais toxique en raison de la présence de cadmium) qui s'est perfectionné avant d'être commercialisé pour des usages domestiques après 1946 (**Figure 3**).



Figure 3. (**a, gauche**) Accumulateur nickel-cadmium (Ni-Cd), premiers exemplaires (domaine public[6]). (**b, droite**) Accumulateurs Ni-Cd

sous des formes commerciales plus récentes (Oisacc, CC BY-SA 4.0 <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0>, via Wikimedia Commons)

Au cours du 20ème siècle, les progrès de l'électrochimie avaient permis d'améliorer continuellement les performances des piles et des accumulateurs. Les piles sèches avaient remplacé progressivement les modèles à électrolyte liquide, plus encombrants et moins pratiques, tandis que les piles alcalines s'étaient imposé grâce à leur meilleure capacité énergétique et à leur durée de vie accrue. À partir des années 1970, les recherches s'étaient tournées vers le lithium, un métal exceptionnellement léger et doté d'un très fort potentiel électrochimique. Ses propriétés, supérieures à celles des matériaux utilisés jusqu'alors, avaient ouvert la voie à une nouvelle génération d'accumulateurs offrant une densité énergétique sans précédent. Les travaux de Stanley Whittingham, réalisés avec le soutien du groupe Exxon dans le contexte des premiers chocs pétroliers, avaient abouti au développement des **premiers accumulateurs rechargeables au lithium.**[7] Les avancées réalisées ensuite par John B. Goodenough puis Akira Yoshino avaient permis la mise au point des accumulateurs lithium-ion modernes, plus sûrs, plus stables et plus durables. Ces travaux ont valu à leurs auteurs le prix Nobel de chimie en 2019.[8] Ils ont conduit également au développement des batteries lithium-ion modernes, qui révolutionnent le stockage de l'énergie et trouvent des applications dans les appareils électroniques portables, les systèmes de stockage stationnaires et les véhicules électriques.

Une diversité pour répondre aux exigences d'usages

Qu'il s'agisse des piles, des accumulateurs ou des batteries, la diversité des chimies, des compositions et des tensions que l'on peut rencontrer sur le marché résulte d'un développement technologique progressif, construit par améliorations successives sur plus de deux siècles. Au-delà de cette évolution historique, la variété des dispositifs électrochimiques encore utilisés aujourd'hui répond avant tout aux besoins spécifiques de chaque application en termes de puissance requise, d'autonomie, d'encombrement disponible ainsi que de nécessité ou non de rechargeabilité (**Figure 4**). Par exemple, une montre n'a pas les

mêmes exigences qu'une lampe de poche utilisée à des fins domestiques en termes de puissance et d'espace disponible pour accueillir le dispositif électrochimique. De la même manière, une voiture électrique n'a pas les mêmes besoins en énergie ni en matière de recharge qu'un outil électrique de bricolage.

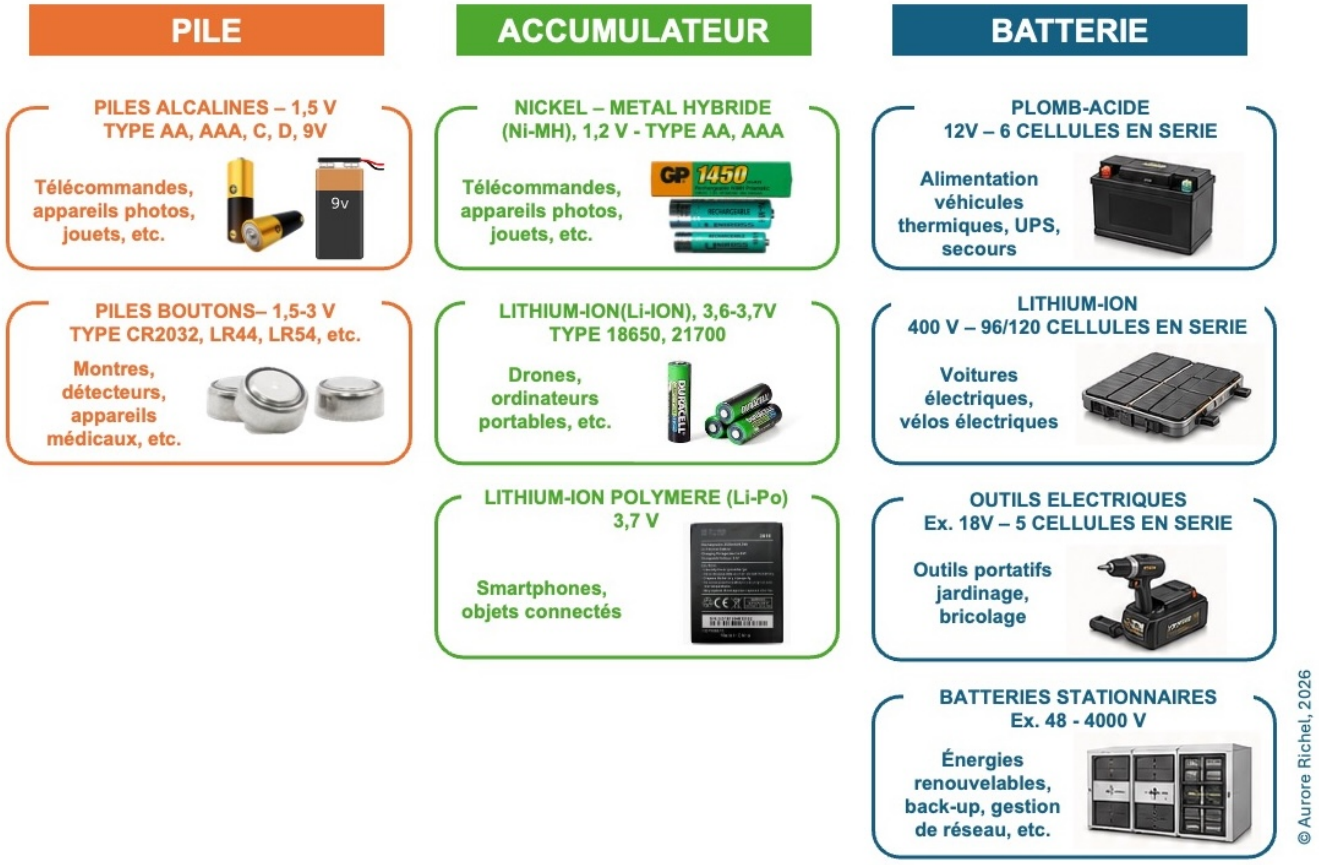


Figure 4. Représentation des différents modèles électrochimiques commercialisés en Europe (non exhaustif)

Les batteries : la quête de l'énergie la plus grande possible

Les batteries dont il est fréquemment question dans les médias, qu'il s'agisse des véhicules électriques ou des systèmes de stockage de l'énergie, sont en réalité des **assemblages de plusieurs accumulateurs électriques**. Rigoureusement, il conviendrait donc de désigner ces dispositifs rechargeables sous l'appellation « **batterie d'accumulateurs** ». Toutefois, dans le langage courant, le mot « batterie » est employé seul et est devenu l'appellation usuelle de ces dispositifs.

Du point de vue de sa conception, une batterie contient plusieurs cellules qui sont les éléments électrochimiques unitaires (accumulateurs). Les cellules peuvent être regroupées au sein d'un

module reliées entre elles en série ou en parallèle. Ce module peut lui-même être assemblé à d'autres modules au sein d'un pack, c'est-à-dire la batterie complète intégrant également les dispositifs de protection, de refroidissement et de gestion électronique (**Figure 5**). La modularité des batteries provient de la nature des accumulateurs employés (c'est-à-dire leur composition), du nombre de ces accumulateurs au sein des modules et du nombre de modules au sein du pack et de la manière dont ils sont reliés les uns aux autres. Outre l'aspect chimique, lié aux réactions au sein des accumulateurs, la configuration d'une batterie a une incidence sur sa capacité énergétique totale, mais aussi sur sa forme (plate, cylindrique, etc.). Cette modularité permet de concevoir des batteries adaptées à des usages très variés, allant des appareils électroniques portables aux véhicules électriques, en passant par les installations de stockage stationnaire destinées à soutenir les réseaux électriques.

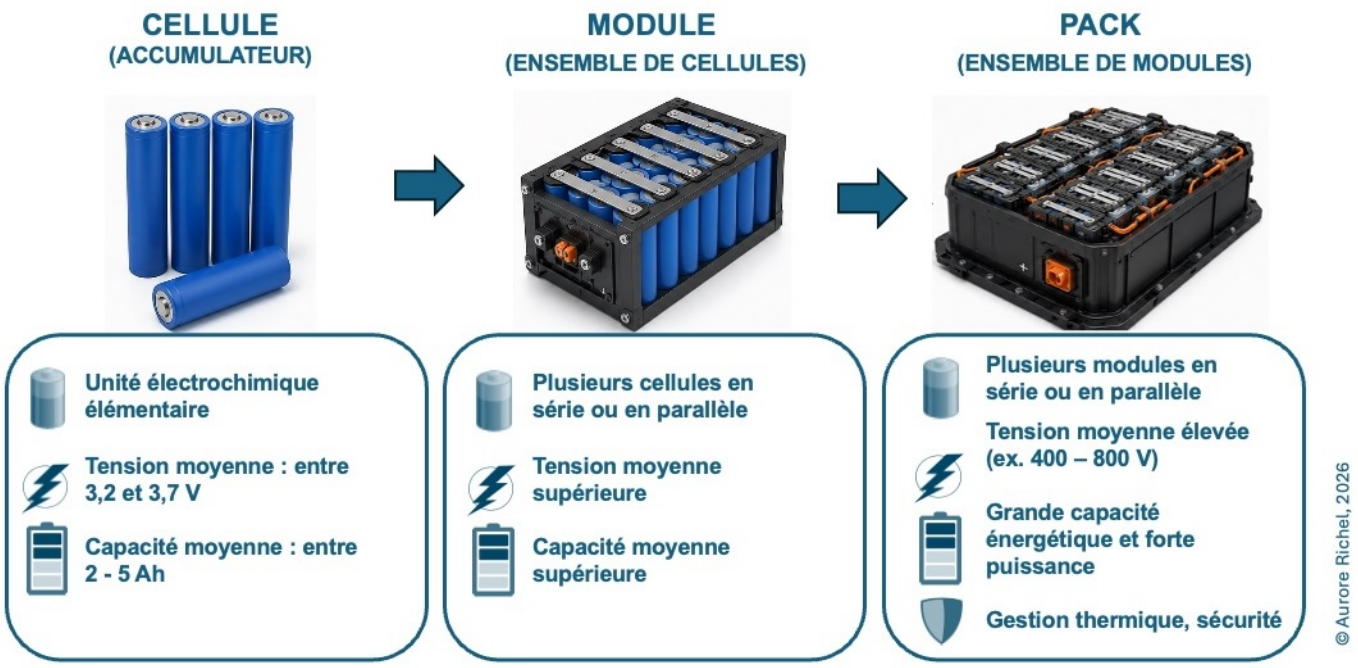


Figure 5. Représentation schématique d'une « batterie » et de sa conception

Une diversité dominée par les systèmes lithium-ion

Les batteries les plus populaires sont probablement les **batteries lithium-ion**. Elles sont donc constitués d'accumulateurs unitaires de type lithium-ion (Li-ion). Ceux-ci sont composés de trois éléments principaux : deux « bornes » (c'est-à-dire des électrodes

appelées respectivement cathode et anode entre lesquelles vont circuler les électrons, donc le courant électrique), l'une composée d'un oxyde métallique de lithium et l'autre formée de graphite (un matériau carboné capable d'intercaler le lithium), plongeant dans un milieu conducteur (formé d'un sel de lithium). Un séparateur polymère microporeux est interposé entre les deux électrodes afin d'éviter tout contact électrique direct tout en permettant la circulation des ions lithium.[9]

Ces batteries Li-ion fonctionnent grâce au déplacement des ions lithium entre les deux électrodes. Lors de la **décharge**, la batterie fournit de l'énergie à un appareil (par exemple un ordinateur). Les ions lithium se déplacent à l'intérieur de la batterie d'une électrode vers l'autre. En parallèle, des électrons circulent dans le circuit externe (l'ordinateur). Ce flux d'électrons constitue le courant électrique qui alimente l'appareil. Le mouvement des ions à l'intérieur permet de maintenir l'équilibre des charges et rend ce processus possible. Lors de la **charge**, un chargeur externe impose un courant électrique dans le sens inverse. Cela entraîne le retour des ions lithium vers leur électrode d'origine, tandis que les électrons circulent également en sens inverse dans le circuit externe. L'énergie électrique est alors stockée sous forme d'énergie chimique dans les matériaux des électrodes.

Ainsi, la batterie Li-ion (comme toutes les batteries rechargeables) fonctionne comme un **système réversible**. En clair, elle convertit l'énergie chimique en énergie électrique lors de la décharge, et inversement lors de la charge.

Outre le lithium utilisé pour assurer le transport des charges, il convient de mentionner que les batteries actuelles intègrent également d'autres métaux. Ces métaux incluent le nickel, du cobalt et/ou du manganèse dans la conception de la cathode. On peut aussi y retrouver du fer dans la cathode des batteries lithium-fer-phosphate. Ces éléments permettent d'optimiser les performances (énergie stockée, puissance, durée de vie, sécurité), mais leur disponibilité et leurs propriétés influencent fortement le comportement de la batterie.

Cependant, les batteries ne se limitent pas au lithium-ion. Il

existe plusieurs grandes autres familles de batteries. Parmi elles, on retrouve les **batteries au plomb**, les plus anciennes encore utilisées, qui sont surtout employées pour le démarrage des véhicules thermiques. Les batteries nickel-cadmium et **nickel-métal hydrure** (Ni-MH) ont été largement utilisées avant l'essor du lithium-ion, notamment dans l'électronique et les premières voitures hybrides.[10] Aujourd'hui, le lithium-ion domine largement les usages grâce à sa forte densité d'énergie et sa légèreté, mais il coexiste avec d'autres technologies comme les batteries **lithium-polymère**, proches des Li-ion mais plus flexibles.

En parallèle, de nouvelles solutions émergent pour répondre aux limites des matériaux actuels. Les batteries **sodium-ion** cherchent à remplacer partiellement le lithium en utilisant un élément plus abondant et moins coûteux.[11] Les batteries à électrolyte solide promettent plus de sécurité et de meilleures performances, tandis que les **batteries à flux redox** sont développées pour le stockage à grande échelle sur les réseaux électriques.[12] D'autres systèmes comme le **lithium-soufre** ou le **lithium-air** sont encore au stade de recherche mais pourraient augmenter fortement les capacités de stockage.[13]

Les métaux : le « fer de lance » des batteries ?

La diversité technologique des batteries met en évidence un point essentiel, à savoir que les métaux sont indispensables aux batteries modernes, mais qu'ils constituent aussi un enjeu stratégique majeur. Si on analyse le cas des batteries lithium-ion embarquées dans les véhicules électriques, et si on se focalise sur 2 types de batteries Li-ion fréquemment utilisées, à savoir les NMC (qui incorporent aussi du nickel, manganèse et cobalt dans la cathode) et les LFP (lithium-fer-phosphate), on constate que les métaux représentent une part prépondérante et de la masse totale de la batterie.[14] Cette observation est particulièrement marquée lorsqu'on exclut de l'analyse le poids de l'électrolyte ainsi que des plastiques utilisés pour le châssis extérieur de la batterie (**Figure 6**).

Au-delà des matériaux actifs présents dans les électrodes, d'autres métaux jouent également un rôle essentiel dans l'architecture de la batterie. On notera aussi la présence d'aluminium et d'acier qui

entrent également dans la fabrication du boîtier, des structures de renfort et des systèmes de protection mécanique destinés à garantir l'intégrité de la batterie en conditions d'utilisation normales ou en cas d'accident.

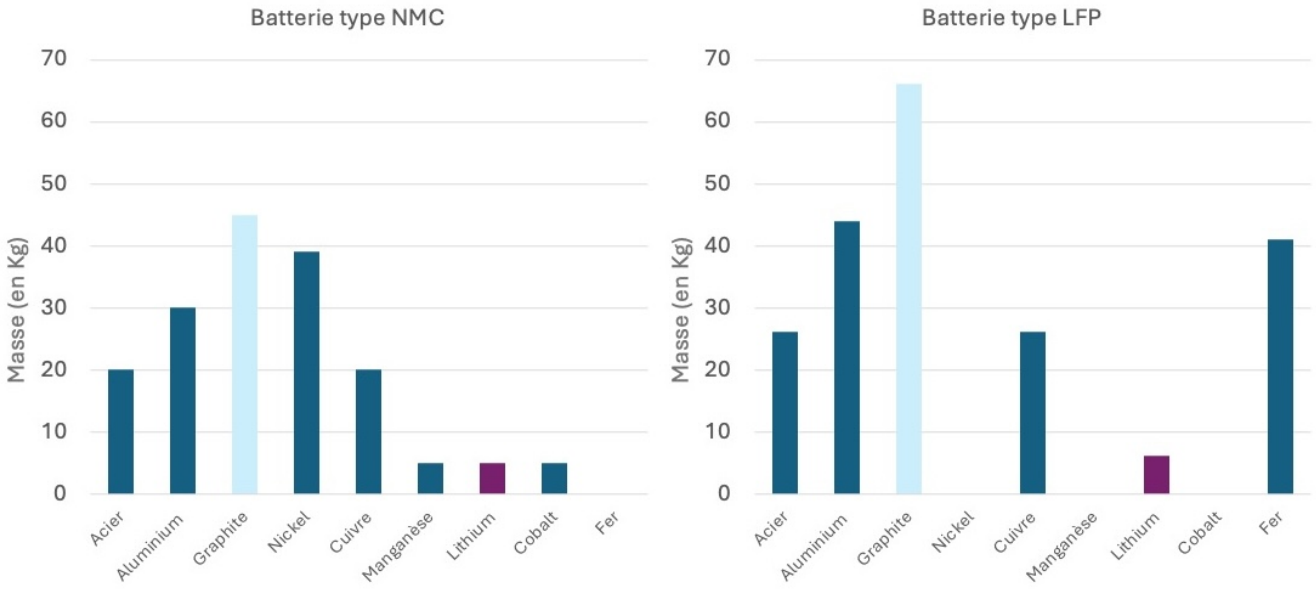


Figure 6. Composition de deux systèmes lithium-ion. (**a, gauche**) Batterie « NMC », (**b, droite**) Batterie LFP. Les poids de l'électrolyte et des matériaux polymères ne sont pas renseignés.

Un point essentiel à renseigner est que, **contrairement aux idées reçues, le lithium n'est pas le composant principal dans les batteries lithium-ion actuelles**.

Des métaux critiques au cœur de nos enjeux énergétiques

Parmi les métaux utilisés dans la fabrication des cellules de batteries, certains présentent l'avantage d'être abondants, largement disponibles et relativement peu coûteux. C'est notamment le cas du fer, quatrième élément le plus abondant de la croûte terrestre. Le fer entre, notamment, dans la composition des batteries lithium-fer-phosphate (LFP), dont la part de marché représente aujourd'hui près de la moitié des ventes mondiales de véhicules électrique.[15]

À l'inverse, le lithium, le nickel et le cobalt sont généralement considérés comme des **matières premières critiques**. Cette criticité ne résulte pas principalement de leur rareté géologique, mais de la forte concentration géographique de leur extraction, et surtout des

étapes de raffinage et de fabrication des matériaux de batteries.

Dans les batteries NMC, la chaîne d'approvisionnement combine lithium, nickel et cobalt. L'extraction du lithium est dominée par l'Australie, le Chili et la Chine, qui détiennent ensemble plus de 85 % de la production mondiale. Le nickel est aujourd'hui principalement produit en Indonésie (plus de 50 %), suivie des Philippines et de la Russie. Le cobalt est très fortement concentré, avec environ 75 % de l'extraction mondiale réalisée en République démocratique du Congo. Toutefois, le point critique se situe davantage en aval : **la Chine domine une large part du raffinage et de la transformation chimique de ces matériaux**, avec des parts dépassant souvent 60 à 70 % selon les matériaux de batterie, ce qui renforce la dépendance globale de la chaîne NMC.[16]

Les batteries LFP réduisent fortement la dépendance au nickel et au cobalt en s'appuyant sur le fer et le phosphate. Cependant, elles déplacent la contrainte vers la chaîne de transformation industrielle. Selon l'Agence Internationale de l'Energie, la Chine représente aujourd'hui plus de 98 % de la production mondiale des matériaux cathodiques LFP et des cellules LFP. Elle concentre également environ 75 % de la production mondiale d'acide phosphorique purifié de qualité batterie, un intrant essentiel. Ainsi, même si les ressources minérales de base sont abondantes et relativement diversifiées, les étapes de raffinage chimique et de fabrication des matériaux actifs sont fortement concentrées.

Les batteries LMFP, qui ajoutent du manganèse pour améliorer les performances énergétiques, illustrent encore cette logique de dépendance en aval. Si l'extraction du manganèse est relativement diversifiée à l'échelle mondiale, sa transformation en sulfate de manganèse de qualité batterie est très concentrée, avec environ 95 % de la production mondiale réalisée en Chine. Cela crée un point de vulnérabilité similaire à celui observé pour d'autres intrants transformés.[17]

Les enjeux de sécurité d'approvisionnement ne dépendent pas uniquement de la disponibilité des ressources minières, mais surtout de la localisation des capacités de raffinage, de

transformation chimique et de fabrication des composants de batteries. **Selon les technologies, la dépendance se déplace** : les batteries NMC sont plus exposées aux chaînes lithium-nickel-cobalt, tandis que les batteries LFP et LMFP réduisent ces dépendances mais renforcent la concentration sur les capacités industrielles de transformation, en particulier en Chine.

Le graphite : un composant crucial des batteries modernes entre les mains de la Chine

Outre les métaux, le graphite constitue un matériau essentiel des nouvelles batteries, puisqu'il est maintenant le principal matériau utilisé pour l'anode dans la grande majorité des cellules commerciales (voir **Figure 6**). Contrairement à des métaux comme le lithium ou le cobalt, sa criticité ne provient pas tant de sa rareté géologique que de la forte concentration de ses capacités de transformation en graphite adapté aux batteries.[18]

L'extraction « minière » du graphite est relativement diversifiée, avec une production répartie entre plusieurs pays, notamment la Chine, le Mozambique, le Brésil et Madagascar.[19] Cependant, cette diversité apparente masque une concentration beaucoup plus forte dans les étapes de transformation. Le graphite naturel doit en effet être purifié et traité de manière spécifique pour atteindre une qualité dite « batterie », un processus industriel lourd et énergivore. Aujourd'hui, la Chine domine très largement cette étape de transformation. Le pays représente **plus de 90% de la production mondiale** de graphite de qualité batterie. Cette concentration est particulièrement problématiques dans le cas des batteries lithium-ion de type NMC ou LFP, qui dépendent toutes du graphite pour leur anode. Ainsi, même si les batteries LFP réduisent la dépendance au nickel et au cobalt, elles ne réduisent pas la dépendance au graphite.

La montée en puissance des véhicules électrique pourrait fortement accroître la pression sur les chaînes d'approvisionnement du graphite, avec une demande mondiale qui pourrait être multipliée par 3 à 4 d'ici 2035 selon les scénarios.[20] Dans ce contexte, la dépendance à un acteur dominant dans la transformation, à savoir la Chine, constitue un risque structurel comparable, voire supérieur à celui observé pour certains métaux de cathode.

Enfin, les alternatives comme les anodes en silicium ou les technologies sodium-ion pourraient à terme réduire cette dépendance, mais elles restent encore limitées en termes de maturité industrielle.[21]

Recycler pour se réapproprier l'approvisionnement ?

Recycler les batteries est souvent présentée comme une solution capable de réduire notre dépendance aux métaux critiques et au graphite.[22] Pourtant, lorsqu'on observe en détail la chimie des matériaux et les procédés industriels, on comprend que cette promesse est réelle mais **structurellement limitée**. Une batterie en fin de vie n'est pas un bloc homogène que l'on refond, mais un assemblage très complexe de matériaux fortement intégrés (aluminium, acier, plastiques, électrolytes organiques, cuivre des collecteurs, et surtout des matériaux actifs des électrodes intimement mélangés). C'est précisément cette complexité d'assemblage et cette hétérogénéité de composition qui rendent le recyclage difficile à grande échelle.

Le processus commence par une étape de sécurisation indispensable, car les cellules conservent une énergie résiduelle susceptible de provoquer des emballements thermiques. Vient ensuite le démontage des modules et des packs, puis un broyage contrôlé qui produit une fraction poudreuse appelée "**black mass**". Cette black mass contient les matériaux les plus intéressants du point de vue du recyclage, mais reste un mélange dont les composants d'intérêt (métaux, graphite) restent très difficiles à individualiser et à isoler.

Pour récupérer les métaux, l'industrie s'appuie aujourd'hui principalement sur l'hydrométallurgie, qui consiste à dissoudre cette matière dans des solutions acides afin d'extraire sélectivement le cobalt, le nickel, le manganèse ou encore le lithium. Dans certains cas, la pyrométallurgie est utilisée en amont, mais elle impose des températures très élevées et conduit à une perte importante de certains éléments légers comme le lithium, ainsi qu'à la destruction quasi totale du graphite. C'est ici que se joue une différence essentielle entre les matériaux à savoir que **tous ne se recyclent pas avec la même efficacité ni la même valeur économique**.[23]

Les métaux comme le **nickel** et le **cobalt** sont actuellement les plus “rentables” à recycler. Leur valeur élevée rend les procédés industriels viables, et les taux de récupération peuvent atteindre 80 à 95 % dans les meilleures installations. Le **lithium** est plus problématique. En effet, même s’il peut être récupéré, sa purification jusqu’à une qualité compatible avec de nouvelles batteries reste complexe et coûteuse, ce qui limite les rendements effectifs, souvent compris entre 50 et 80 %. Le **manganèse**, quant à lui, est techniquement récupérable mais rarement valorisé en priorité, car sa valeur économique est plus faible.

Le cas du **graphite** illustre encore plus clairement les limites actuelles du recyclage. Ce matériau constitue pourtant l’essentiel de l’anode dans la quasi-totalité des batteries lithium-ion, mais il est très difficile à isoler sans le dégrader. Les procédés de pyrométallurgie le détruisent presque entièrement, tandis que les procédés hydrométallurgiques permettent rarement de le récupérer sous une forme suffisamment structurée pour être réutilisée dans des anodes haute performance. En pratique, sa valorisation effective reste marginale à l’échelle industrielle, souvent inférieure à 20 %. Cela signifie que, paradoxalement, l’un des matériaux les plus massifs des batteries est aussi l’un des moins bien recyclés.[24]

Cette asymétrie révèle un point fondamental qui est que **la rentabilité du recyclage dépend moins de la quantité de matériau présent que de sa valeur économique et de sa facilité de récupération**. Les procédés actuels sont donc fortement optimisés pour récupérer les métaux de cathode à forte valeur, ce qui explique pourquoi les batteries riches en nickel et cobalt sont mieux adaptées au recyclage que les chimies comme les LFP, où les matériaux sont plus abondants mais moins valorisables.

Sur le **plan énergétique**, ces procédés ne sont pas neutres. L’hydrométallurgie consomme typiquement quelques dizaines de mégajoules par kilogramme de batterie traitée, avec des coûts industriels de l’ordre de quelques dollars par kilogramme, très dépendants des prix des métaux récupérés. La pyrométallurgie, bien que robuste, est plus énergivore en raison des températures élevées nécessaires à la fusion, et elle est moins efficace pour récupérer

les éléments légers comme le lithium. Dans tous les cas, le recyclage reste aujourd'hui économiquement corrélé aux métaux critiques à forte valeur, ce qui limite sa viabilité dans un monde où les batteries évoluent vers moins de cobalt et de nickel.[25]

C'est ici que l'analyse devient géopolitique autant que chimique. Le recyclage permet effectivement de réduire une partie de la dépendance aux chaînes minières primaires, mais il **ne supprime pas les tensions d'approvisionnement**. D'une part, les volumes disponibles de batteries en fin de vie restent encore insuffisants pour couvrir la croissance exponentielle de la demande mondiale, qui pourrait être multipliée par trois à cinq d'ici 2035 selon l'Agence internationale de l'énergie. D'autre part, les capacités de recyclage elles-mêmes reposent sur des infrastructures industrielles concentrées et sur des étapes de raffinage qui restent complexes et énergivores.

Au final, le recyclage ne remplace pas l'extraction primaire, mais il s'y ajoute. Il permet de réintroduire une partie des matériaux dans la chaîne de valeur, mais dans un système qui reste structurellement dépendant de la montée en puissance de la demande et de la localisation des capacités de transformation. Même lorsqu'il fonctionne bien, le recyclage agit ainsi davantage comme un mécanisme de **ralentissement de la dépendance** que comme une véritable réappropriation matérielle.

Mobiles *vs.* stationnaires : la nouvelle architecture industrielle des batteries

Cette réalité « approvisionnement-recyclage » impose à mettre en évidence une distinction importante entre les batteries destinées aux applications mobiles et celles destinées à des usages stationnaires.

Dans les **usages mobiles**, notamment l'automobile, les contraintes dominantes sont la densité énergétique, le poids, la sécurité et le coût. Cela favorise des batteries comme les NMC ou les LFP, où les arbitrages sont dictés par la performance et l'industrialisation massive.

Dans les **usages stationnaires**, au contraire, les contraintes sont

différentes. Le poids et le volume importent moins, tandis que la durée de vie, le coût au kilowattheure et la disponibilité des matériaux deviennent des concepts centraux. Cela ouvre la voie à des technologies plus variées, incluant les LFP, mais aussi des systèmes sodium-ion ou d'autres options émergentes qui cherchent à réduire la dépendance aux matériaux critiques.

Cette séparation progressive entre batteries mobiles et stationnaires pourrait, à terme, jouer un rôle clé dans la **structuration des chaînes industrielles**. Les systèmes stationnaires pourraient absorber une partie des contraintes de recyclage en valorisant des matériaux moins critiques, tandis que la mobilité continuerait à tirer la demande en matériaux à haute performance, donc plus critiques. Cependant, dans les deux cas, la contrainte fondamentale restera la même à savoir la montée en échelle extrêmement rapide des besoins, qui dépasse largement la vitesse de mise en place des infrastructures minières, de raffinage et de recyclage.

C'est précisément ici que se situe le paradoxe actuel des batteries électriques. La promesse est celle que ces dispositifs sont des outils indispensable à la transition énergétique. Néanmoins, cette promesse repose sur une condition forte qui est la capacité à industrialiser simultanément et de manière soutenable des chaînes complexes (extraction primaire[26], transformation chimique des matériaux, et recyclage) dans un contexte de demande exponentielle. Or, ces chaînes sont aujourd'hui largement déséquilibrées, avec une forte concentration des capacités de raffinage et de fabrication dans quelques régions du monde, en particulier en Asie.

L'avenir des batteries : entre optimisation et structuration

Au-delà des leviers techniques et des améliorations de leurs efficacités, les batteries posent avant tout une question d'organisation industrielle globale. Leur performance ne dépend plus uniquement des matériaux eux-mêmes, mais de la capacité à orchestrer des chaînes de valeur mondiales particulièrement complexes, structurées par des contraintes chimiques, énergétiques et géopolitiques étroitement imbriquées. Dans cette perspective, l'avenir des batteries ne semble devoir être ni celui d'une indépendance totale vis-à-vis des matières premières, ni celui d'un

recyclage parfaitement circulaire. Il s'oriente plutôt vers un système hybride, dans lequel extraction, transformation et réutilisation coexistent dans un équilibre dynamique. Dans cet équilibre, le recyclage occupe un rôle essentiel, non pas comme substitut à l'extraction primaire, mais comme mécanisme de stabilisation, permettant de ralentir la pression sur les ressources et d'atténuer les tensions d'un système en forte expansion.

Dans ce cadre, les usages des batteries devraient évoluer vers une intégration beaucoup plus systémique que celle observée aujourd'hui. La **mobilité** y restera centrale, mais davantage sous des formes mutualisées et pilotées (flottes, services, logiques d'optimisation des usages), où le stockage devient un paramètre de gestion plutôt qu'un simple support individuel. Le rôle dans les **réseaux électriques** devrait également s'étendre, jusqu'à faire du stockage un élément structurel du fonctionnement du système, mobilisé de manière continue pour absorber les variations de production et lisser les déséquilibres à différentes échelles. Enfin, la diffusion du **stockage dans le bâti et les infrastructures** devrait s'accentuer, avec une imbrication croissante entre production, consommation et stockage, rendant ces fonctions de plus en plus difficilement séparables.

Vous souhaitez plus d'informations sur ce sujet ?

N'hésitez pas à me contacter via l'adresse email suivante: a.richel@uliege.be ou via le formulaire disponible en cliquant ici.

Références et commentaires

[1] https://www.science-et-vie.com/science-et-culture/archeologie/pile-bagdad-mystere-antiquite-maitrise-electricite-128022.html

[2] http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/2804257.stm

[3] https://www.universalis.fr/encyclopedie/luigi-galvani/

[4] https://www.persee.fr/doc/helec_0758-7171_1990_num_16_1_1131

[5] https://blog.upsbatterycenter.com/tag/camille-alphonse-faure/

[6] https://nara.getarchive.net/media/nicad-nickel-cadmium-batteries-failed-battery-and-good-battery-5c5582

[7] https://www.umontpellier.fr/articles/quand-un-nobel-de-chimie-consacre-une-batterie

[8] https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2019/popular-information/

[9] https://elements.visualcapitalist.com/visualized-inside-a-lithium-ion-battery/

[10] https://www.tme.eu/fr/news/library-articles/glossary/page/68682/accumulateur-nickel-hydrure-metallique-nimh-definition/

[11] https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095809922003630

[12] https://www.revolution-energetique.com/fiches-pedagogiques/comment-fonctionne-une-batterie-a-flux-redox/

[13] https://lejournal.cnrs.fr/nos-blogs/focus-sciences/lithium-soufre-la-paire-gagnante-pour-les-batteries-de-demain

[14] https://www.statista.com/statistics/1330755/ev-battery-mineral-content-by-type/

[15] https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2025/beyond-nmc-batteries-supply-chain-issues-for-emerging-battery-technologies

[16] https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666248525000071

[17] https://www.eramet.com/en/news/manganese-the-secret-ingredient-in-lithium-ion-batteries/

[18] https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2025/mcs2025-graphite.pdf

[19] https://www.eastcarb.com/fr/les-dix-premiers-pays-producteurs-de-graphite/

[20] https://www.marketresearchfuture.com/reports/graphite-market-853

[21] https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X25000477

[22] https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/batteries_en

[23] https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775324021104

[24] https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acssusresmgt.5c00312

[25] https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586625044442

[26] https://www.technologyreview.com/2026/05/28/1138096/lithium-extraction-rock-zero/