



Ressources naturelles
Canada

Natural Resources
Canada

UNCLASSIFIED - NON CLASSIFIÉ

Analyse comparative de l'écosystème canadien des batteries

Canada

Also available in English under the title: Benchmarking the Canadian Battery Ecosystem

Pour obtenir des renseignements sur les droits de reproduction, veuillez communiquer avec Ressources naturelles Canada à copyright-droitdauteur@nrca-nrcan.gc.ca.

Cat. No. M4-273/2025F-PDF (En ligne) / ISBN 978-0-660-78868-5

© Sa Majesté le Roi du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2025

Analyse comparative de l'écosystème canadien des batteries

Résumé

Les évaluations et les prévisions accessibles au public concernant l'écosystème canadien des batteries et sa compétitivité potentielle reposent souvent sur des estimations fondées sur des prévisions mondiales et des annonces d'entreprises, qui manquent de précision sur des paramètres spécifiques. Les repères présentés dans le présent rapport permettent de mieux comprendre les principes fondamentaux de la technologie des batteries et de dresser un bilan global des forces et des capacités, qui devrait être pris en compte lors de l'évaluation du potentiel de l'écosystème canadien des batteries. Le Bureau de la recherche et du développement énergétiques (BRDE) de Ressources naturelles Canada (RNC) a réalisé cette étude comparative, qui comprend un examen de l'écosystème canadien des batteries afin d'éclairer ses décisions en matière de financement et de soutien non financier à l'innovation dans ce domaine. Ce rapport propose également des définitions et des objectifs communs pour les acteurs de l'industrie canadienne des batteries, en particulier les décideurs et les investisseurs.

En utilisant les cinq cadres relatifs aux batteries présentés dans l'[Approche stratégique visant l'innovation des batteries](#) du BRDE, publiée en mars 2024, comme prisme d'analyse, le présent rapport évalue l'écosystème canadien des batteries selon les axes suivants :

- les parties prenantes du secteur des batteries, y compris les entreprises et les infrastructures d'innovation ;
- la demande et le déploiement des batteries ; et
- les indicateurs de performance et les objectifs techniques des batteries définis par application.

Les données de référence ont été largement collectées et référencées à partir de rapports de consultants, d'engagements des parties prenantes et de multiples sources accessibles au public, notamment les sites web d'entreprises et d'institutions, la littérature évaluée par des pairs, les spécifications commerciales des batteries et les rapports industriels.

Il existe environ 250 entreprises en aval de l'exploitation minière et de l'exploration situées le long de la chaîne de valeur canadienne des batteries et réparties dans la majeure partie du Canada. Plus d'un quart de ces entreprises couvrent plusieurs segments de la chaîne de valeur. Les entreprises sont concentrées dans les segments en amont et en aval, laissant le segment intermédiaire marqué par une capacité de transformation limitée des matières premières en réactifs de qualité batterie et une fabrication limitée de cellules de batterie grand format. Bien qu'il existe au Canada des entreprises de toutes tailles et à tous les stades de développement, plus de 60 % d'entre elles sont de petite taille et plus de la moitié ont des activités dans les domaines de la R&D, des projets pilotes, de la précommercialisation ou de la planification.

L'infrastructure du Canada en matière d'innovation dans le domaine des batteries, qui comprend des universités, des laboratoires de recherche, des installations pilotes et des installations d'essai, est regroupée dans quatre régions géographiques : l'Ouest canadien, le sud de l'Ontario, le Québec et la Nouvelle-Écosse. Ces pôles d'innovation fournissent une infrastructure technologique physique, des ressources qualifiées et collaboratives, ainsi que des installations qui accélèrent le développement de nouvelles idées en encourageant la pensée innovante et la prise de risques. Cependant, les infrastructures capables de produire des cellules de batterie prêtes à l'emploi sont actuellement limitées au Canada.

La demande de batteries au Canada est largement tirée par le secteur des transports, notamment les véhicules électriques légers routiers, qui ont atteint une demande annuelle d'environ 18 GWh en 2024. Les ajouts de capacité de batteries dans le secteur de l'électricité, bien que plus modestes, devraient atteindre 4 GWh en 2025, principalement pour répondre aux besoins des services de transfert d'énergie et des marchés d'arbitrage. La demande totale de batteries devrait augmenter considérablement au cours de la prochaine décennie, et le Canada pourrait avoir besoin d'une production annuelle de 200 GWh de batteries en 2035 pour répondre à ses besoins nationaux dans ces deux segments. Pour mettre cette demande en perspective, la demande mondiale de batteries devrait atteindre plus de 10 000 GWh en 2035 dans le scénario zéro émission nette.

Aujourd'hui et à l'avenir, la compétitivité de l'écosystème canadien des batteries dépendra essentiellement du respect des principaux critères de performance technique des batteries, notamment la densité énergétique, la densité de puissance, le coût, la sécurité, la durée de vie et la durabilité.

Les cellules lithium-ion haute performance actuelles à base de nickel (NMC) peuvent coûter environ 160 \$/kWh, fournir des densités énergétiques supérieures à 300 Wh/kg et 800 Wh/L, atteindre 500 à 1 000 cycles avant la fin de leur durée de vie et émettre 50 à 80 kgCO₂eq/kWh lors de leur production. Les objectifs futurs de 95 \$/kWh, 500 Wh/kg et 1 150 Wh/L, 2 000 cycles et 20 à 30 kgCO₂eq/kWh sont fixés pour 2035 (2040 pour le coût) pour les cellules haute performance.

Les cellules lithium-ion plus abordables d'aujourd'hui sont basées sur la chimie du fer (LFP) et peuvent coûter environ 110 \$/kWh, fournir des densités énergétiques d'environ 180 Wh/kg et 380 Wh/L, atteindre 6 000 à 8 000 cycles avant leur fin de vie et émettre 40 à 70 kgCO₂eq/kWh lors de leur production. Les objectifs futurs de 67 \$/kWh, 270 Wh/kg et 550 Wh/L, 10 000 cycles et 15 à 20 kgCO₂eq/kWh sont fixés pour 2035 (et 2040 pour le coût) pour les cellules abordables.

Plusieurs entreprises et chercheurs canadiens spécialisés dans les batteries innovent en utilisant diverses approches afin d'être compétitifs aujourd'hui et d'assurer leur compétitivité future. Il s'agit notamment d'avancées progressives tout au long de la chaîne de valeur des batteries lithium-ion dans la conception et la synthèse des matériaux, ainsi que d'innovations en aval dans la conception et la production de cellules et de packs. En outre, les innovateurs canadiens développent des batteries à semi-conducteurs, des batteries à architecture ouverte comme les batteries à flux et les batteries métal-air, ainsi que des batteries utilisant des composés chimiques comme le sodium et d'autres métaux alternatifs au lithium.

L'écosystème canadien des batteries en est encore à ses débuts et, afin d'atteindre les objectifs de décarbonisation, de sécurité et de compétitivité, il doit remédier à la vulnérabilité des segments intermédiaires de la chaîne de valeur des batteries. Le Canada peut développer un avantage concurrentiel grâce aux innovations suivantes : des techniques de fabrication qui peuvent réduire les coûts et avoir un impact moindre sur l'environnement ; la conception de cellules qui peuvent améliorer les mesures de densité énergétique ou de densité de puissance ; et des innovations dans la chimie des batteries qui peuvent exploiter les propriétés de matériaux et de composants alternatifs pour obtenir des performances difficiles à atteindre avec les cellules de batteries lithium-ion standard.

Table des matières

- [Résumé](#)

- [Liste des figures](#)
- [Liste des tableaux](#)
- [1. Introduction](#)
- [2. Écosystème](#)
 - [2.1. Entreprises de batteries dans la chaîne d'approvisionnement](#)
 - [2.2. Infrastructure d'innovation en matière de batteries](#)
- [3. Déploiement des batteries](#)
 - [3.1. Transports](#)
 - [3.2. Électricité](#)
 - [3.3. Demande totale](#)
- [4. Valeurs de références et cibles en matière de technologie des batteries](#)
 - [4.1. Densité énergétique des cellules](#)
 - [4.2. Densité de puissance des cellules](#)
 - [4.3. Durée de vie des cellules](#)
 - [4.4. Sécurité des cellules](#)
 - [4.5. Coût de la cellule](#)
 - [4.6. Durabilité des cellules](#)
 - [4.7. Possibilités d'innovation pour atteindre les objectifs](#)
- [5. Conclusion](#)
- [Appendice A - Explication des termes clés](#)
- [Appendice B - Description des mesures de performance des batteries](#)
- [Appendice C - Exemple de calcul de la densité énergétique des cellules](#)
- [Appendice D - Données de référence](#)
- [Annexe 1 – Entreprises de l'écosystème canadien des batteries](#)
- [Références](#)

Liste des figures

Liste des tableaux

1. Introduction

Les batteries sont appelées à jouer un rôle important dans la transition énergétique, depuis l'électrification des transports jusqu'au stockage de l'énergie produite par des sources renouvelables telles que le vent et le soleil. Les technologies de pointe en matière de batteries reposent sur des minéraux essentiels pour offrir des solutions de stockage à haute densité énergétique, équilibrées par rapport à d'autres paramètres de performance importants en

fonction de leur application finale. Comprendre comment chacun de ces paramètres est atteint, ainsi que leur potentiel, peut aider les décideurs et les investisseurs à trouver des solutions de batteries adaptées à leurs besoins, ainsi qu'à comprendre les gains relatifs et les compromis des innovations en matière de batteries. Ce rapport corrobore cette analyse en comparant l'écosystème canadien des batteries, notamment les entreprises et les infrastructures d'innovation, la demande et le déploiement des batteries, ainsi que les performances et les objectifs en matière de batteries.

En 2024, le Bureau de recherche et de développement énergétiques (BRDE) de Ressources naturelles Canada (RNC) a publié l'Approche stratégique visant l'innovation des batteries (ASIB), qui définit les trois piliers d'un écosystème de batteries compétitif, propre et innovant pour le Canada. [Référence\[1\]](#), [Référence\[2\]](#) L'ASIB propose également cinq cadres conceptuels et techniques visant à créer une compréhension commune du secteur des batteries électrochimiques pour les décideurs issus de divers horizons, qu'il s'agisse des sciences, de la politique, de l'économie ou de l'ingénierie. Ces cinq cadres sont les suivants : anatomie d'une batterie, chaîne de valeur des batteries, mise à l'échelle et du niveau de maturité technologique, la performance des batteries et durabilité des batteries. Ces cadres constituent la base du présent rapport comparatif et ont été utilisés pour mettre en évidence six indicateurs de performance principaux pour les batteries. Pour chaque indicateur de performance, les valeurs de référence actuelles et les objectifs à atteindre pour les technologies de pointe et émergentes sont présentés afin que les innovateurs canadiens puissent les comparer et s'efforcer de les atteindre à moyen et à long terme. Les valeurs de référence et les valeurs cibles sont toutes deux dérivées des spécifications commerciales, des feuilles de route technologiques, de l'analyse documentaire et des projections technologiques, afin de garantir la compétitivité continue des innovations canadiennes. À ce titre, les valeurs cibles sont dérivées de multiples considérations et sont présentées comme des valeurs potentielles pour chaque catégorie d'indicateur. L'appendice A - Explication des termes clés explique les nuances de chaque indicateur.

Afin de replacer pleinement le potentiel canadien dans son contexte, le présent rapport présente tout d'abord l'état de l'écosystème des batteries, y compris les entreprises du secteur et les infrastructures d'innovation. L'ASIB a identifié ces deux éléments comme les piliers soutenant la décarbonisation, la sécurité et la compétitivité de la chaîne de valeur des batteries au Canada. Bien qu'ils aient été identifiés comme les piliers clés de l'innovation dans le domaine des batteries, l'écosystème des batteries étant encore naissant au Canada, ils peuvent être

utilisés pour évaluer l'état de l'écosystème dans son ensemble, et pas seulement son volet innovation. En fournissant un aperçu de l'écosystème des batteries, les praticiens peuvent comprendre comment leur travail contribue à renforcer l'ensemble de la chaîne de valeur des batteries.

La demande potentielle de batteries au Canada est ensuite présentée sur la base des projections mondiales et des objectifs politiques nationaux. Cette section quantifie les deux plus grandes opportunités en termes de taille de marché pour l'électrification soutenue par les batteries : les transports et l'électricité. Cette demande alimente les objectifs du présent rapport et peut être utilisée par les décideurs pour évaluer la production nationale future et le potentiel d'importation du Canada.

Les repères présentés dans le présent rapport fournissent des données de référence pour déterminer le succès de l'écosystème d'innovation en matière de batteries au Canada. Les décideurs peuvent utiliser les repères techniques pour déterminer l'impact relatif des nouvelles innovations en matière de batteries dans un contexte concurrentiel existant. La fixation d'objectifs concurrentiels permet de planifier à long terme les objectifs des programmes de recherche, de développement et de démonstration (RD&D) en hiérarchisant les compromis en matière de performance afin de répondre aux besoins des clients. Pour le BRDE, l'analyse comparative de l'écosystème canadien des batteries permet de mieux comprendre les progrès accomplis vers la réalisation des objectifs de l'ASIB et met en évidence les lacunes de la chaîne de valeur qui nécessitent un soutien supplémentaire.

2. Écosystème

L'écosystème canadien des batteries désigne les entreprises et les institutions établies au Canada et les activités liées à la R&D, à la production, à la (ré)utilisation et au recyclage des batteries. Cela comprend l'ensemble de la chaîne de valeur, depuis l'approvisionnement en minéraux essentiels et la fabrication des composants des batteries jusqu'à la production des cellules, l'assemblage et le recyclage final (voir **Figure 1**).

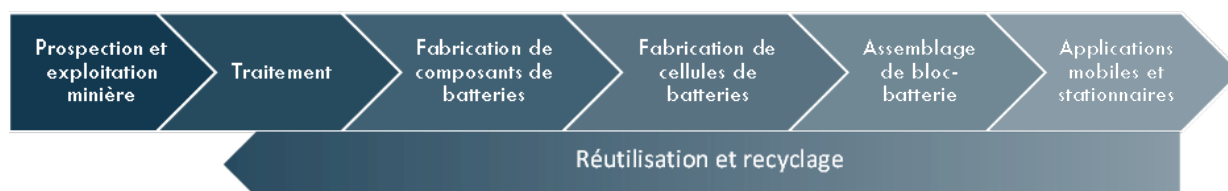


Figure 1 : Visualisation de la chaîne de valeur des batteries

Figure 1 - version textuelle

Le Canada est reconnu comme un pays minier de premier plan et entend créer des chaînes d'approvisionnement compétitives pour les minéraux critiques et les produits, procédés et technologies à valeur ajoutée destinés aux véhicules zéro émission, notamment les batteries Li-ion, les aimants permanents et les alliages spéciaux. [Référence\[3\]](#) Le Canada a également investi dans son industrie des transports et de la construction automobile, en s'appuyant sur le fait qu'il est l'un des 12 premiers producteurs mondiaux de véhicules légers, avec cinq équipementiers mondiaux qui assemblent plus de 1,4 million de véhicules dans leurs usines canadiennes chaque année. [Référence\[4\]](#) L'électrification des secteurs de l'automobile et des transports a été guidée par une approche « des mines à la mobilité ». Cette approche vise à développer un écosystème canadien durable pour les batteries destinées aux transports et aux véhicules électriques (VE). D'importants investissements ont été annoncés pour soutenir la fabrication de batteries pour VE, et des mesures de soutien ont été mises en place, notamment dans le cadre de la Stratégie canadienne sur les minéraux critiques et par le biais de crédits d'impôt à l'investissement, afin de soutenir le développement de l'exploitation et du traitement des minéraux critiques. [Référence\[5\]](#)

Comme l'indique l'ASIB:

... l'établissement d'une chaîne de valeur entièrement décarbonée pour les batteries, qui soit sûre et compétitive, exige que le Canada dispose de l'infrastructure novatrice nécessaire à la mise en place d'une expertise et de solutions locales, ainsi que d'entreprises nationales pour commercialiser ces innovations.

Le segment Prospection et exploitation minière de la chaîne de valeur est bien établi, le Canada produisant 60 minéraux et métaux dans près de 200 mines [Référence\[6\]](#), notamment le cuivre, le graphite, le fer, le lithium et le nickel, considérés comme essentiels à la fabrication des batteries lithium-ion. [Référence\[7\]](#) En 2024, BloombergNEF a classé le Canada au premier rang de son classement annuel mondial de la chaîne d'approvisionnement des batteries lithium-ion, ainsi que les

progrès en matière de fabrication et de production, les solides références ESG et les engagements politiques. Cela permet d'évaluer le potentiel des pays à mettre en place une chaîne d'approvisionnement fiable et durable en batteries. Cette année, le Canada est tombé à la deuxième place (derrière la Chine), en grande partie en raison d'une demande en batteries plus faible que prévu. [Référence\[8\]](#)

Cette section examine les quelque 250 entreprises réparties en aval du segment Prospection et exploitation minière, ainsi que leur disproportion par rapport à ce segment en amont, ce qui justifie une analyse plus approfondie du milieu de la chaîne de valeur qui soutient sa décarbonisation, sa sécurité et sa compétitivité.

2.1. Entreprises de batteries dans la chaîne d'approvisionnement

Cette section se concentre sur les entreprises qui soutiennent les segments en aval de la Prospection et de l'exploitation minière dans la chaîne de valeur des batteries. Ces segments sont considérés comme plus vulnérables que le secteur minier en amont (et le secteur automobile en aval) au Canada, car la plupart des entreprises en milieu de chaîne sont des entités plus petites et moins bien établies, qui dépendent davantage des infrastructures publiques d'innovation du Canada pour se développer. Cette vulnérabilité est inhérente à la mise à l'échelle rapide de technologies innovantes dans un secteur mondial hautement concurrentiel, largement influencé par des facteurs tels que l'adoption des véhicules électriques, les objectifs des politiques nationales et les politiques commerciales. En outre, cette vulnérabilité pose un risque pour la sécurité en raison de la dépendance excessive à des chaînes d'approvisionnement peu sûres et réduit la compétitivité des secteurs des transports et de l'électricité.

L'écosystème canadien des batteries comprend environ 250 entreprises réparties dans les segments de la chaîne de valeur liés au traitement, aux composants, aux cellules, aux assemblages, aux applications, à la réutilisation et au recyclage des batteries (voir la **Figure 2**). Les organisations ont été classées en fonction de la chaîne de valeur principale associée à leurs activités au Canada. Les activités annoncées et suspendues sont incluses dans ce décompte et aucune distinction n'est faite entre les entreprises précommerciales, étrangères ou établies. De cette manière, cet écosystème reflète le potentiel technologique plutôt que le potentiel industriel de l'écosystème canadien des batteries.

Plusieurs entreprises ont des activités qui couvrent plusieurs segments de la chaîne de valeur des batteries, mais aux fins de la présente étude, chaque entreprise s'est vu attribuer un seul segment « principal » de la chaîne de valeur, défini comme suit.

- **Le traitement** est considéré comme la production de réactifs de qualité batterie avec une pureté supérieure à 99 %.
- **La fabrication de composants de batteries** comprend les matériaux actifs et les composants non actifs présents à l'intérieur d'une cellule (ainsi que les précurseurs de cathodes).
- **La fabrication de cellules de batteries** produit des produits semi-finis capables d'effectuer des cycles réversibles.
- **L'assemblage de bloc- batteries** comprend l'assemblage de plusieurs cellules reliées en série et en parallèle, ainsi que les systèmes de gestion des batteries.
- **Les applications mobiles et stationnaires** sont considérées comme des utilisations finales, la mobilité comprenant les équipementiers de véhicules électriques terrestres, maritimes et aériens. Les applications de stockage stationnaire comprennent les fournisseurs de stockage stationnaire, mais pas les services publics d'électricité des acteurs du marché.
- **La réutilisation et le recyclage** comprennent respectivement la seconde vie des cellules après leur première utilisation et la reconstitution et la réinsertion des matériaux des batteries en fin de vie et des déchets de batteries dans les segments en amont de la chaîne de valeur.

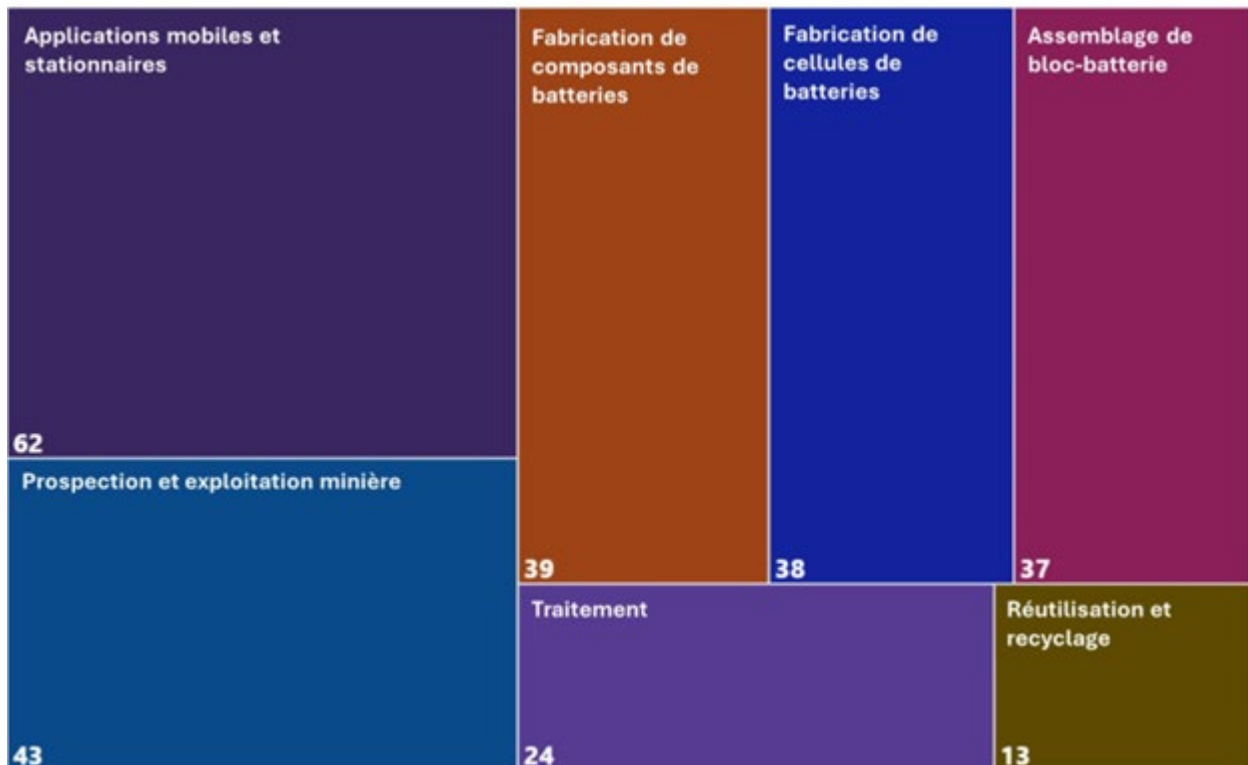


Figure 2 : Répartition du nombre d'entreprises par segment principal de la chaîne de valeur le long des segments en aval de la chaîne de valeur des batteries

Figure 2 - version textuelle

L'absence de fabrication à grande échelle de composants ou de cellules au Canada au moment de la rédaction du présent rapport reflète le caractère immature de ces segments de la chaîne de valeur. La taille des entreprises peut être utilisée comme une indication approximative du progrès vers la commercialisation, les entreprises développant des produits à faible niveau de maturité technologique étant généralement des micro-entreprises ou des petites entreprises, tandis que les entreprises disposant d'installations commercialisées sont généralement des grandes entreprises. Cela n'est pas toujours vrai, car les grandes entreprises investissent dans la RD&D à différents niveaux de maturité technologique.

Toutefois, en l'absence de données sur le niveau de maturité technologique (NMT) des projets dans toutes les organisations, la taille des entreprises est utilisée comme indicateur de l'avancement technologique vers la commercialisation. Par exemple, 77 % des entreprises du segment des composants et 63 % des entreprises du segment des cellules sont des micro-entreprises et des petites entreprises. La plupart des entreprises de tous les segments en aval, y compris les fournisseurs du segment des applications de stockage mobiles et fixes, sont des petites entreprises, les entreprises de cellules, de composants et de transformation représentant la plus grande proportion de leur nombre total (voir la **Figure 3**).

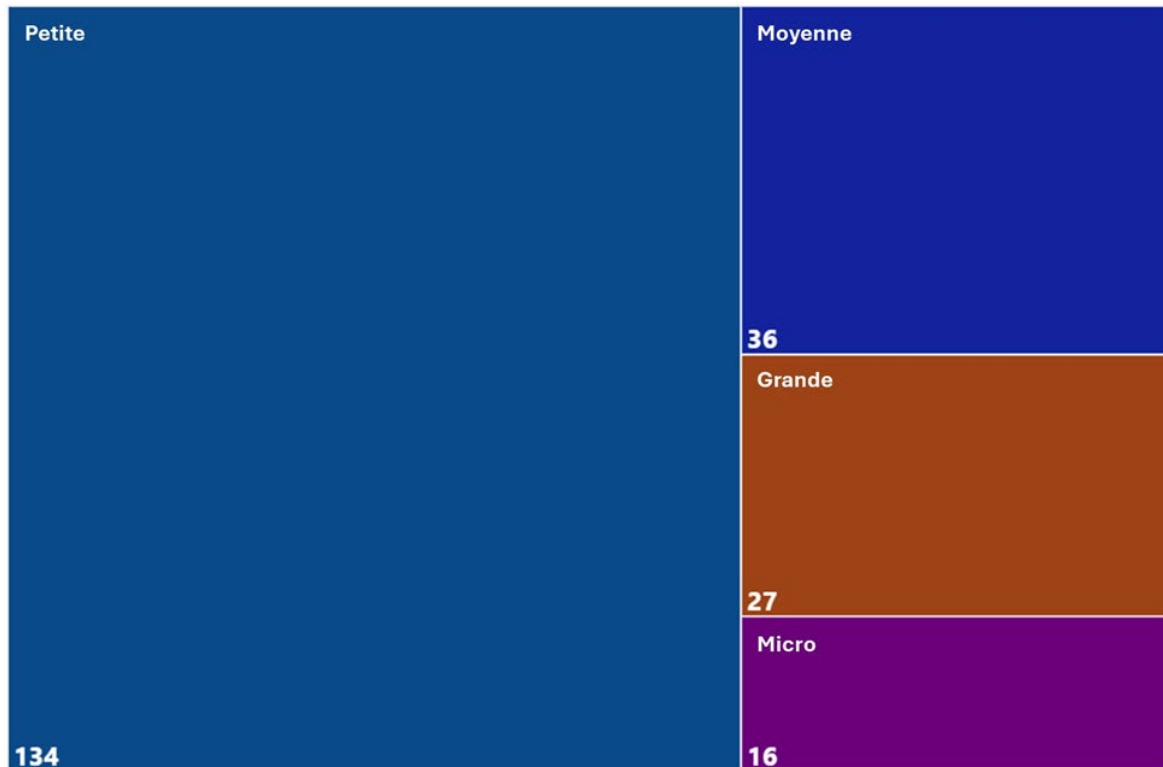


Figure 3 : Taille relative des entreprises dans les segments en aval de la chaîne de valeur des batteries (micro : 1 à 4 employés, petite : 5 à 99 employés, moyenne : 100 à 499 employés, grande : 500 employés ou plus)

Figure 3 - version textuelle

La **Figure 4** montre que les grandes entreprises dominent dans trois segments : les applications mobiles et stationnaires, la fabrication de cellules de batterie et l'assemblage de batteries. Si la majorité des grandes entreprises des segments de la mobilité et du stockage stationnaire sont commerciales, ce n'est pas le cas des autres segments. Les grandes entreprises des autres segments ont un niveau de maturité technologique plus élevé, mais n'ont pas encore généré de revenus, ce qui montre l'importance des investissements nécessaires pour mettre en place une chaîne d'approvisionnement verticalement intégrée au Canada.



Figure 4 : Répartition des grandes entreprises (500 employés ou plus) dans les segments en aval de la chaîne de valeur des batteries

Figure 4 - version textuelle

Moins de 10 % des entreprises situées dans les segments intermédiaires de la chaîne de valeur des batteries, quelle que soit leur taille, opèrent dans plusieurs segments de la chaîne de valeur (voir la **Figure 5**). La présence dans plusieurs segments de la chaîne de valeur sert d'indicateur des opérations verticalement intégrées, soulignant que même dans le cas des grandes entreprises, les besoins en investissements en capital sont lourds. Une entreprise verticalement intégrée serait par exemple une entreprise qui développe une chimie innovante pour les batteries Li-ion adaptées à leur déploiement dans le domaine du stockage d'énergie afin de soutenir la production d'énergie renouvelable. Une telle intégration peut soutenir l'innovation axée sur les applications finales. Cependant, les entreprises canadiennes actives dans plusieurs segments ont tendance à avoir un NMT plus faible et à exercer des activités précommerciales ou à être en phase de déploiement. Cette réalité renforce la vulnérabilité des segments intermédiaires de la chaîne de valeur.

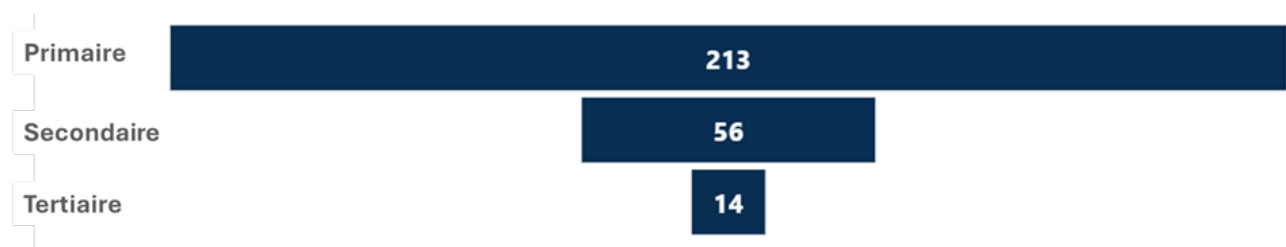


Figure 5 : Répartition des entreprises situées au milieu de la chaîne de valeur des batteries et possédant un segment de chaîne de valeur primaire, secondaire et tertiaire.

Figure 5 - version textuelle

2.1.1. Traitement

Le traitement des matériaux extraits en réactifs de qualité batterie est le segment de la chaîne de valeur qui compte le deuxième plus petit nombre d'entreprises dans l'écosystème canadien des batteries. Cela comprend les matériaux de transformation destinés à alimenter la chaîne de valeur des batteries, en particulier les batteries Li-ion : le lithium, le nickel, le cobalt, le manganèse, le cuivre et le graphite.

Le lithium de qualité batterie est traité soit par raffinage de minéraux provenant de concentrés de spodumène/pétalite, soit par extraction à partir de réservoirs souterrains de saumure riche en lithium. [Référence\[9\]](#) Il existe actuellement deux mines de lithium en exploitation au Canada qui approvisionnent le pays, ce qui limite le débit des opérations de traitement, mais plusieurs projets avancés sont en cours de développement. [Référence\[10\]](#) Les projets prévoyant de traiter le lithium à partir de saumure sont principalement situés dans les provinces des Prairies, tandis que les projets prévoyant l'extraction et le traitement de concentrés minéraux se concentrent principalement en Ontario et au Québec. Le Canada ne compte actuellement aucune exploitation commerciale produisant des produits chimiques pour batteries au lithium.

Le graphite est un minéral essentiel à la composition des électrodes d'anode dans les batteries lithium-ion. À l'heure actuelle, le Canada compte une mine de graphite en exploitation (qui est également la seule en Amérique du Nord), mais celle-ci semble principalement approvisionner des marchés autres que celui des batteries. Plusieurs projets avancés sont en cours de développement qui pourraient permettre d'extraire et de traiter des matériaux d'anode de qualité batterie. Pour le nickel et le cobalt, composants essentiels des cathodes pour les cellules NMC à haute densité énergétique, le Canada est actuellement un producteur minier, mais ne dispose d'aucune production chimique de batteries en activité. Cependant, comme pour le lithium et le graphite, plusieurs projets avancés sont en cours pour extraire davantage de minéraux pour batteries et produire des produits chimiques pour batteries.

Il existe un certain nombre d'entreprises de traitement et de prospection & d'exploitation minière qui ont des activités prometteuses dans ces deux segments,

ouvrant la voie à la croissance du secteur au Canada. Ces projets de transformation potentiels dépendent fortement de conditions de marché favorables et du développement continu de l'écosystème en aval pour soutenir la demande, et pourraient être confrontés à des défis liés à la forte concentration des marchés mondiaux des minéraux transformés pour batteries. Les efforts continus visant à développer l'industrie du traitement comblent le fossé entre l'exploitation minière et l'exploration d'une part, et les applications finales des batteries d'autre part, ce qui est essentiel à la mise en place d'une industrie des batteries verticalement intégrée, « des mines à la mobilité ».

2.1.2. Fabrication de composants de batteries

Le segment du développement et de la fabrication de composants compte le plus grand nombre d'entreprises après celui des applications mobiles et fixes, même si la majorité d'entre elles n'ont pas encore généré de revenue. Ce segment couvre plusieurs types de composants, notamment les cathodes, les anodes, les électrolytes, les séparateurs, les collecteurs de courant et les membranes. Compte tenu de la diversité de ce segment de la chaîne de valeur, il est logique de constater une répartition entre les entreprises de différentes tailles. La **Figure 6** ci-dessous divise ces entreprises en différents types de composants de batteries. Les entreprises qui développent plusieurs de ces composants sont comptées qu'une seule fois dans chaque catégorie.

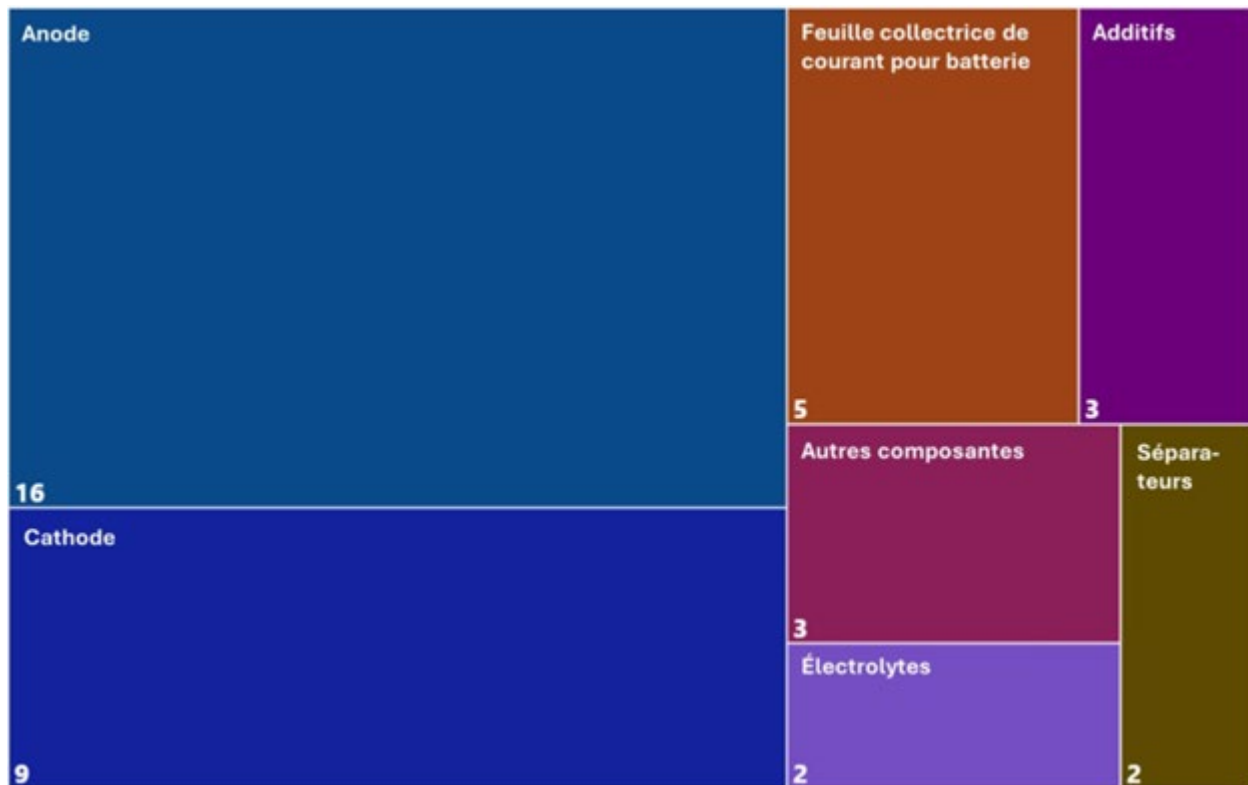


Figure 6 : Répartition des entreprises dans le secteur de la fabrication de composants de batteries

Figure 6 - version textuelle

Les anodes sont le domaine qui compte le plus grand nombre d'entreprises, mais il s'agit uniquement de micro-entreprises et de petites entreprises. Cela s'explique en partie par l'intérêt porté aux matériaux de nouvelle génération destinés à remplacer le graphite. Les anodes en silicium sont un candidat prometteur à cet effet, mais leur niveau de maturité technologique est encore faible, de sorte que la plupart des entreprises sont encore petites et en phase de croissance. Certaines entreprises qui travaillent sur des anodes en graphite et en lithium métal, mais dont les activités se situent plus en amont dans la chaîne de valeur, ont été classées dans la catégorie « traitement » plutôt que « fabrication de composants ». Dans l'ensemble, pour ancrer davantage la chaîne d'approvisionnement en batteries au Canada, il est nécessaire d'accroître la production nationale d'anodes.

À l'inverse, les entreprises de cathodes sont généralement plus grandes, mais moins nombreuses. Cette situation s'explique par les investissements directs étrangers dans les usines de cathodes parallèlement à la fabrication de véhicules électriques. Si les activités d'innovation dans le domaine des cathodes de batteries au Canada tendent à se concentrer sur la production novatrice de matériaux de cathodes commercialement matures, l'innovation à un niveau de maturité

technologique plus faible et le développement de compositions chimiques de cathodes de nouvelle génération sont moins privilégiés. Pour renforcer l'avantage concurrentiel du Canada, il est nécessaire de mettre davantage l'accent sur les nouvelles technologies de cathodes.

Il existe une entreprise qui produit commercialement des collecteurs de courant au Canada et quelques installations prévues qui produiront des séparateurs. Bien que les séparateurs soient des composants non actifs des cellules de batterie, ils influencent néanmoins les performances de la batterie, ce qui offre des possibilités d'innovation supplémentaires. [Référence\[11\]](#) De même, les collecteurs de courant sont des composants non actifs, mais ils affectent les performances de la batterie en fonction de leur conductivité électrique, de leur résistance au contact et de leur résistance à la corrosion. [Référence\[12\]](#) Pourtant, seules deux entreprises sont présentes sur ce segment, ce qui laisse une marge de manœuvre pour une plus grande saturation.

Bien qu'il existe au Canada des entreprises qui se concentrent sur les cellules à électrolyte solide et les électrolytes pour batteries à flux, il existe un potentiel d'innovation dans le domaine des électrolytes liquides conventionnels et de nouvelle génération pour les cellules lithium-ion.

Les autres composants comprennent les électrolytes, les électrodes et les réactifs utilisés dans les compositions de cellules non Li-ion. En général, les entreprises ayant cette désignation sont impliquées dans des opérations verticalement intégrées en vue d'une application finale de systèmes de stockage d'énergie longue durée non Li-ion. Ces entreprises en sont aux premières étapes de la commercialisation ou poursuivent le déploiement de technologies à l'échelle de démonstration, ce qui souligne la nécessité de produire des composants en amont dans le cas d'applications finales à architecture ou chimie novatrices, malgré les investissements en capital plus importants requis.

Compte tenu de cette présence relativement faible dans l'écosystème canadien, des investissements supplémentaires dans ces domaines pourraient renforcer la résilience de la chaîne d'approvisionnement et stimuler la compétitivité canadienne.

2.1.3. Développement et fabrication de cellules

Le développement et la fabrication de cellules est un segment qui comprend à la fois de petites entreprises en démarrage fabriquant des cellules pour des applications spécialisées et des entreprises visant une production à grande échelle pour les marchés de la mobilité et du stockage stationnaire. Malgré cette

présence, il n'existe actuellement aucune production de cellules à grande échelle au Canada, plusieurs projets ayant été suspendus, abandonnés ou compromis ces dernières années (voir la **Figure 7**).

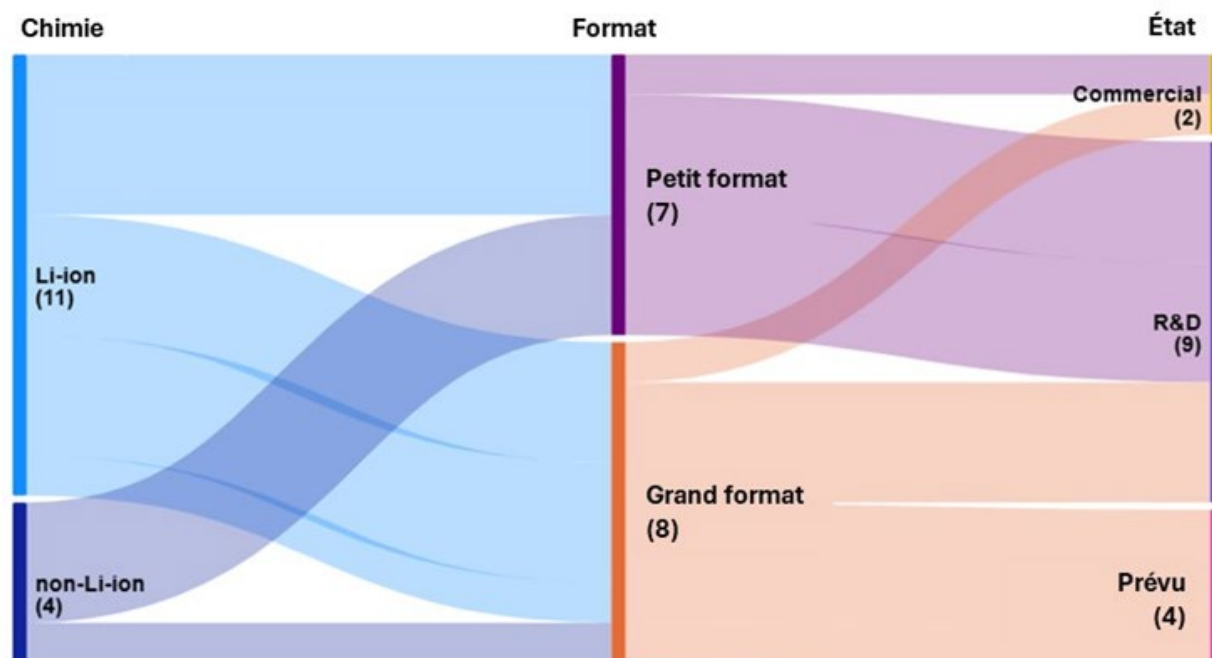


Figure 7 : Répartition des entreprises produisant des cellules par type de chimie, format et statut commercial. Les cellules de grand format sont désignées par (> 20 Ah), les cellules de petit format se situant en dessous de ce seuil.

Figure 7 - version textuelle

En nombre d'entreprises, le segment du développement et de la fabrication de cellules de batterie est l'un des plus importants de la chaîne de valeur canadienne des batteries, ce qui démontre le fort potentiel de l'écosystème. Il n'existe actuellement qu'une seule entreprise produisant des cellules lithium-ion de grand format à l'échelle commerciale, et celle-ci est en train de délocaliser ses capacités de fabrication de cellules au Canada.

Bien que la technologie lithium-ion soit actuellement dominante au niveau mondial, 50 % des entreprises de ce segment de l'écosystème se spécialisent dans des compositions chimiques sans lithium, telles que le sodium-ion et le zinc-ion, ainsi que dans des concepts de cellules alternatifs, tels que les batteries métal-air et les batteries à flux. Ces technologies sont principalement adaptées à des applications de niche pour le marché du stockage stationnaire, qui privilégie le coût et d'autres critères de performance plutôt que la densité énergétique. [Référence\[13\]](#), [Référence\[14\]](#) En conséquence, ce sous-segment est dominé par

des micro-entreprises et des petites entreprises, ce qui indique que les technologies de batteries sans lithium ont généralement un NMT inférieur à celui de leurs homologues au lithium-ion. Moins d'un tiers des entreprises de ce segment se concentrent sur la technologie lithium-ion conventionnelle, les autres développant des technologies de cellules de nouvelle génération telles que les batteries lithium-soufre, lithium-métal et à l'état solide. L'augmentation de la capacité du Canada à produire des cellules lithium-ion de grand format est une lacune notable dans son écosystème des batteries.

2.1.4. Assemblage de bloc-batteries

Le segment de l'assemblage de bloc-batteries est divisé en trois domaines principaux : l'assemblage de batteries pour les applications mobiles et stationnaires, les systèmes de gestion des batteries chargés d'assurer la sécurité des opérations, et la gestion thermique des cellules afin de minimiser leur dégradation et d'éviter tout emballement thermique. Contrairement aux segments plus en amont, la plupart des entreprises de ce segment opèrent commercialement (voir la **Figure 8**).



Figure 8 : Répartition des entreprises opérant à l'échelle pilote, en phase pré commerciale et commercialement dans le segment de la chaîne de valeur de l'assemblage de batteries.

Figure 8 - version textuelle

Le sous-segment de l'assemblage de packs représente la majeure partie de l'activité du segment au sens large. Les entreprises désignées comme des entreprises d'assemblage de packs peuvent être divisées en trois grandes catégories : les producteurs, les distributeurs et les intégrateurs. Les distributeurs sont des entreprises dont le modèle commercial est axé sur la vente de packs de batteries tiers. Les intégrateurs peuvent intervenir dans la configuration des systèmes de gestion des batteries et la mise en place de la gestion thermique. Les distributeurs et les intégrateurs s'approvisionnent à l'étranger pour leurs produits ou les composants essentiels de leurs produits, et ces entreprises exercent toutes une activité commerciale. Les producteurs sont concentrés parmi les grands équipementiers automobiles qui prévoient d'intégrer verticalement la fabrication de cellules de batterie et l'assemblage de packs dans leurs installations. Il existe toujours un obstacle lié aux dépenses d'investissement importantes pour les entreprises qui commercialisent l'assemblage de packs au Canada, ce qui nécessite un soutien continu pour ce segment.

2.1.5. Applications mobiles et stationnaires

Le segment Applications mobiles et stationnaires est le plus grand parmi ceux en aval dans la chaîne de valeur des batteries et compte donc le plus grand nombre de grandes entreprises et d'activités commerciales. Le sous-segment des applications stationnaires couvre un large éventail d'applications, allant du stockage résidentiel de batteries, aux micro-réseaux à basse température pour les communautés nordiques, en passant par les systèmes de stockage d'énergie à l'échelle des services publics. La grande majorité de ces entreprises opèrent à l'échelle commerciale, qu'elles soient petites ou grandes.

Les entreprises verticalement intégrées spécialisées dans les systèmes de stockage d'énergie à base de chimie alternative, qui représentent environ 14 % des entreprises de stockage stationnaire, font exception à cette règle. Il convient de noter que l'analyse du sous-segment du stockage stationnaire n'est pas exhaustive, mais la répartition entre les applications mobiles et stationnaires est illustrée à la **Figure 9**, qui montre que le secteur du stockage stationnaire est plus important en nombre que les entreprises axées sur la mobilité.

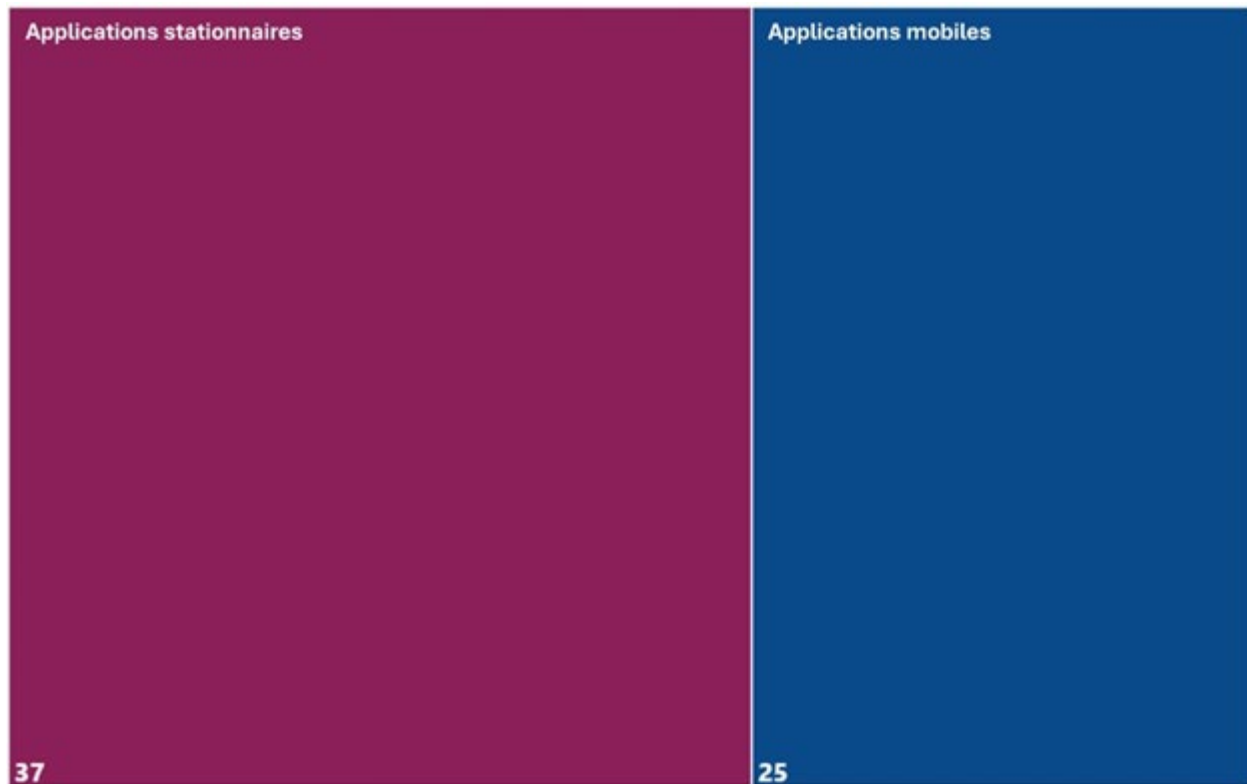


Figure 9 : Nombre d'entreprises opérant dans les applications stationnaires et mobiles.

Figure 9 - version textuelle

Le sous-segment des applications mobiles comprend les entreprises de véhicules électriques de transport, tels que les bus ou les trains électriques, les véhicules légers tels que les vélos électriques, les véhicules moyens et lourds destinés à la construction et à la logistique, les véhicules récréatifs pour le transport sur neige et le transport maritime, ainsi que les véhicules électriques destinés au transport de passagers.

Ce segment des véhicules électriques de transport de passagers se distingue par l'absence quasi totale d'entreprises de taille moyenne ou petite, ce qui indique la difficulté de se développer à grande échelle dans ce segment. Il convient de noter que ce segment ne prend en compte que la fabrication de véhicules électriques à batterie intégrée, sans tenir compte des pièces détachées telles que les moteurs électriques ou les pneus. Compte tenu de la domination des grands équipementiers dans ce secteur, il est peu probable que les nouveaux venus puissent facilement rivaliser pour atteindre un niveau de production TRL élevé sans un soutien important. Cependant, la présence de ces acteurs en aval offre des opportunités aux acteurs intermédiaires de la chaîne d'approvisionnement de s'associer avec les adoptants de leurs technologies.

2.1.6. Réutilisation et recyclage

Enfin, la réutilisation et le recyclage des batteries en fin de vie constituent actuellement le segment le plus petit de la chaîne d'approvisionnement. Les entreprises qui recyclent les batteries lithium-ion au Canada fonctionnent actuellement à pleine capacité grâce à l'approvisionnement en déchets de fabrication, malgré le faible volume de batteries en fin de vie, et ce segment devrait connaître une croissance importante à mesure que les véhicules électriques et les systèmes de stockage stationnaires seront déployés et mis hors service. En outre, les batteries de véhicules en fin de vie complètent un marché en pleine croissance de la réutilisation des batteries, qui utilise des batteries de seconde vie conservant au moins 50 % de leur capacité d'origine dans des systèmes de stockage d'énergie.

Les entreprises de ce segment qui se concentrent sur le traitement des batteries et la récupération des matériaux sont des petites et moyennes entreprises locales. Elles présentent un potentiel de croissance future pour répondre aux besoins prévus en matière de recyclage des batteries au Canada. Toutefois, leur croissance devrait coïncider avec l'adoption des véhicules électriques et le retrait progressif des anciens modèles afin de garantir une rentabilité continue. Il existe des entreprises plus importantes dans le domaine de la collecte des batteries en fin de vie, mais compte tenu de la taille de ce segment, l'offre est actuellement insuffisante pour le recyclage des batteries de grande capacité.

Le guide d'introduction d'Appel à Recycler Canada de 2022 sur la « Gestion de la batterie en fin de vie dans un véhicule électrique » prévoyait que quatre entreprises commerciales de récupération des matériaux des batteries seraient en activité au Canada d'ici 2025. Parmi celles-ci, deux opèrent actuellement à cette échelle. [Référence\[15\]](#) Bien qu'il n'existe aujourd'hui aucun volume important de batteries en fin de vie, l'augmentation de l'offre dans les années à venir permettra aux entreprises de recyclage des batteries de réaliser des économies d'échelle. La feuille de route du Transition Accelerator pour la chaîne de valeur des batteries au Canada [Référence\[16\]](#) prévoit une capacité minimale de recyclage de 27 GWh de batteries d'ici 2035 afin de maintenir sa part du marché nord-américain. Cela offre la possibilité de regrouper les installations de recyclage avec les centres de production de batteries existants, tandis que les installations de production optimisent leurs processus, et aux entreprises de recyclage d'alimenter les installations de production une fois que les volumes de recyclage auront atteint un niveau stable.

2.1.7. Conclusions sur l'écosystème

L'écosystème canadien des batteries évolue d'un réseau riche en ressources et axé sur l'innovation vers un réseau doté des opérations nécessaires pour soutenir une vision de production nationale. Le Canada dispose d'abondantes réserves nationales de matières premières pour la fabrication de batteries, telles que le lithium, le nickel, le manganèse, le cobalt et le graphite, et des plans sont en cours pour soutenir le secteur en aval grâce à une capacité émergente de traitement des minéraux et de développement de composants de batteries. Le Canada est bien placé pour mettre en place une chaîne de valeur résiliente et verticalement intégrée dans le domaine des batteries, mais des défis subsistent. Les segments intermédiaires critiques restent vulnérables en raison d'une croissance limitée et retardée, ce qui affecte la mise en place d'une chaîne de valeur complète. La conclusion de partenariats industriels, le ciblage des investissements et la préservation de l'ingéniosité et de la présence de l'industrie canadienne des batteries peuvent renforcer les segments intermédiaires et permettre à la chaîne de valeur canadienne des batteries d'être compétitive à l'échelle mondiale.

2.2. Infrastructure d'innovation en matière de batteries

L'écosystème des batteries comprend également une infrastructure d'innovation comprenant des infrastructures physiques et technologiques, des ressources qualifiées et collaboratives, ainsi que des installations qui accélèrent le développement de nouvelles idées en encourageant la pensée innovante et la prise de risques. Si ces ressources et activités existent dans l'industrie, elles existent également sous la forme de centres de recherche indépendants sur l'innovation en matière de batteries dans le milieu universitaire et en tant qu'organisations autonomes.

L'infrastructure d'innovation du Canada est soutenue depuis plusieurs décennies par l'expertise en recherche des universités et des laboratoires de tout le pays, et cela se poursuit aujourd'hui. De nombreux établissements de recherche et laboratoires possèdent l'expertise et les capacités nécessaires pour soutenir l'innovation dans le domaine des batteries, entre autres priorités. Aujourd'hui, plusieurs établissements se consacrent spécifiquement au développement des batteries dans le cadre de leurs activités principales.

Les centres d'innovation en matière de batteries, qui se concentrent généralement sur les innovations à faible NMT, apportent une contribution essentielle à la formation de personnel hautement qualifié (PHQ) et à la création de nouvelles technologies. Ces nouvelles technologies pourraient à terme atteindre la viabilité

commerciale et stimuler la compétitivité économique du Canada. Ces centres d'innovation offrent aux entreprises à but lucratif existantes la possibilité de tester leurs technologies et de collaborer dans leur domaine d'activité, d'accéder à des équipements qui seraient autrement hors de leur portée et de former du personnel hautement qualifié pour poursuivre ce travail.

Les centres universitaires suivants méritent d'être mentionnés, car ils témoignent de l'importance croissante des investissements dans la recherche universitaire sur les technologies des batteries.

1. Réseau des CEGEP – Programmes de formation destinés aux secteurs des batteries et des véhicules électriques
2. Université Concordia – Programme de recherche sur l'électrification Volt-Age
3. Université Dalhousie – Centre canadien d'innovation en matière de batteries
4. Université McGill – Centre McGill pour l'innovation en stockage et conversion d'énergie
5. Université McMaster – Centre de mécatronique et de technologies hybrides
6. Université de la Colombie-Britannique – Regroupement d'excellence en recherche sur l'innovation dans le domaine des batteries
7. Université de Calgary – Consortium sur les batteries de l'Ouest canadien
8. Université de Toronto – Pôle d'électrification
9. Université de Waterloo – Centre de recherche sur les batteries et l'électrochimie de l'Ontario

Ces centres s'ajoutent aux installations de recherche publiques telles que la ligne de prototypage de batteries à l'échelle pilote du Conseil national de recherches du Canada et son installation d'évaluation de la performance et de la sécurité des batteries, ainsi que le Centre d'excellence en électrification des transports et en stockage d'énergie de l'Institut de recherche Hydro-Québec (IREQ). Les centres d'innovation en matière de batteries complètent l'écosystème canadien des batteries en ancrant les regroupements de centre batteries sur une base géographique, comme le montre la **Figure 10**.

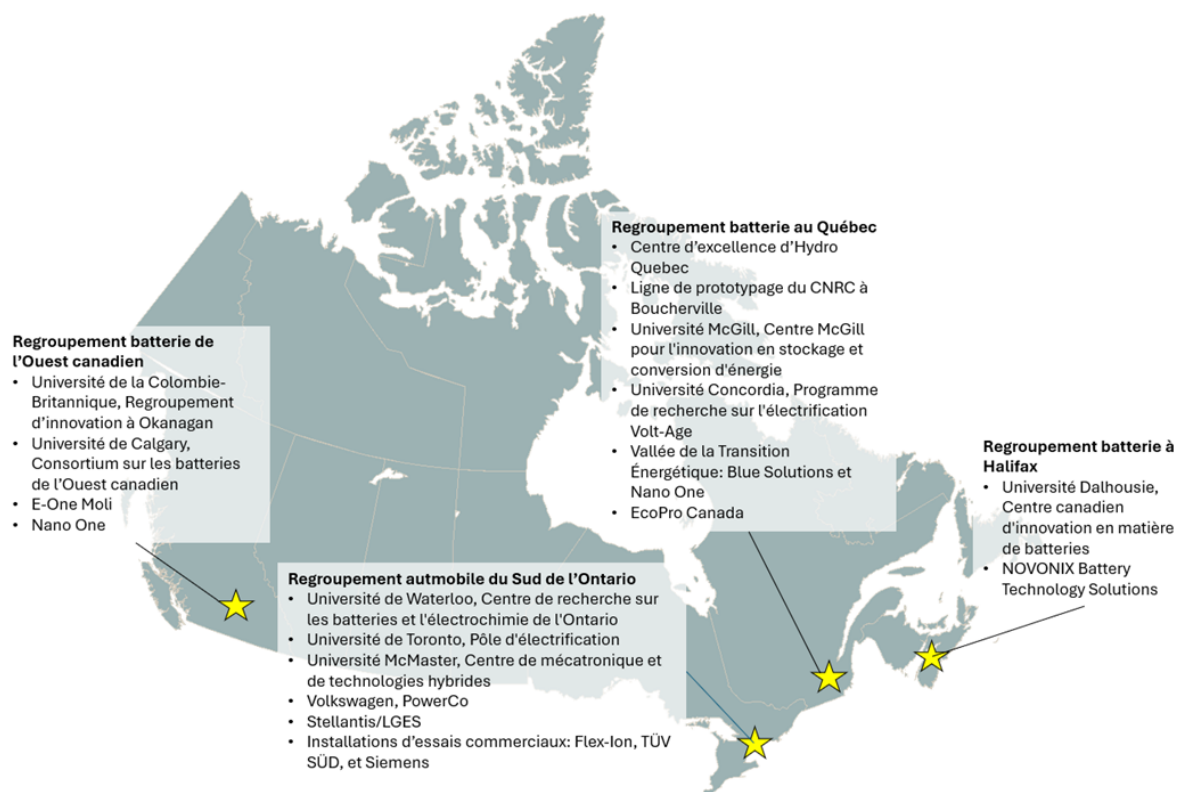


Figure 10 : Regroupement d'innovation émergents dans le domaine des batteries au Canada

Figure 10 - version textuelle

Regroupement batterie de l'Ouest canadien: La présence de l'innovation dans le domaine des batteries dans l'Ouest canadien est renforcée par le regroupement d'innovation en matière de batteries de l'Université de Colombie-Britannique à Okanagan, qui comprend un centre en matière de batteries, dont l'ouverture est prévue en 2026, qui proposera des services de prototypage de batteries à l'industrie et au milieu universitaire, ainsi que le Consortium sur les batteries de l'Ouest canadien. Ces installations se concentrent principalement sur les technologies de batteries à l'état solide et la fabrication de pointe. E-One Moli possède un centre de R&D à Maple Ridge, en Colombie-Britannique, depuis les années 1990 et a décidé d'agrandir son centre de R&D et de fabrication de batteries lithium-ion en 2023, mais ces projets ont été suspendus, la société mère ayant donné la priorité à sa production de cellules à Taiwan. Le centre d'innovation de Nano One à Burnaby, en Colombie-Britannique, a été agrandi en 2023 afin de poursuivre ses activités d'innovation et de production internes de matériaux pour cathodes de batteries, notamment le phosphate de fer lithié (LFP), l'oxyde de nickel-manganèse-cobalt (NMC) et l'oxyde de nickel-manganèse (LNMO).

Regroupement automobile du Sud de l'Ontario: Le regroupement du sud de l'Ontario est situé autour de son importante base de fabrication automobile. L'Université de Waterloo a récemment lancé le Centre de recherche sur les batteries et l'électrochimie de l'Ontario, qui se concentre sur les composés chimiques de nouvelle génération pour les batteries à haute densité énergétique. L'Université de Toronto abrite le Pôle d'électrification, qui se concentre également sur les applications des batteries, notamment pour les besoins en mobilité. Le Centre de mécanique et de technologies hybrides de l'Université McMaster se concentre sur les technologies automobiles de pointe, notamment les tests, la modélisation et la caractérisation des batteries. Ce regroupement a suscité le plus d'intérêt de la part des entreprises qui cherchent à établir des gigafactories pour soutenir les équipementiers existants, tels que les gigafactories PowerCo et LGES qui fournissent respectivement Volkswagen et Stellantis. En outre, cette région abrite des installations de développement et d'essai de batteries commerciales telles que Flex-Ion, qui propose le développement de batteries, depuis la mise au point de la chimie jusqu'à la fabrication des cellules, des modules et des packs, et TÜV SÜD, qui propose des tests de cyclage et d'abus des batteries ainsi que des analyses post-mortem. Au moment de la rédaction du présent document, Siemens a également annoncé la création d'un centre mondial de R&D en technologies de fabrication IA pour la production de batteries, qui sera initialement situé à Oakville, Toronto, et à Kitchener-Waterloo.

Regroupement batterie au Québec: Le regroupement au Québec s'appuie sur le travail de longue haleine d'Hydro Québec dans le domaine de l'innovation en matière de batteries au Centre d'excellence en électrification des transports et en stockage d'énergie, et s'est encore développé grâce aux investissements récents du gouvernement provincial dans la fabrication de batteries par l'intermédiaire d'EcoPro, à Shawinigan, au Québec. La chaîne de fabrication de batteries à l'échelle pilote du Conseil national de recherches du Canada, située à Boucherville, au Québec, facilite le prototypage de petites et grandes cellules à l'aide de procédés de fabrication industriels, ce qui réduit les risques liés aux nouvelles technologies de batteries. La Vallée de la transition énergétique (VTE) promeut un parc industriel à Bécancour, au Québec, où les investissements visent à promouvoir ses objectifs pour le secteur des batteries. Bien qu'il ne s'agisse pas directement d'un centre de R&D, cette vallée s'est présentée comme un banc d'essai pour les technologies innovantes. Il comprend des entreprises innovantes telles que Blue Solutions (spécialisée dans les batteries à l'état solide) et Nano One (matériaux actifs cathodiques LFP). Le Centre d'innovation en stockage et conversion d'énergie de l'Université McGill et le programme de recherche sur l'électrification Volt-Age de l'Université Concordia viennent s'ajouter à ce pôle

d'innovation, ainsi qu'à de nombreux autres établissements universitaires possédant une expertise plus générale en matière d'électrification.

Regroupement batterie à Halifax: Le regroupement de batteries de Halifax est ancré à l'Université Dalhousie, qui a récemment lancé le Centre canadien d'innovation en matière de batteries, dont l'objectif est d'accélérer la mise à l'échelle des innovations en permettant la construction de cellules de batteries de nouvelle génération qui répondent aux normes industrielles et démontrent ainsi leur faisabilité. Au cours des dernières décennies, le laboratoire du groupe de recherche Jeff Dahn a donné naissance à de nombreuses innovations et à un grand nombre de personnel hautement qualifié dans des entreprises de premier plan du secteur des batteries et de l'énergie, en se concentrant principalement sur la mise à l'échelle des matériaux, le stockage sur réseau et les cellules durables. La division Novonix Battery Technology Solutions, dont les installations sont situées dans la région de Halifax, en Nouvelle-Écosse, fournit des équipements de pointe pour les essais de batteries destinés à la recherche et au développement en laboratoire, et propose la fabrication et l'essai de cellules pilotes.

À l'avenir, ces regroupements pourraient s'ancrer davantage grâce à des partenariats plus ciblés sous la forme de « pôles » et d'infrastructures capables de produire des cellules prêtes à être commercialisées (c'est-à-dire des échantillons B), telles que des cellules grand format produites à des cadences minimales industrielles.

3. Déploiement des batteries

Les deux principales applications qui stimulent la demande en matière de déploiement de batteries sont les secteurs des transports et de l'électricité. Dans le domaine des transports, les batteries des véhicules électriques remplacent la combustion de combustibles fossiles dans les moteurs à combustion interne. Dans le secteur de l'électricité, les batteries peuvent soutenir un réseau électrique résilient en stockant l'électricité produite par des sources d'énergie renouvelables telles que le solaire et l'éolien, et utiliser cette énergie pour répondre aux pics de demande et fournir des services d'équilibrage du réseau rapides et précis, capables de remplacer ceux fournis par les générateurs à combustibles fossiles.

La mesure du déploiement des batteries pour ces applications fournit des indicateurs sur la santé et le potentiel de la chaîne d'approvisionnement en batteries. L'augmentation de la demande réduit les risques liés aux investissements dans la chaîne d'approvisionnement qui dépendent de la stabilité

et de la croissance du marché.^{[Référence[17]]} À l'inverse, le ralentissement observé dans ces déploiements en raison de la baisse de la demande pour les véhicules électriques a créé des obstacles pour le secteur des batteries, comme en témoignent les récentes annonces d'investissements au Canada.

3.1. Transports

En 2023, le secteur des transports était la deuxième source d'émissions de gaz à effet de serre (GES), représentant 23 % des émissions nationales totales.^{[Référence[18]]} Pour atteindre la neutralité carbone au Canada d'ici 2050, le secteur des transports doit abandonner les véhicules à moteur à combustion interne. À ce jour, cette transition a été presque entièrement tirée par les véhicules électriques légers à batterie (VEB) routiers.^{[Référence[19]]} Pour suivre cette évolution, les ventes de véhicules électriques en pourcentage du total des immatriculations de véhicules particuliers neufs sont publiées chaque trimestre (voir la **Figure 11**).^{[Référence[20]]} En supposant une durée de vie de 15 ans pour les véhicules, 100 % des véhicules neufs devraient être des véhicules électriques d'ici 2035 pour atteindre l'objectif de zéro émission nette d'ici 2050.

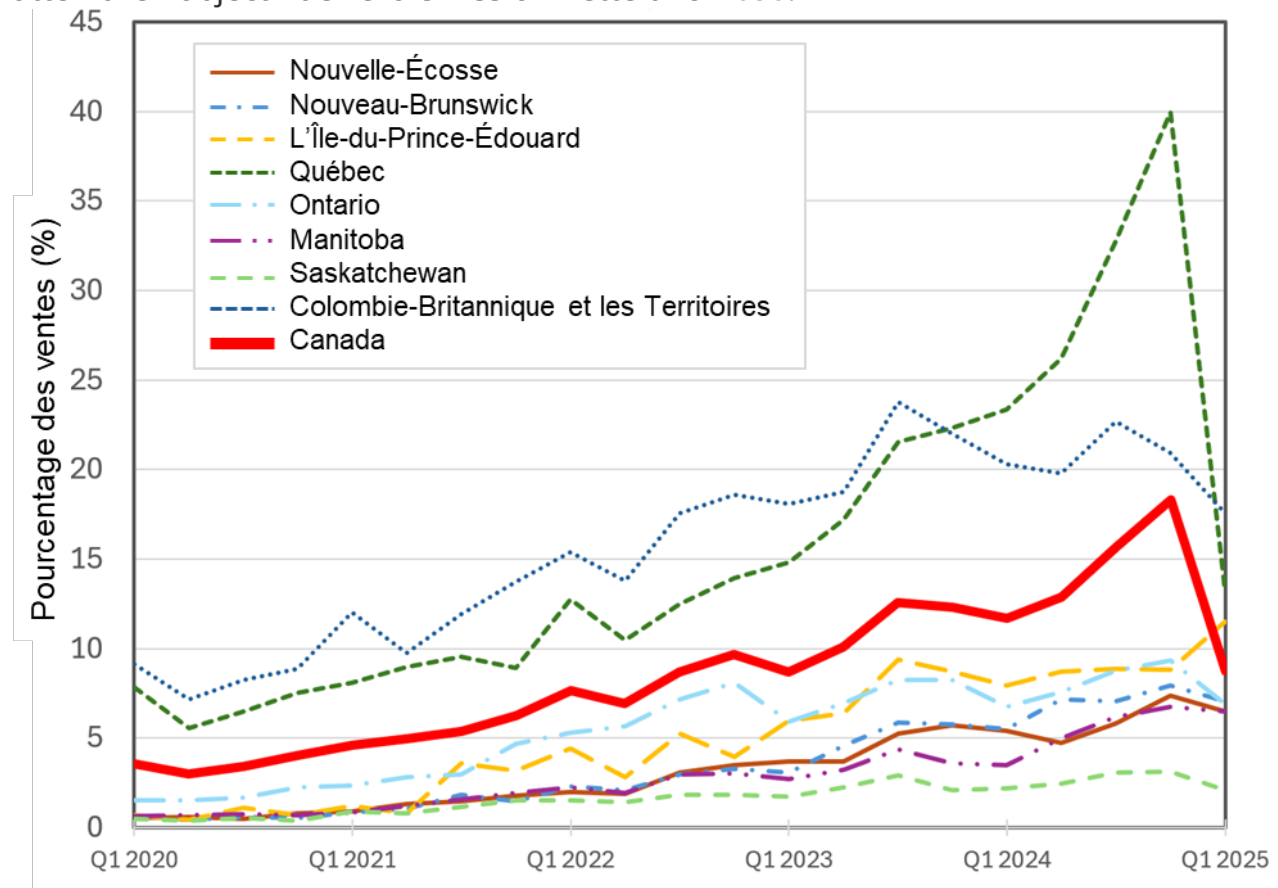


Figure 11 : Statistiques nationales et provinciales sur l'immatriculation des véhicules électriques au Canada de 2020 à 2024. (Source : Statistique Canada)

Figure 11 - version textuelle

Les données ci-dessus, provenant de Statistique Canada, montrent les immatriculations trimestrielles de véhicules électriques neufs par province. [Note de](#)

[bas de page](#) Les ventes de véhicules électriques au Canada ont été portées par les bons résultats du Québec et de la Colombie-Britannique, qui ont constamment dépassé la moyenne nationale. La baisse des immatriculations en 2025 est largement due à la suspension par le Québec de ses subventions à l'achat de véhicules électriques du 1^{er} février au 31 mars 2025. [Référence\[21\]](#) Cette baisse a entraîné un recul des ventes de VE de plus de 18 % à un peu moins de 9 % des ventes nationales, ce qui démontre que le passage aux véhicules non équipés d'un moteur à combustion interne dépend encore fortement des incitations accordées aux clients.

D'après les statistiques disponibles sur les ventes de véhicules électriques à batterie (VEB) et de véhicules électriques hybrides rechargeables (VEHR), environ 720 000 véhicules électriques ont été vendus au Canada entre 2020 et 2024. [Référence\[20\]](#) En supposant une taille moyenne de batterie de 80 kWh pour les VEB (estimation prudente basée sur la capacité totale) et une taille moyenne de batterie de 20 kWh pour les VEHR, la demande totale en batteries due à la demande intérieure en véhicules particuliers pour ces années est indiquée dans la **Figure 12**.

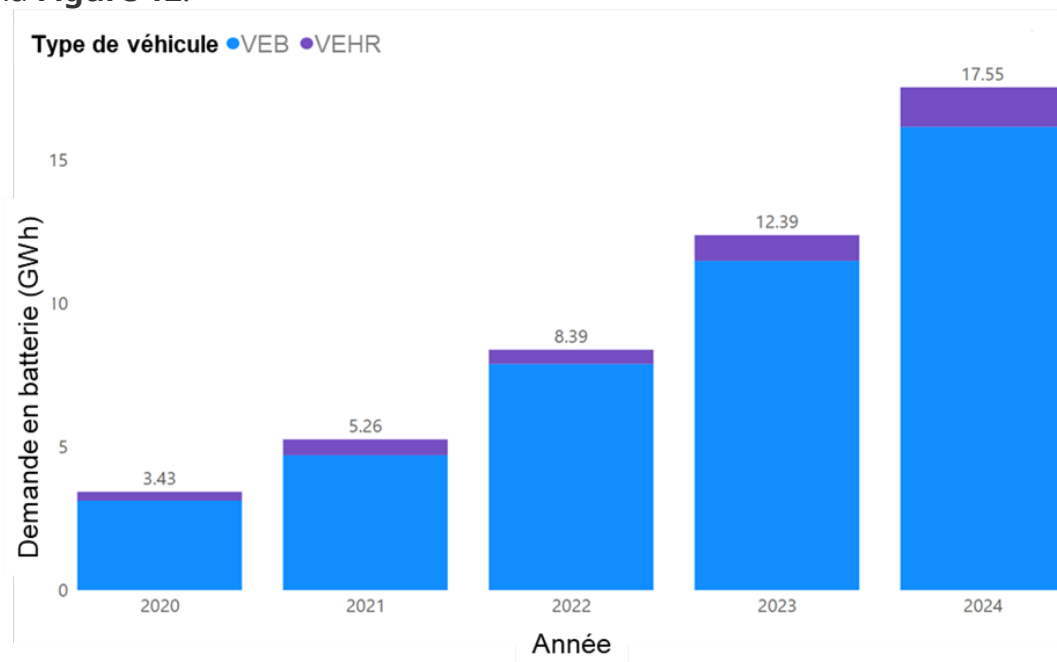


Figure 12 : Demande annuelle de batteries au Canada pour les véhicules électriques à batterie et les véhicules hybrides rechargeables.

Figure 12 - version textuelle

Ces valeurs sont similaires à celles prévues dans les perspectives de BloombergNEF pour les véhicules électriques dans le scénario « zéro émission nette » (**Figure 13**), avec quelques écarts tenant compte des différences dans les hypothèses relatives à la taille des batteries.

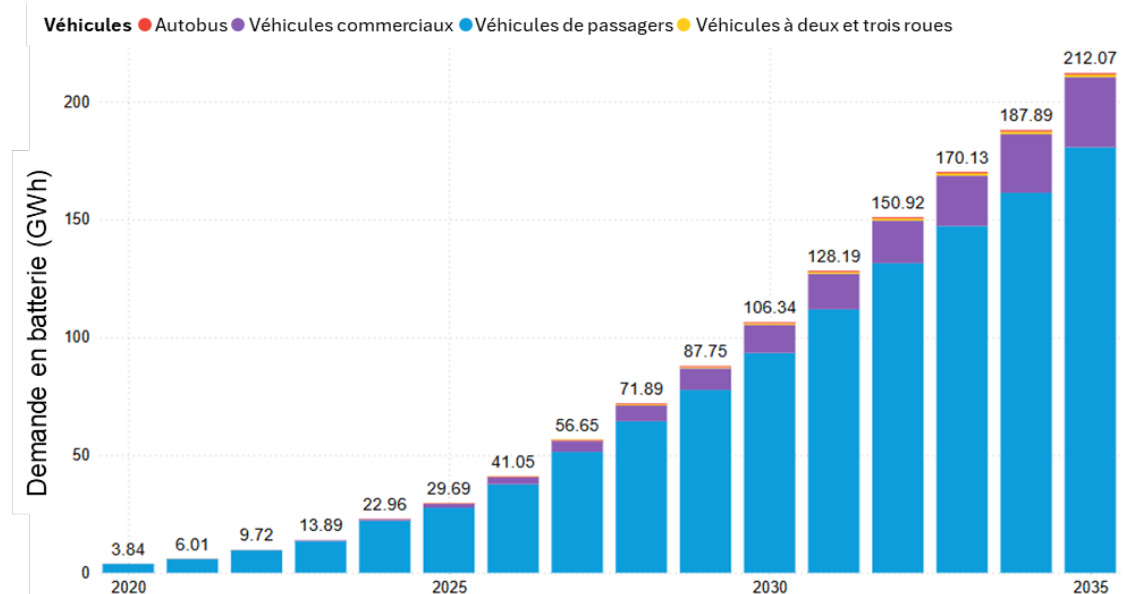


Figure 13 : Demande annuelle de batteries au Canada en GWh pour tous les types de véhicules, dans l'hypothèse d'un scénario zéro émission nette d'ici 2050. (Source : BloombergNEF)

Figure 13 - version textuelle

3.2. Électricité

Parallèlement à ses objectifs en matière de vente de véhicules zéro émission, le gouvernement du Canada s'est également fixé pour objectif d'atteindre un réseau électrique à zéro émission nette d'ici 2035. Bien que les batteries ne soient pas une source de production d'électricité, elles constituent une technologie directement habilitante pour les sources d'électricité non émettrices, dont la capacité devrait dépasser 83 GW en 2035. [Référence\[16\]](#) Pour soutenir ce modèle, Energy Storage Canada, dans son rapport de 2022 intitulé *Energy Storage: A Key Net Zero Pathway in Canada*, [Note de bas de page\[22\]](#) a souligné la nécessité de disposer d'une capacité de

stockage d'énergie de 8 à 12 GW pour le réseau d'ici 2035, tandis que le Canadian Climate Institute, plus ambitieux, a fixé un objectif de 12 GW d'ici 2030. [Référence\[23\]](#)

La **Figure 14** montre les prévisions de capacité cumulative de stockage par batterie au Canada jusqu'en 2035, qui ne sont liées à aucun objectif de zéro émission nette. Les ajouts de capacité devraient augmenter considérablement d'ici la fin de 2025, pour atteindre environ 4 GWh. Cette augmentation est principalement due aux services de transfert d'énergie, tels que l'arbitrage énergétique. D'ici 2035, BloombergNEF prévoit une capacité de stockage d'énergie cumulée d'environ 32,5 GWh. Cela correspond à une augmentation annuelle de la capacité d'environ 3 GWh par an.

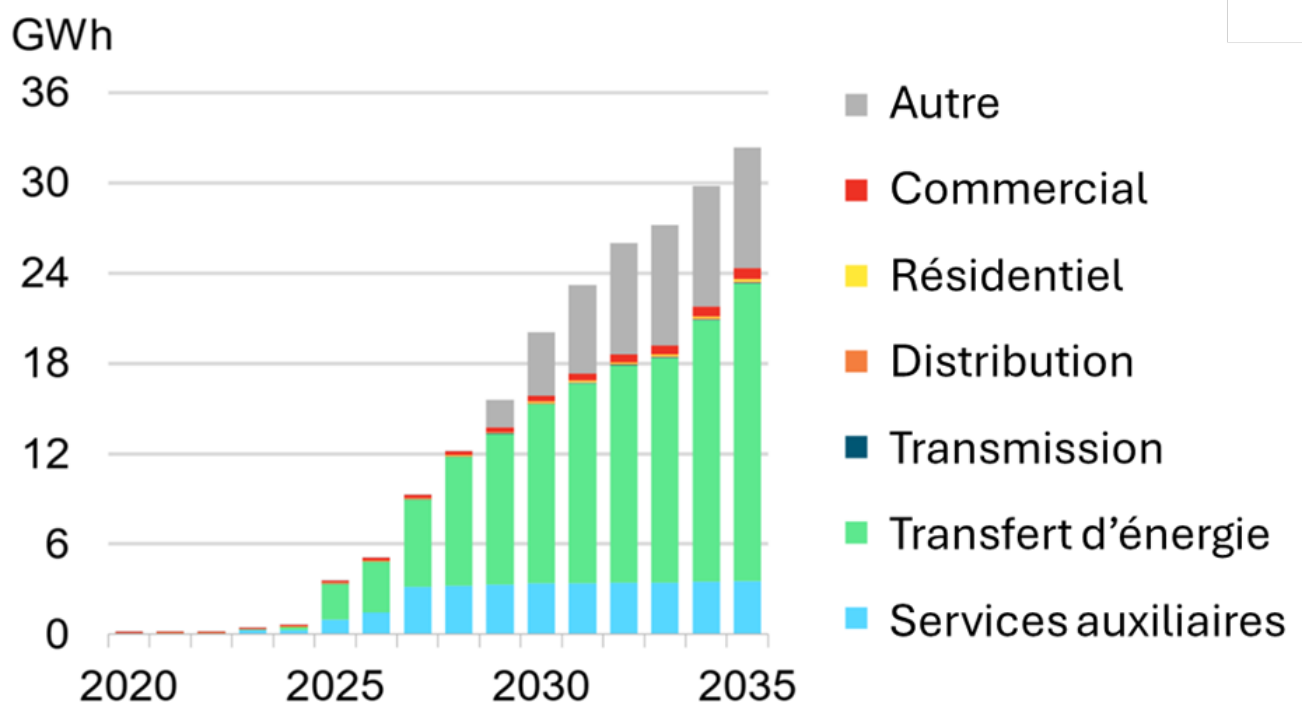


Figure 14 : Capacité de stockage stationnaire cumulée prévue au Canada, en l'absence de changements politiques majeurs. (Source : BloombergNEF)

Figure 14 - version textuelle

BloombergNEF prévoit qu'en 2025, environ 91 % de la demande mondiale de stockage stationnaire sera satisfaite par des batteries lithium-ion à base de LFP, tandis que 6 % sera satisfaite par des batteries lithium-ion à base de NMC. Le rôle du NMC devrait continuer à diminuer jusqu'à atteindre des niveaux négligeables en raison de ses limites en termes de coût et de durée de vie, tandis que le LFP restera dominant avec 81 % de la demande totale et que les batteries sodium-ion devraient croître pour atteindre 10 %.

3.3. Demande totale

Au cours des dernières années, les ventes de véhicules particuliers neufs au Canada ont oscillé autour de 1,8 million par an. En supposant une taille moyenne de batterie de 80 kWh par véhicule, le Canada pourrait avoir besoin d'une production annuelle d'environ 144 GWh en 2035 pour répondre à ses besoins nationaux, si 100 % des véhicules étaient des véhicules électriques à batterie ou hybrides.

Selon les prévisions mondiales de l'Agence internationale de l'énergie pour les véhicules électriques en 2024, la demande annuelle totale de batteries pour les applications de mobilité et de stockage stationnaire devrait atteindre environ 10,2 TWh en 2035, afin d'atteindre la neutralité carbone d'ici 2050. [Référence\[19\]](#) Sur ce total, 6,9 TWh proviendront des véhicules de passagers, 0,8 TWh du stockage stationnaire et 2,5 TWh d'autres applications de mobilité, notamment les deux/trois-roues, les autobus et les camions. Pour déterminer la demande prévue pour les véhicules électriques non destinés au transport de passagers au Canada, on suppose que le rapport entre la demande de batteries pour les véhicules de transport de passagers et celle pour les véhicules non destinés au transport de passagers est le même pour la demande mondiale et la demande au Canada, ce qui donne une demande annuelle d'environ 52 GWh. Dans l'ensemble, cela signifie que le Canada aurait besoin d'une production annuelle d'environ 196 GWh de batteries en 2035 pour répondre à la demande intérieure pour les applications liées au transport.

En supposant que la demande prévue plus élevée de 12 GW de stockage d'énergie d'ici 2035 soit en bonne voie pour atteindre la neutralité carbone, et en supposant une moyenne de 4 heures de stockage pour ces déploiements, 48 GWh de stockage seraient nécessaires. Sur la base des technologies actuelles et en supposant une durée de vie moyenne des systèmes de 10 ans, une production annuelle de batteries de 4,8 GWh serait nécessaire pour répondre à la demande intérieure tout en maintenant 12 GW de stockage sur le réseau. Dans le scénario politique actuel, une production annuelle de 3 GWh de batteries de stockage stationnaires serait nécessaire.

En combinant cela avec la demande totale de 196 GWh pour les véhicules, le Canada pourrait avoir besoin **d'une production annuelle de 200 GWh de batteries en 2035 pour répondre à ses besoins nationaux dans ces deux segments.**

4. Valeurs de références et cibles en matière de technologie des batteries

L'ASIB définit cinq cadres, dont deux sont utilisés pour définir les indicateurs de performance les plus pertinents pour les batteries. [Note de bas de pageb](#)

Le **Cadre de performance des batteries** met en évidence cinq indicateurs de performance généraux qui décrivent les avantages techniques de toute batterie : densité énergétique, densité de puissance, coût, sécurité et durée de vie. Le **Cadre de durabilité des batteries** décrit les besoins supplémentaires pour répondre au trilemme énergétique et aux objectifs de durabilité.

À partir de ces éléments, le présent rapport met en évidence les six indicateurs de performance suivants comme étant les plus pertinents pour relativiser l'innovation en matière de batteries et son potentiel pour atteindre les objectifs de l'ASIB.

- **Densité énergétique:** énergie pouvant être stockée dans une cellule (mesurée en wattheures, Wh).
- **Densité de puissance:** flux d'énergie pouvant être absorbé ou libéré pendant la charge et la décharge, respectivement, normalisé par la masse (exprimé en W/kg) ou le volume (exprimé en W/L).
- **Durée de vie:** capacité d'une batterie à se charger ou se décharger pendant de nombreux cycles sur une longue période avec une dégradation limitée des performances.
- **Sécurité:** exigences établies pour prévenir tout dommage résultant d'un dysfonctionnement de la batterie pendant son utilisation, son stockage, sa manipulation et son élimination.
- **Coût:** Coût de fabrication d'une batterie, généralement exprimé en \$/kWh ou \$/kg.
- **Durabilité:** déchets issus de la fabrication des batteries, les plus importants étant les émissions de gaz à effet de serre, exprimés en $kgCO_2$ eq/kWh et l'eau.

Une explication détaillée de ces indicateurs figure à l'**appendice B** et permet de mieux comprendre comment chacun d'entre eux est calculé. D'autres indicateurs importants, tels que les performances à des températures extrêmes, la vitesse de recharge et l'autonomie, dépendent principalement des indicateurs ci-dessus et de l'application utilisant la batterie. Ils ne sont donc pas traités séparément ici. Ce rapport offre une compréhension intermédiaire de ces six indicateurs de

performance afin de mieux apprécier leur impact sur d'autres exigences dictées par le marché.

Les sections suivantes présentent des données de référence pour les technologies de pointe, pour chaque indicateur de performance, et fournissent des objectifs de performance pour l'avenir. L'analyse comparative des technologies de batterie a été réalisée en agrégeant les données de performance de pointe des technologies de batterie actuelles. Cela comprend les données accessibles au public sur les matériaux, les cellules et les systèmes des batteries disponibles dans le commerce et déployées, ainsi que les informations sur les technologies de batterie de nouvelle génération rapportées par l'industrie et dans la littérature évaluée par des pairs. Les exigences cibles en matière de batteries pour différentes applications et issues de diverses feuilles de route technologiques ont été recueillies et comparées afin de fournir un contexte pour les cas d'utilisation des différentes technologies et conceptions de batteries, et afin de définir les attentes en matière d'objectifs de performance de pointe pour l'avenir. Par souci de cohérence, les références sont fournies au niveau des cellules, car les performances des batteries dépendent en grande partie de leur conception et de leur optimisation au niveau des cellules et offrent le plus de possibilités d'innovation.

Les données de performance accessibles au public concernant les cellules de batterie commerciales pour différentes compositions chimiques, capacités, formats et applications ont été agrégées afin de fournir un référentiel des capacités des batteries modernes. [Référence24](#) Ces cellules de référence et leurs applications sont présentées dans le **tableau 1**. La technologie des cellules commerciales testées aujourd'hui est probablement issue d'activités de R&D menées au cours des années précédentes ; les données présentées dans cette section reflètent l'état de l'art de la technologie des batteries entre le début et la fin des années 2010 environ.

Tableau 1 : Applications des cellules commerciales sélectionnés pour l'analyse comparative, telles que fournies par les sites web des fabricants de cellules, les spécifications des cellules et les tests effectués par des tiers.

Fabricant de cellules	Nom du produit	Applications cibles
A123 Systems	26700 NCA GL	sport automobile, Formule 1 Référence[25]
BYD	Blade C102F	véhicules électriques Référence[26] (BYD Dolphin longue portée 2022)
BYD	C45F-302Ah	systèmes d'alimentation électrique, systèmes de stockage d'énergie solaire, véhicules électriques, motos électriques, vélos électriques, applications de micro-mobilité Référence[27]
CATL	Tesla Model 3	véhicules électriques Référence[24] (Tesla Model 3 2023)
Farasis	P79B3	véhicules électriques Référence[28]
Batterie HiNa	NACR26700 MP3.0 (A)	vélos électriques, systèmes de stockage d'énergie portables et résidentiels Référence[29]
LG Energy Solution	INR21700-M58T	électronique grand public, trottinettes électriques, vélos électriques, outils électriques Référence[30]
LG Chem	E66A	véhicules électriques Référence[31] (Audi e-tron GT quattro, Porsche Taycan 2019)
LG Chem	E61V	véhicules électriques Référence[24] (Audi e-tron 2019)
Molicel	INR21700-P45B	véhicules électriques, avions électriques à décollage et atterrissage verticaux (eVTOL), micro-mobilité, appareils électroménagers et autres applications Référence[32]

Tableau 1 : Applications des cellules commerciales sélectionnés pour l'analyse comparative, telles que fournies par les sites web des fabricants de cellules, les spécifications des cellules et les tests effectués par des tiers.

Fabricant de cellules	Nom du produit	Applications cibles
Panasonic	Tesla Model Y 21700	véhicules électriques Référence[24] (Tesla Model Y 2020)
Primearth EV Energy	Toyota Camry hybride	véhicule électrique hybride Référence[24] , Référence[33] (Toyota Camry hybride 2019)
Samsung	CS1200R	véhicules électriques Référence[20] (BMW i3 2019)
Samsung	BMW 530e	véhicules électriques hybrides rechargeables Référence[20] (BMW 530e 2019)
Tesla	Tesla Model Y 4680	véhicules électriques Référence[34] (Tesla Model Y 2022)

Bien qu'il ne soit pas possible de maximiser indépendamment chaque indicateur de performance de la batterie, il suffit de s'assurer que les performances globales de la batterie dépassent les exigences de l'application. Par conséquent, les repères et les objectifs présentés ci-dessous sont proposés aux décideurs afin de leur permettre de comprendre la valeur relative des projets d'innovation, même si des compromis sont inhérents à une conception axée sur un objectif et qu'il convient de faire preuve de discernement lors de la sélection des objectifs de performance. Voir **l'appendice B** pour plus d'informations sur les compromis et les indicateurs composites.

4.1. Densité énergétique des cellules

Les valeurs de références de densité énergétique des cellules commerciales, tirées du **tableau 1** sont présentées ici selon trois perspectives.

1. Densités énergétiques volumétriques et gravimétriques par format de cellule (**Figure 15**)

2. Densités énergétiques volumétriques et gravimétriques par composition chimique des cellules (**Figure 16**)
3. Densités énergétiques gravimétriques et capacité par format de cellule (**Figure 17**)

Les valeurs de densité énergétique cibles sont sélectionnés en fonction des performances des cellules et de leur prix.

Valeur de performance cible pour 2035: Des performances élevées sont généralement obtenues grâce à l'utilisation de cathodes **NMC**, et des innovations au niveau de l'anode devraient permettre d'augmenter encore les densités énergétiques. La **Figure 15** et la **Figure 16** indiquent un objectif de densité énergétique gravimétrique de **500 Wh/kg** et un objectif de densité énergétique volumétrique de **1150 Wh/L** pour 2035.

Valeur d'accessibilité financière cible: Les batteries abordables doivent trouver un équilibre entre un faible coût de fabrication des cellules et une densité énergétique adaptée à leur application finale. Cependant, les cellules haute performance peuvent nécessiter des techniques de fabrication et des matériaux plus coûteux pour atteindre leurs performances élevées. Le **LFP** est un candidat pour répondre à la fois aux critères d'accessibilité financière et de performances acceptables, avec un objectif de densité énergétique gravimétrique de **270 Wh/kg** et un objectif de densité énergétique volumétrique de **550 Wh/L** d'ici 2035.

Valeur cible pour le sodium-ion: Enfin, cette section ne serait pas complète sans mentionner le potentiel des batteries **sodium-ion** comme alternative compétitive aux batteries lithium-ion pour les applications de stockage stationnaire et de mobilité à faible autonomie. Pour ce type de batterie, un objectif à long terme est défini dans la **Figure 32** pour une densité énergétique gravimétrique de **220 Wh/kg** et une densité énergétique volumétrique de **500 Wh/L**.

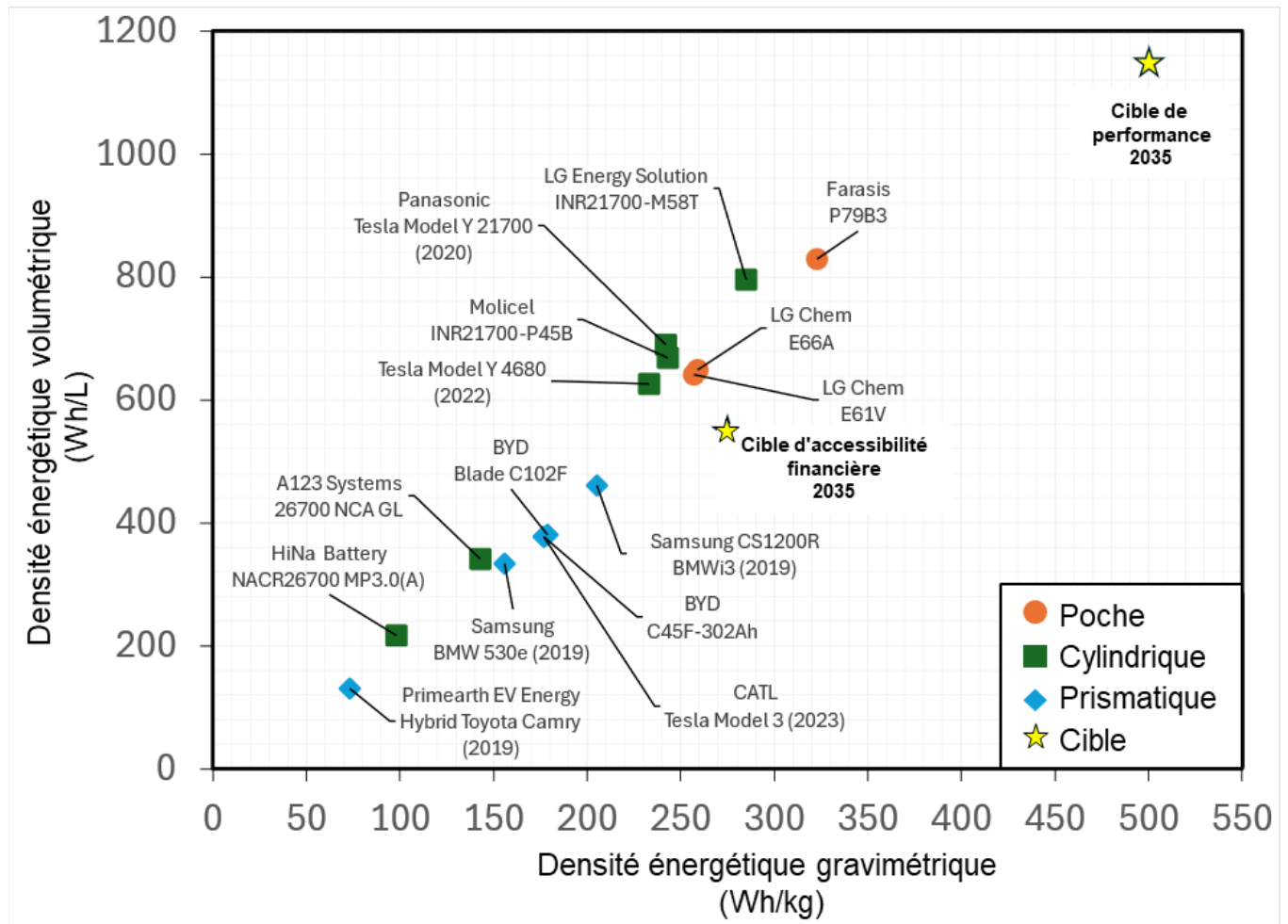


Figure 15 : Densités énergétiques volumétriques (mesurées en Wh/L) et gravimétriques (mesurées en Wh/kg) pour une sélection de cellules commerciales, classées par format (poche, cylindrique ou prismatique). Les densités énergétiques sont mesurées en déchargeant à partir d'un ÉdC de 100 % à un taux C/10 à 25 °C jusqu'à atteindre la limite de tension inférieure (2 V ou 2,5 V). [Référence\[24\]](#)

Figure 15 - version textuelle

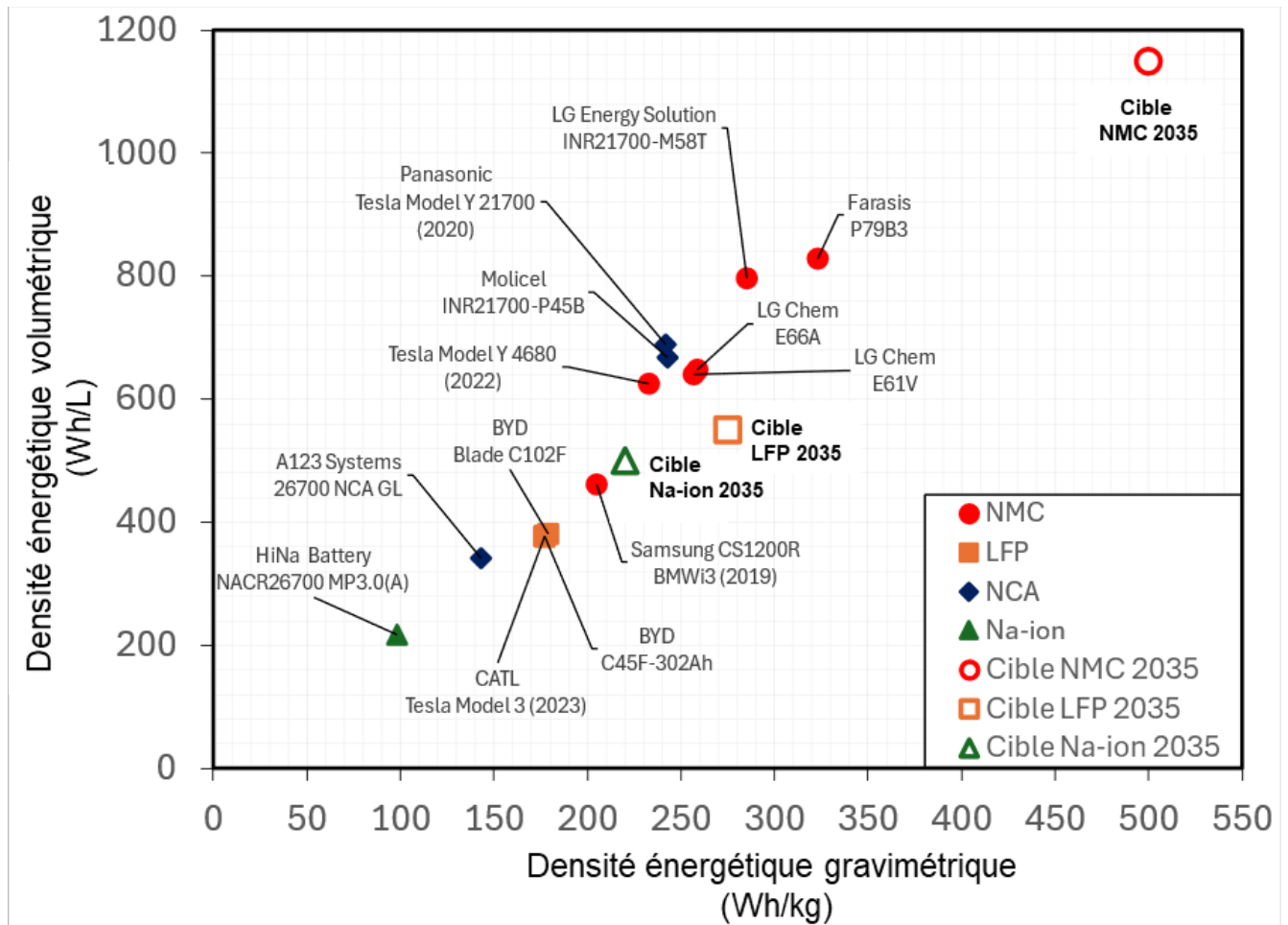


Figure 16 : Densités énergétiques volumétriques (mesurées en Wh/L) et gravimétriques (mesurées en Wh/kg) pour une sélection de cellules commerciales, classées selon leur composition chimique (NMC, LFP, NCA, Na-ion). Les densités énergétiques sont mesurées en déchargeant à partir d'un ÉdC de 100 % à un taux C/10 à 25 °C jusqu'à atteindre la limite de tension inférieure (2 V ou 2,5 V). [Référence\[24\]](#)

Figure 16 - version textuelle

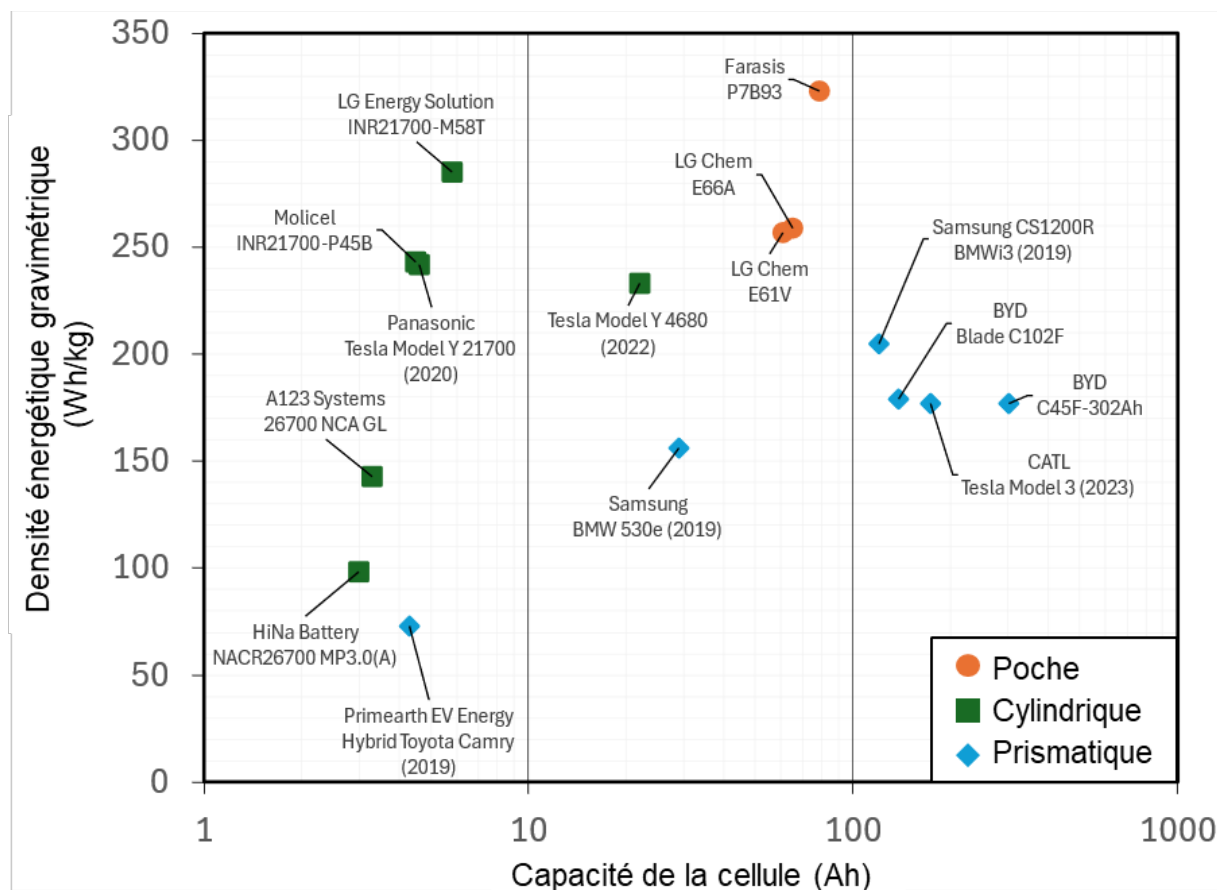


Figure 17 : Densités énergétiques gravimétriques (mesurées en Wh/kg) et capacités nominales des cellules (mesurées en Ah) pour une sélection de cellules commerciales, classées selon leur format (poche, cylindrique ou prismatique). Les densités énergétiques sont mesurées en déchargeant à partir d'un ÉdC de 100 % à un taux C/10 à 25 °C jusqu'à atteindre la limite de tension inférieure (2 V ou 2,5 V). [Référence\[24\]](#)

Figure 17 - version textuelle

Points à retenir

- Comme le montre la **Figure 15**, les densités énergétiques volumétriques et gravimétriques des cellules de batterie commerciales sont fortement corrélées. [Note de bas de page](#)
- La composition chimique de l'anode et de la cathode joue un rôle important dans la détermination de la densité énergétique des cellules (voir l'**appendice C** pour les calculs à l'appui). Par exemple, les cellules prismatiques BYD et CATL à composition chimique LFP et graphite présentées dans la **Figure 15** et la **Figure 16** ont des densités énergétiques presque identiques (177-179 Wh/kg et 377-381 Wh/L). Cependant, les

chimies NMC et nickel, cobalt, oxyde d'aluminium (NCA) ont généralement des densités énergétiques plus élevées et plus variables que le LFP. La variation de la densité énergétique des cellules NMC est en partie due à la variation de la composition de la cathode et de l'anode : les compositions de cathode NMC à plus forte teneur en nickel et les compositions d'anode en graphite avec incorporation de silicium ont généralement des densités énergétiques plus élevées. D'autres combinaisons commerciales sont présentées ci-dessous.

La cellule poche NMC Farasis P79B3 est composée d'une cathode NMC avec une teneur en Ni supérieure à 90 % et d'une anode en graphite avec un peu de silicium, et elle présente la densité énergétique la plus élevée des cellules sélectionnées (323 Wh/kg et 829 Wh/L). [Référence\[28\]](#), [Référence\[35\]](#)

La cellule poche NMC LG Chem E66A est composée d'une cathode NMC avec une composition de 70 % de Ni ($\text{LiNi}_{0,7}\text{Mn}_{0,2}\text{Co}_{0,1}\text{O}_2$) et d'une anode en graphite, et présente une densité énergétique intermédiaire (259 Wh/kg et 648 Wh/L). [Référence\[31\]](#), [Référence\[36\]](#)

La cellule prismatique Samsung CS1200R NMC est composée d'une cathode NMC avec une composition de 60 % de Ni ($\text{LiNi}_{0,6}\text{Mn}_{0,2}\text{Co}_{0,2}\text{O}_2$) et d'une anode en graphite, et présente une densité énergétique plus faible (205 Wh/kg et 461 Wh/L). [Référence\[37\]](#), [Référence\[38\]](#)

- Comme le montre la **Figure 16**, les batteries sodium-ion telles que la HiNa Battery NACR26700 MP3.0(A) ont une densité énergétique inférieure à celle des batteries lithium-ion classiques. Cette cellule cylindrique de 3 Ah est composée d'une cathode en sodium, cuivre, manganèse et oxyde de fer, associée à une anode en carbone souple dérivé de l'antracite, avec des densités énergétiques de 98 Wh/kg et 217 Wh/L. [Référence\[39\]](#)
- La densité énergétique des cellules de batterie peut varier considérablement, comme le montre la **Figure 15**, et est optimisée pour les exigences de l'application cible, comme le montre la **Figure 17**. Cependant, la capacité des cellules seule ne suffit pas à déterminer l'application d'une batterie, car des cellules de petite et de grande capacité peuvent être utilisées pour la même application. Par exemple, l'une des versions 2020 du Tesla Model Y utilise des cellules cylindriques de 4,6 Ah de Panasonic avec une cathode NCA et une anode en graphite, tandis que l'une des versions 2022 du même véhicule utilise des cellules cylindriques de 22 Ah avec une cathode NMC811 ($\text{LiNi}_{0,8}\text{Mn}_{0,1}\text{Co}_{0,1}\text{O}_2$) et une anode en graphite. [Référence\[40\]](#), [Référence\[41\]](#)

- La **Figure 17** montre la tendance croissante à l'augmentation de la capacité des cellules et à la préférence pour les cellules de grand format (en particulier les cellules prismatiques) dans les applications de mobilité et de stockage stationnaire. Cela s'explique par le fait qu'elles permettent d'augmenter la densité énergétique volumétrique des cellules grâce à une meilleure efficacité volumique de la part de matière active et de réduire les coûts grâce à la réduction des étapes de fabrication qui augmentent avec le nombre de cellules. [Référence\[27\]](#), [Référence\[42\]](#), [Référence\[43\]](#), [Référence\[44\]](#)

4.2. Densité de puissance des cellules

La capacité de *décharge continue* des cellules dans le **tableau 1** est présentée dans la **Figure 18**. La capacité de puissance *maximale*, ou la puissance maximale pouvant être fournie pendant 5 minutes à partir d'un état de charge (ÉdC) de 100 %, est incluse à titre de référence dans la **Figure 19**.

Il est important de noter que les cellules de batterie utilisées dans les véhicules électriques hybrides (VEH), les VEHR et les VEB présentent des variations de puissance, comme le montre le **tableau 2**. Ce tableau met en évidence la manière dont trois cellules prismatiques de Primearth EV Energy et Samsung présentées dans les **Figure 15**, **Figure 17** et **Figure 18** équipent des véhicules de taille similaire mais avec différents niveaux d'électrification, à savoir la Toyota Camry HEV 2019, la BMW 530e PHEV 2019 et la BMWi3 BEV 2019.

Les valeurs de densité de puissance cible de décharge continue sont indiqués dans la **Figure 18** pour les VEB et les VEHR.

Valeur cible pour les VEB: Les VEB nécessitent une densité de puissance moindre, compensée par une densité de puissance et une densité énergétique élevées afin d'atteindre l'autonomie souhaitée. L'objectif à long terme pour les batteries des VEB est **de 1 000 W/kg**.

Valeur cible pour les VEHR: Les VEHR nécessitent une densité de puissance plus élevée que les VEB, utilisant des cellules plus petites. L'objectif à long terme pour les batteries PHEV est **de 1750 W/kg**.

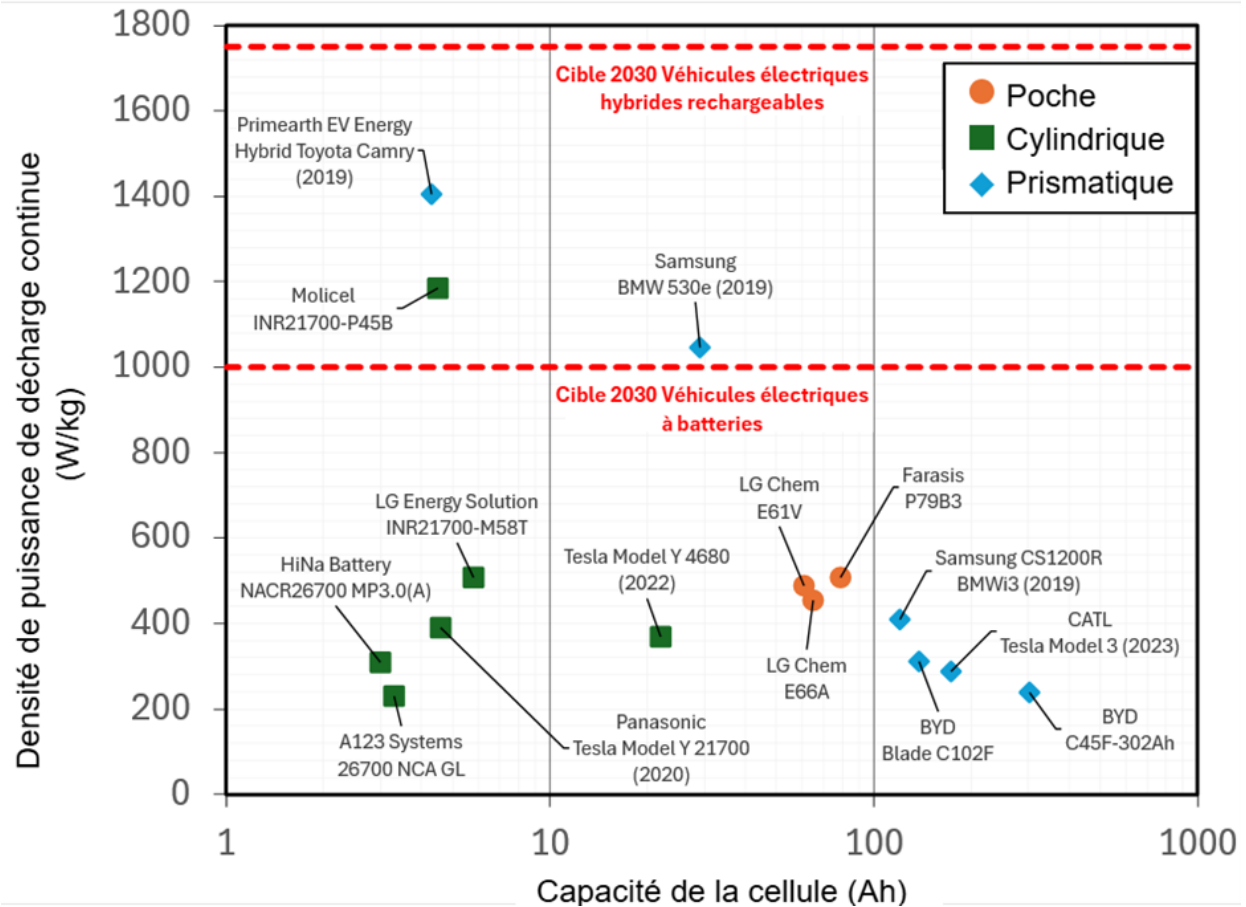


Figure 18 : Densités de puissance de décharge continue (mesurées en W/kg) et capacités nominales des cellules (mesurées en Ah) pour une sélection de cellules commerciales, classées par format (poche, cylindrique ou prismatique). Les densités de puissance de décharge continue sont déterminées en déchargeant la cellule à partir d'un ÉdC de 100 % à 25 °C jusqu'à atteindre un ÉdC de 10 % et soit la limite de tension inférieure (2 ou 2,5 V), soit une température de surface maximale de 68°C. [Référence\[24\]](#)

Figure 18 - version textuelle

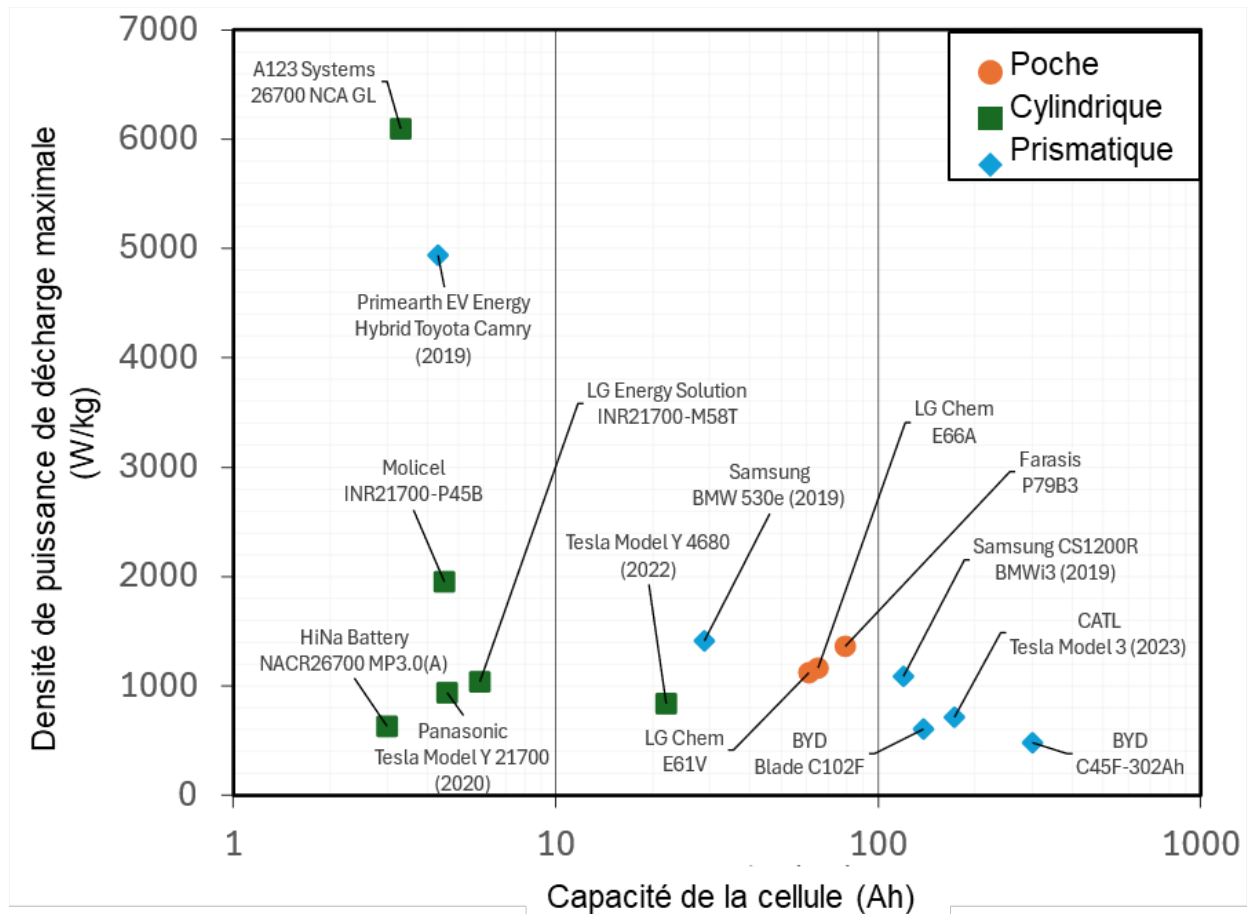


Figure 19 : Densités de puissance de décharge maximale (mesurées en W/kg) et capacités nominales des cellules (mesurées en Ah) pour certaines cellules commerciales, classées selon leur format (poche, cylindrique ou prismatique). Les densités de puissance de décharge maximale sont déterminées en déchargeant la cellule à partir d'un SOC de 100 % à 25 °C pendant 5 minutes.

Figure 19 - version textuelle

Tableau 2 : Comparaison de certaines cellules lithium-ion prismatiques utilisées dans des véhicules hybrides électriques, hybrides rechargeables et électriques à batterie de taille similaire et de leurs capacités de puissance.

Fabri cant de la cellul e	Mo dèle	Autonomie électrique (km) Référence[44], Réfère nce[45], Référence[39]	Poids du véhicule (lb) Référence[37], Référer ce[38], Référence[39]	Taille du pack (kWh) Référence[46], Référer ence[47], Référence[48]	Densi té de puiss ance de déch arge conti nue (W/k g)
Prime arth EV Energ y	Toy ota Ca mry hybr ide 201 9	0	3472	1	1406
Sams ung	BM W 530 E 201 9	26	4297	9,2	1046
Sams ung	BM W i3 201 9	203	3276	42,2	410

Points à retenir

- La densité de puissance d'une cellule peut varier considérablement en fonction de l'application prévue. Les cellules plus petites sont plus susceptibles d'être utilisées dans des applications à forte puissance, les électroniques personnelles et des applications plus spécialisées des

batteries. Les cellules plus grandes n'atteignent généralement pas les densités de puissance de leurs homologues plus petites.

- La capacité de puissance des cellules de batterie peut également varier considérablement selon les applications, en fonction du cycle de service et des exigences en matière de puissance.
 - Exemple de capacité de puissance faible : la cellule prismatique LFP BYD C45F-302Ah de 302 Ah peut être utilisée dans des applications de stockage stationnaire, qui peuvent suivre un cycle de charge et de décharge quotidien (c'est-à-dire une charge et une décharge sur plusieurs heures une fois par jour).
 - Exemple de capacité de puissance plus élevée : la cellule cylindrique A123 Systems 26700 NCA GL de 3,3 Ah est utilisée dans les sports automobiles, par exemple dans le système de récupération d'énergie des voitures de Formule 1, où les cellules de batterie servent à récupérer l'énergie du freinage afin de fournir des poussées d'énergie rapides qui ajoutent une puissance supplémentaire dans un format aussi compact que possible. [Référence\[25\]](#), [Référence\[49\]](#)
- Les VEH, VEHR, et les VEB de poids similaire ont une autonomie variable, qui est directement liée à la taille du pack, mais leurs packs de batteries acceptent des puissances d'entrée comparables, généralement pendant le freinage régénératif, ce qui entraîne des variations dans leurs exigences en matière de densité de puissance.

4.3. Durée de vie des cellules

Alors que la densité énergétique et la puissance peuvent être évaluées directement après la fabrication d'une cellule, la durée de vie des cellules nécessite des mesures répétées sur une période de plusieurs mois à plusieurs années. Les données complètes et accessibles au public sur la durée de vie des cellules commerciales spécifiques, telles que celles figurant dans le **tableau 1**, sont donc rares. Les données disponibles sur la durée de vie sont présentées ici pour trois mesures importantes : la durée de vie calendaire, la durée de vie en cycles et la durée de vie en cycles de service du véhicule. (Il convient de noter que chacune de ces mesures dépend de nombreux facteurs qui influent sur le taux de dégradation des cellules, notamment la température, la profondeur de décharge et le taux de charge, qui sont contextualisés ci-dessous).

La durée de vie calendaire ou le vieillissement calendaire est indiqué dans la **Figure 20** et résumé dans le **Tableau 3** pour les formats cylindriques, poche et

prismatiques et les compositions cathodiques LFP, NCA, NMC et LCO (oxyde de cobalt lithié) associées à des anodes en graphite. [Référence\[50\]](#)

La durée de vie en cycles est indiquée en cycles complets équivalents (CCE) dans la **Figure 21**, qui provient d'une étude sur les cycles de cellules cylindriques de type 18650, fabriquées par A123 Systems, Panasonic et LG Chem, et avec des cathodes LFP, NCA et NCA.

Les données de cyclage spécifiques à l'application constituent la référence la plus pertinente pour évaluer la durée de vie des cellules. Le cyclage de service à vie du véhicule Volkswagen ID.3 Pro Performance 2020 est présenté dans la **Figure 22**. Ce véhicule utilise une batterie de taille moyenne (58 kWh), qui est composée de 9 modules de batterie, chacun contenant 24 cellules poche de LG Chem d'une capacité de 78 Ah (cellule LG Chem E78 [Note de bas de page](#)). [Référence\[36\]](#)

En comparant ces données, le LFP présente un avantage significatif par rapport au NMC et au NCA en termes de durée de vie cyclique. Compte tenu de la dépendance de la durée de vie cyclique à plusieurs conditions, notamment la température et la profondeur de décharge, la durée de vie cyclique de référence pour le LFP est estimée entre **6 000 et 8 000 cycles** [Note de bas de page](#). Pour les NMC et NCA, dont la capacité diminue plus rapidement dans les mêmes conditions de cycle, la durée de vie peut être estimée entre **500 et 1 000 cycles**.

À long terme, la durée de vie cible des cathodes LFP pourrait atteindre **10 000 cycles**, ce qui les rendrait plus compétitives pour le stockage stationnaire. Pour les cathodes NMC et NCA, qui resteront un bon choix pour les applications de mobilité haut de gamme en raison de leur coût de production plus élevé, une durée de vie cible de **2 000 cycles** est réalisable.

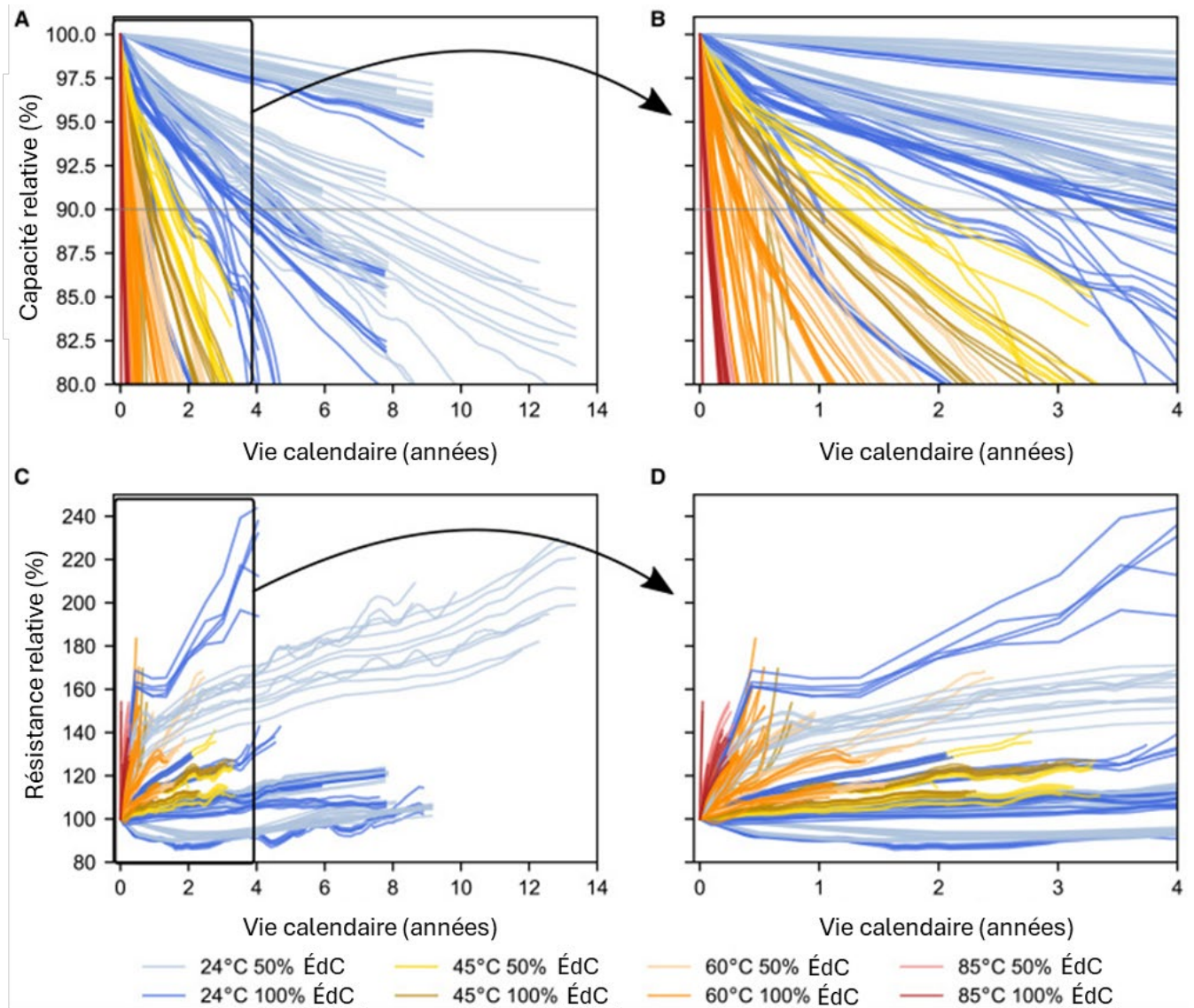


Figure 20 : Ensemble de données sur le vieillissement calendaire montrant la baisse relative de la capacité et l'augmentation de la résistance de 232 cellules lithium-ion commerciales stockées à quatre températures (24 °C, 45 °C, 60 °C et 85 °C) et deux valeurs d'ÉdC (50 % et 100 %). [Référence\[50\]](#)

Figure 20 - version textuelle

Tableau 3 : Figure 21 Résultats du vieillissement calendaire dans différentes conditions de stockage

Condition de stockage	Performances des cellules	Capacité conservée	Augmentation de la résistance*
24 °C à 50 % SOC (conditions les plus douces)	Performances les plus faibles	80 % après 8 ans	70 % après 4 ans
24 °C à 50 % SOC (conditions les plus douces)	Performances maximales	97,5 % après 8 ans	Aucune
45 °C à 100 % SOC (conditions agressives)	Tous	80 % après 2-3 ans	10-20 % après 2 ans
85 °C à 100 % SOC (condition extrême)	Tous	80 % après moins d'un an	40 % après moins d'un an

*Indicateur de baisse de la capacité de puissance

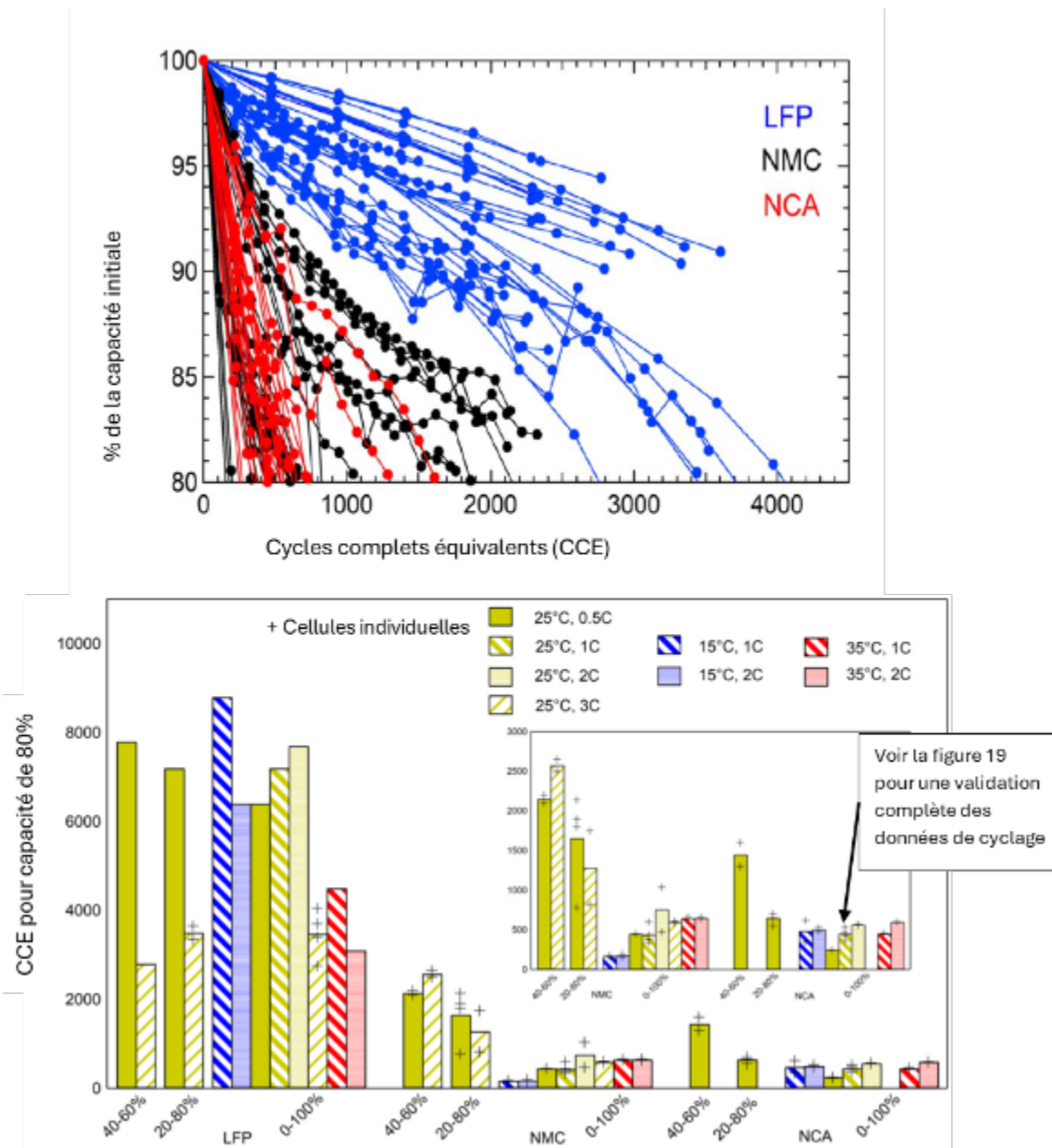


Figure 21 : Rétention de la capacité de décharge et capacité équivalente en cycle complet pour des cellules cylindriques commerciales avec un format 18650 et une chimie cathodique LFP, NMC et NCA, chargées à un taux de 0,5 C et déchargées à des taux et des ÉdC variables. Le cycle complet équivalent (CCE) extrapolé des LFP, NMC et NCA est indiqué dans le graphique supérieur. [Référence52](#)

Figure 21 - version textuelle

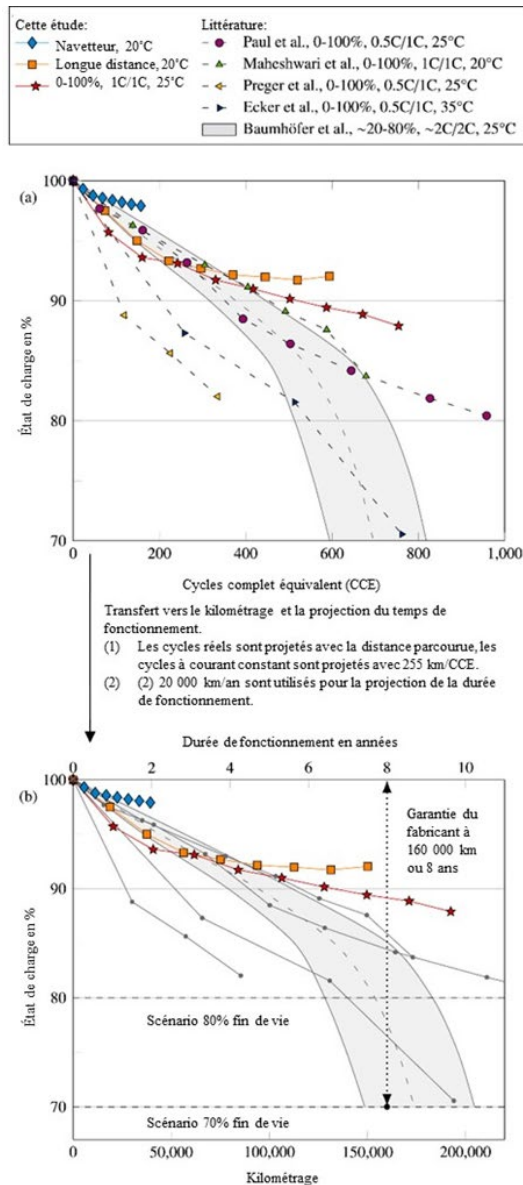


Figure 22 : Rétention de capacité d'une cellule de batterie Volkswagen ID.3 pour différents cycles de service en termes de (a) cycles complets équivalents et (b) conversion en kilométrage et temps de fonctionnement. [Référence\[51\]](#)

Figure 22 - version textuelle

Points à retenir

- Les résultats de l'étude présentés dans la **Figure 21**, où les cellules ont été testées à différents taux de cyclage, températures et plages d'ÉdC [Référence\[52\]](#), démontrent une tendance constante à l'amélioration de la durabilité du cyclage pour le LFP, suivi du NMC et enfin du NCA.
- La **Figure 21** montre également les cycles équivalents complets (CEC) extrapolés de différentes compositions chimiques de cathodes dans les

mêmes conditions de cyclage et montre que le LFP présente un avantage significatif par rapport aux compositions chimiques de cathodes NMC et NCA.

- Étant donné que des données complètes sur le cyclage ne sont disponibles que pour quelques-unes des cellules du **tableau 1**, des études telles que celle présentée dans la **Figure 21** peuvent être utilisées comme référence pour évaluer la durée de vie des cellules commerciales. Pour valider cela, la **Figure 23** présente les données de cyclage dans plusieurs conditions pour l'une des cellules du **tableau 1**, à savoir la cellule cylindrique INR21700-P45B de 4,5 Ah de Molicel, qui est une cellule de chimie NCA. [Référence\[32\]](#), [Référence\[53\]](#) Cette figure montre que plus de 80 % de la capacité d'origine est conservée après 500 cycles à courant constant dans plusieurs conditions de charge et de décharge à température ambiante : charge et décharge à 1C (4,5A), charge à 1C et décharge à 2,2C (10A), et charge à 3C (13,5A) et décharge à 1C. Dans la **Figure 21**, le graphique en encart montre que les cellules NCA avec un ÉdC initial de 100 %, cyclées à température ambiante à 1C, ont tendance à conserver 80 % de leur capacité après 500 cycles complets équivalents. En l'absence de données complètes sur les cycles, des études de tendance peuvent être utilisées pour évaluer la durée de vie des cellules.

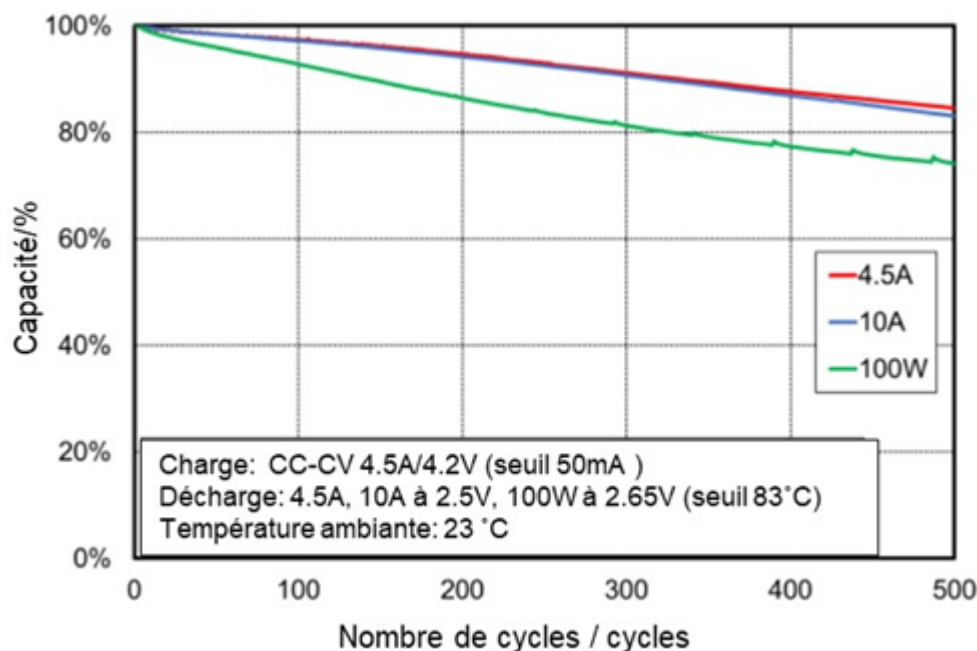


Figure 23 : Données de rétention de capacité pour la cellule cylindrique INR21700-P45B de 4,5 Ah de Molicel. [Référence\[32\]](#), [Référence\[53\]](#)

Figure 23 - version textuelle

- Les cycles d'utilisation des véhicules, tels que les trajets « navetteur » et « longue distance » en Europe illustrés dans la **Figure 22**, sont généralement moins sévères que les cycles à courant constant.
 - La conduite urbaine et interurbaine en Europe, représentée par le cycle « navetteur », maintient un ÉdC compris entre 70 % et 80 % après une ou deux heures de décharge. Cela correspond à des trajets de 28 km rechargés en environ 30 minutes entre les trajets. (Le taux de charge moyen est de 0,2C pour la charge et la décharge, et les taux de charge et de décharge maximaux sont respectivement de 1,7C et 0,2C.) Après 50 000 km parcourus en deux ans (soit un peu moins de 200 cycles complets équivalents), plus de 97,5 % de la capacité d'origine est conservée.
 - La conduite sur autoroute européenne, représentée par le cyclage « longue distance », maintient un ÉdC compris entre 100 % et 20 % après deux ou trois heures de décharge. Cela correspond à des trajets de 375 km rechargés par des charges rapides (environ 30 minutes) et des charges plus lentes (environ 4 heures). (Les taux de décharge et de charge moyens sont respectivement de 0,5 C et 0,3 C, et les taux de décharge et de charge maximaux sont respectivement de 2,4 C et 1,7 C.) Après 150 000 km parcourus en un peu moins de 8 ans (soit environ 600 cycles complets équivalents), plus de 90 % de la capacité d'origine est conservée.
 - Les deux exemples de cycle de service pour les trajets quotidiens et les longs trajets conservent une capacité supérieure à celle obtenue avec un cycle à courant constant entre 0 % et 100 % d'ÉdC à des taux de charge et de décharge de 1C. Ce cycle conserve un peu moins de 90 % de la capacité après 600 cycles complets équivalents.
- Les garanties des équipementiers automobiles, telles que celle indiquée dans la **Figure 22** et exprimée en 160 000 km et 8 ans de conduite, sont généralement basées sur une conservation de 80 % de la capacité pour les cycles d'utilisation des véhicules. Cela est renforcé par le fait que les ensembles de données présentés dans la **Figure 21**, transposés dans la **Figure 22** ne démontreraient pas une capacité suffisante. D'autre part, les données de cyclage pour des cellules à l'échelle du laboratoire, telles que celles présentées dans la **Figure 24** ci-dessous, montrent une capacité restante supérieure à 96 % après 3 000 cycles et plus de 2,3 ans (à une température de 20 °C, dans une plage de 3,0 à 4,2 V, à des taux de charge et

de décharge de C/3 et 1C). En extrapolant ces données pour une batterie idéale sans pertes, une telle cellule pourrait alimenter un véhicule électrique à batterie (BEV) pendant plus d'un million de kilomètres et au moins deux décennies dans un système de stockage d'énergie en réseau ! [Référence\[54\]](#) Bien que les tests en laboratoire puissent simuler des cycles de service, ils sont principalement utilisés pour démontrer la durabilité à des fins réglementaires et ne sont généralement pas utilisés pour déterminer la fin de vie.

Limites de tension 3.0 à 4.2 V

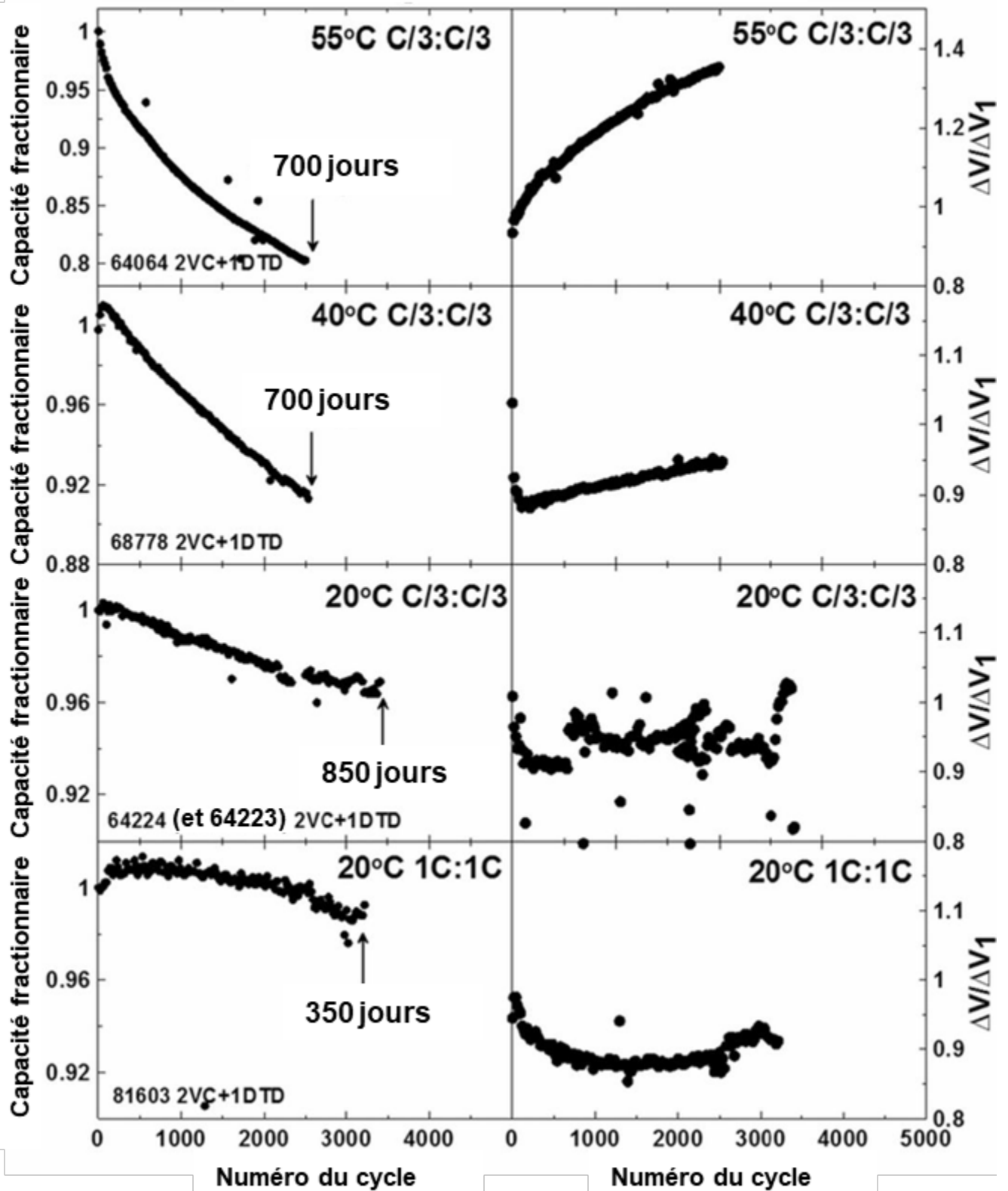


Figure 24 : Capacité fractionnaire et surtension normalisée ΔV (indicative de l'augmentation de la résistance et de la perte de puissance) de cellules lithium-ion de 240 mAh construites avec un matériau cathodique monocristallin de nickel-manganèse-cobalt (NMC532), du graphite artificiel et des électrolytes courants, soumises à des cycles de 3,0 à 4,2 V à des taux C et des températures spécifiés. [Référence\[55\]](#)

Figure 24 - version textuelle

4.4. Sécurité des cellules

Plusieurs organismes de normalisation ont élaboré des normes internationales de sécurité pour les batteries lithium-ion rechargeables. Les normes de sécurité servent de référence, car les batteries doivent satisfaire aux exigences de sécurité qui y sont énoncées pour pouvoir être utilisées. Par exemple, la cellule Molicel INR-21700-P45B présentée dans les sections précédentes est conforme aux normes IEC 62133 et UL 1642. Les principales normes de sécurité sont résumées ci-dessous.

IEC 62133: Cette norme, établie par la Commission électrotechnique internationale, est généralement utilisée pour les batteries lithium-ion destinées à l'électronique grand public, mais aussi de plus en plus pour les cellules destinées aux véhicules électriques. Elle garantit la sécurité chimique, mécanique et thermique des cellules. Les cellules conformes à cette norme doivent passer avec succès des tests comprenant : des tests de court-circuit externe; des tests de cycles de température; des tests de chute libre, de vibration et d'écrasement pour évaluer la sécurité mécanique de la cellule; des tests de surcharge et de décharge forcée; ainsi que des tests d'abus mécanique, afin de garantir l'absence de risque d'incendie ou d'explosion.

ISO 6469-1: Définie par l'Organisation internationale de normalisation, cette norme s'applique aux systèmes de stockage d'énergie rechargeables destinés aux véhicules routiers à propulsion électrique. Les batteries utilisées dans les applications de transport ne doivent pas présenter de fuites, émettre de flammes, se rompre ou exploser. Les batteries sont testées dans diverses conditions, notamment des vibrations et des chocs mécaniques, des changements rapides de température, des simulations de collisions de véhicules, une immersion dans l'eau et une exposition au feu.

UL 2580 et UL 1973: Définies par « UL Standards & Engagement », ces normes couvrent les batteries destinées à être utilisées dans les véhicules électriques (UL 2580) et les systèmes de stockage d'énergie (UL 1973). La norme UL 2580 définit

les exigences d'essai relatives à la résistance des batteries aux facteurs environnementaux (cycles thermiques, brouillard salin, immersion dans l'eau), aux contraintes électriques (surcharge, courts-circuits, charge déséquilibrée), aux contraintes mécaniques (rotation, vibrations, chocs, chutes et écrasement), ainsi qu'à l'exposition au feu et à la défaillance d'une seule cellule dans un système. Les deux normes appliquent également un test à haut potentiel, utilisé pour évaluer l'intégrité de l'isolation électrique entre la batterie et l'enceinte ou le véhicule qui l'entoure. Les exigences de test de la norme UL 1973 comprennent également des tests au niveau du système dans des applications à haute tension.

UL 1642: Plus spécifique que les normes UL 2580 et UL 1973, cette norme s'applique spécifiquement aux cellules de batterie au lithium-ion. Cette norme de performance est définie à l'aide de tests similaires à ceux des autres normes UL, notamment des tests électriques (court-circuit, charge, décharge), mécaniques (écrasement, choc, vibration) et environnementaux (chaleur, cycles thermiques).

GB38031-2025: Définie par le ministère chinois de l'Industrie et des Technologies de l'information, la norme « Exigences de sécurité pour les batteries électriques utilisées dans les véhicules électriques » est une norme de performance qui comprend des tests au niveau des cellules, des packs et des systèmes. Les exigences relatives aux essais au niveau des cellules comprennent des essais de surcharge, de décharge excessive, de court-circuit et d'écrasement, tandis que les exigences relatives aux essais au niveau des packs comprennent notamment des essais de vibration, de choc mécanique, d'immersion, de brouillard salin et de résistance au feu externe. La dernière mise à jour a ajouté une exigence relative à une période de confinement thermique de deux heures afin d'éviter tout risque d'incendie ou d'explosion, un système d'alerte précoce de cinq minutes en cas d'incident thermique, des tests de défaillance en conditions réelles, des tests de résistance à la charge rapide et des facteurs de stress environnementaux. [Référence\[56\]](#)

EUCAR: Le Conseil européen pour la recherche et le développement dans le domaine automobile définit les niveaux de danger EUCAR pour les résultats des tests de sécurité des cellules de batterie sur une échelle de zéro à sept. Les niveaux sont définis dans le **Tableau 4**. Ces niveaux de danger peuvent être utilisés pour fixer des objectifs, définir l'absence d'effet ou la perte de fonctionnalité comme résultat idéal de tous les tests de sécurité.

Tableau 4 : Classification EUCAR des risques liés à la sécurité des cellules de batterie

Niveau de danger	Description	Classification Effet
0	Aucun effet	Aucun effet ni perte de fonctionnalité
1	Protection passive activée	Aucun défaut, fuite, ventilation, incendie, flamme, rupture, explosion ou emballement thermique. Aucun dommage permanent à la cellule.
2	Défaut ou dommage	Aucune fuite, ventilation, incendie, flamme, rupture, explosion ou emballement thermique. La cellule est irrémédiablement endommagée et doit être réparée.
3	Fuite < 50 %	Pas de ventilation, d'incendie, de flamme, de rupture, d'explosion. Fuite d'électrolyte inférieure à 50 %.
4	Ventilation > 50%	Pas d'incendie, de flamme, de rupture ou d'explosion. Plus de 50 % de l'électrolyte perdu.
5	Feu ou flammes	Pas de rupture ni d'explosion.
6	Rupture	Pas d'explosion, mais éjection de parts de la masse active.
7	Explosion	Désintégration de la cellule.

4.5. Coût de la cellule

Contrairement à d'autres références en matière de technologie des batteries, l'analyse comparative des coûts n'est pas effectuée au niveau de chaque cellule, mais plutôt sur l'ensemble des compositions chimiques LFP et NMC. La composition chimique des cellules est un facteur déterminant du coût et de la volatilité des batteries. Les compositions chimiques NMC nécessitent notamment des intrants tels que le sulfate de nickel de qualité batterie, le sulfate de cobalt et l'hydroxyde de lithium, qui ont connu une forte volatilité des prix au cours des dernières années. [Référence\[57\]](#), [Référence\[58\]](#) Les composés LFP sont un peu moins sensibles à cette volatilité, car ils dépendent de matières premières plus abondantes et globalement moins chères, telles que le fer et les précurseurs de phosphate de qualité batterie, même si le carbonate de lithium reste nécessaire. [Référence\[59\]](#) La **Figure 25** présente les indices de référence historiques et prévisionnels en USD pour les cellules Li-ion NMC et LFP. En 2023, le coût de référence pour les NMC était d'environ **162\$/kWh**. Pour les LFP, le coût de référence était d'environ **108\$/kWh**.

Ces coûts devraient encore baisser d'ici 2040, pour atteindre un prix cible d'environ **95\$/kWh** pour le NMC et d'environ **67\$/kWh** pour le LFP. [Note de bas de page](#)

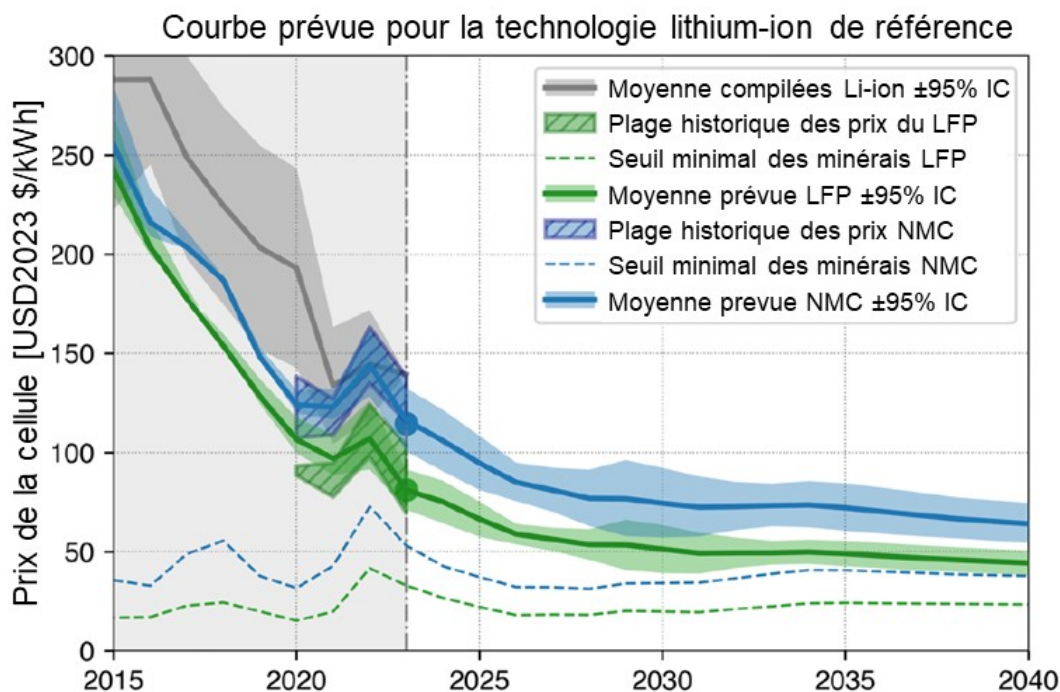


Figure 25 : Plage de prix historiques et futurs (en dollars américains) des batteries NMC et LFP, ainsi que le coût total des matières premières [Référence\[60\]](#)

Figure 25 - version textuelle

Points à retenir

- Malgré une hausse temporaire des prix en 2022, l'indice global a connu une baisse constante au fil du temps. Cela s'explique par le fait que les coûts des matières premières sont restés relativement stables, tandis que les coûts de fabrication (ou, en d'autres termes, l'écart entre le prix plancher des minerais et le coût moyen des cellules) ont diminué au fil du temps.
- Les prix des batteries dépendent fortement du prix des réactifs de qualité batterie, qui comprend le coût de l'extraction et du raffinage à une pureté supérieure à 99 %. Pour illustrer cela, la **Figure 26** montre les sources de toutes les matières premières qui contribuent au coût de certaines compositions chimiques des batteries lithium-ion.

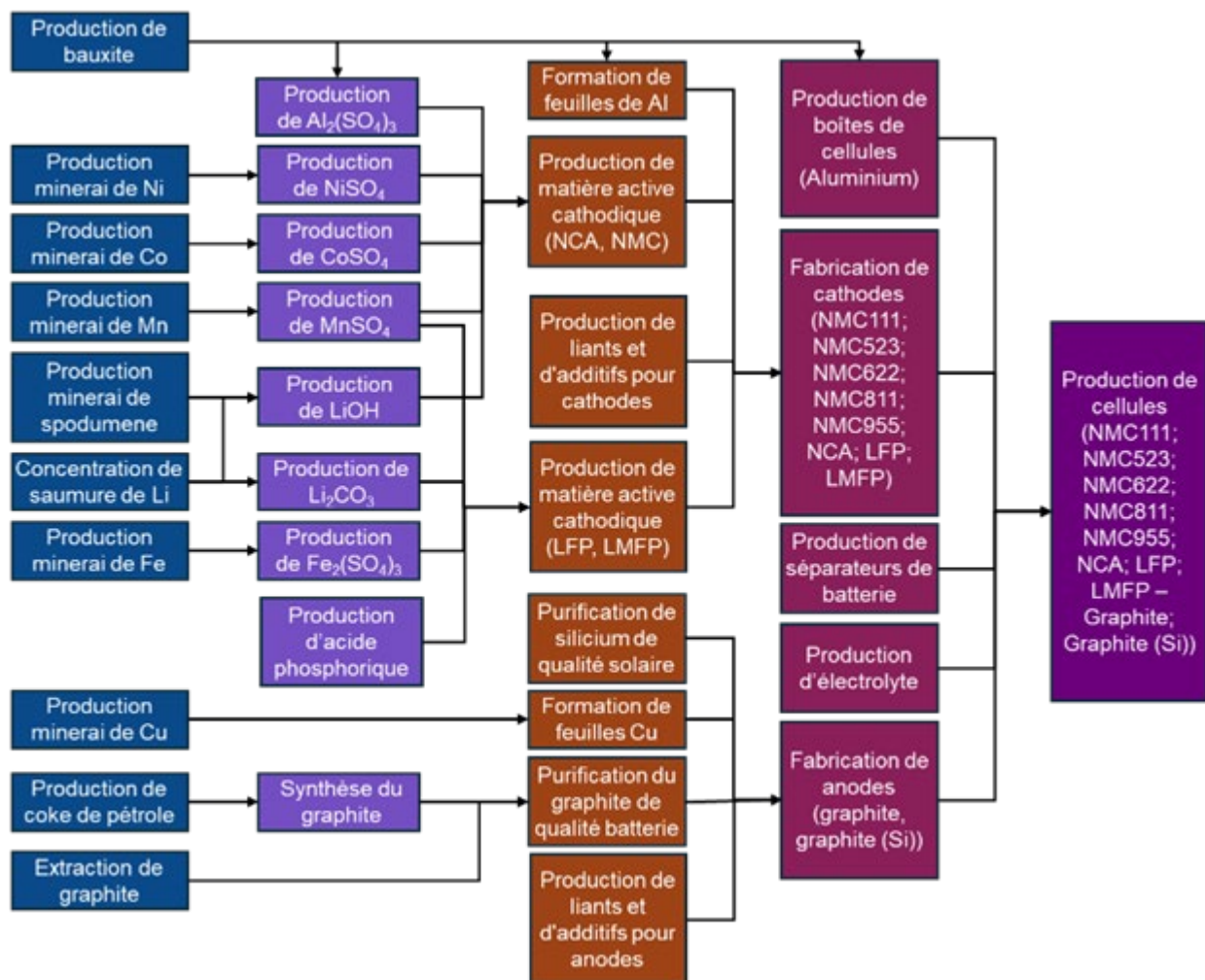


Figure 26 : Flux de toutes les matières premières et étapes de transformation, depuis les matières premières jusqu'à la production de cellules pour certaines compositions chimiques de batteries lithium-ion. Adapté de Xu et al. [Référence\[61\]](#)

Figure 26 - version textuelle

- Depuis 2015, le coût des batteries a baissé de plus de 60 % grâce à un certain nombre de facteurs, [Note de bas de page19](#) notamment la baisse des prix des matériaux, la substitution des matériaux, l'intégration verticale, les économies d'échelle, l'efficacité de la production et la baisse des marges due à la concurrence dans le secteur intermédiaire.
 - Les innovations dans la conception et la fabrication des cellules ont permis de proposer des alternatives moins coûteuses. L'un des principaux facteurs de baisse des coûts a été le passage à des composés chimiques plus abondants, tels que le LFP. Plus récemment, les cellules sodium-ion ont le potentiel à la baisse globale de l'indice des prix, car la production de ces composés chimiques abondants a augmenté à grande échelle.
 - Les innovations dans la configuration des cellules et des packs ont également contribué à la baisse de cet indice de prix au niveau des packs, en particulier pour le LFP. Si l'on compare les cellules LFP et NMC, les cellules NMC ont une densité énergétique plus élevée mais un coût plus important. Les innovations dans la configuration des cellules et des packs ont permis aux composés chimiques LFP d'être compétitifs par rapport aux composés chimiques NMC en termes de densité énergétique au niveau des packs, tout en maintenant un coût inférieur.

4.6. Durabilité des cellules

La durabilité des cellules peut être mesurée en termes d'émissions de GES lors de la fabrication des batteries, exprimées en équivalent CO₂, mais aussi en termes d'autres sous-produits, notamment les déchets d'eau et de sulfate. L'analyse du cycle de vie (ACV) est utilisée pour comptabiliser l'empreinte carbone des émissions « du berceau à la porte » de technologies de batteries spécifiques, sur la base de l'empreinte carbone de tous leurs matériaux d'entrée, du mix électrique régional et de l'impact de tous les processus de fabrication. L'ACV est également utilisée pour mesurer les flux de matériaux et de sous-produits.

La **Figure 27** présente des estimations régionales des émissions de GES issues de la littérature pour les compositions chimiques LFP, NMC111 et NMC811, basées sur la fabrication locale aux États-Unis, dans l'Union européenne et en Chine. [Référence\[62\]](#), [Référence\[63\]](#) Le facteur d'émission supposé du réseau local est également présenté afin de permettre la comparaison avec l'opportunité canadienne (basée sur les émissions canadiennes de 2019 et 2020 [Référence\[64\]](#)).

Les déchets de sulfate, sous forme de sulfate de sodium soluble dans l'eau ou de composés soufrés gazeux, peuvent provenir de la fabrication de cathodes, du traitement de minerais sulfurés ou de la production d'électricité, selon le réseau électrique local. Lors de la production de composés chimiques NMC, la quantité de déchets soufrés (SO_x) peut varier d'environ **771 g/kWh pour le NMC111** à environ **1092 g/kWh pour le NMC811**, en fonction de la teneur en nickel de la cathode, dans un scénario d'analyse du cycle de vie de référence. [Référence\[62\]](#)

La forte consommation d'eau est un autre problème lié à la fabrication des batteries ; l'eau est utilisée comme solvant pendant le traitement, elle s'évapore, est consommée pendant la production d'hydroélectricité et est utilisée dans les réactions. En supposant des conditions d'ACV de référence, la consommation d'eau dans la production de batteries NMC peut varier d'environ **441 L/kWh pour le NMC111** à environ **390 L/kWh pour le NMC811**. [Référence\[62\]](#)

Objectif en matière d'émissions de GES: la production de batteries pourrait réduire considérablement ses émissions de GES. Dans un scénario idéal, l'électricité utilisée pour la production de batteries proviendrait d'un réseau entièrement décarboné et autant de processus que possible alimentés par des combustibles seraient remplacés par l'électricité. De plus, dans ce scénario idéal, l'approvisionnement en matériaux peut être modélisé de manière à provenir d'une part accrue de contenu recyclé. Dans ce scénario idéal, le LFP et le NMC pourraient atteindre des empreintes carbone cibles d'environ **15 à 20 kg CO_2 eq/kWh** et **20 à 30 kg CO_2 eq/kWh** respectivement. Cet objectif ne tient pas compte des avancées significatives en matière d'efficacité de la fabrication des batteries, ni des processus tels que le revêtement à sec ou la production de cathodes sans sulfate, qui pourraient réduire encore davantage cette empreinte. [Référence\[61\]](#) (,) [Référence\[62\]](#)

Objectif en matière de déchets de sulfate: bien que les technologies de pointe utilisées pour la production de cathodes génèrent des déchets de sulfate, d'autres méthodes ne produisant pas de déchets de sulfate ont été mises au point. Si ces technologies sont adoptées, **l'élimination des déchets de sulfate issus de la production de cathodes pourrait devenir un objectif.**

Objectif en matière de consommation d'eau: aucun objectif n'est fixé pour les eaux usées liées à la production d'hydroélectricité, qui ne relève pas du champ d'application de l'innovation dans le domaine des batteries. Cependant, des technologies alternatives de production de cathodes qui éliminent presque totalement le gaspillage d'eau ont été mises au point. Dans le scénario où ces technologies seraient adoptées et améliorées, **l'élimination des déchets d'eau**

issus de la production de cathodes pourrait être considérée comme un objectif.

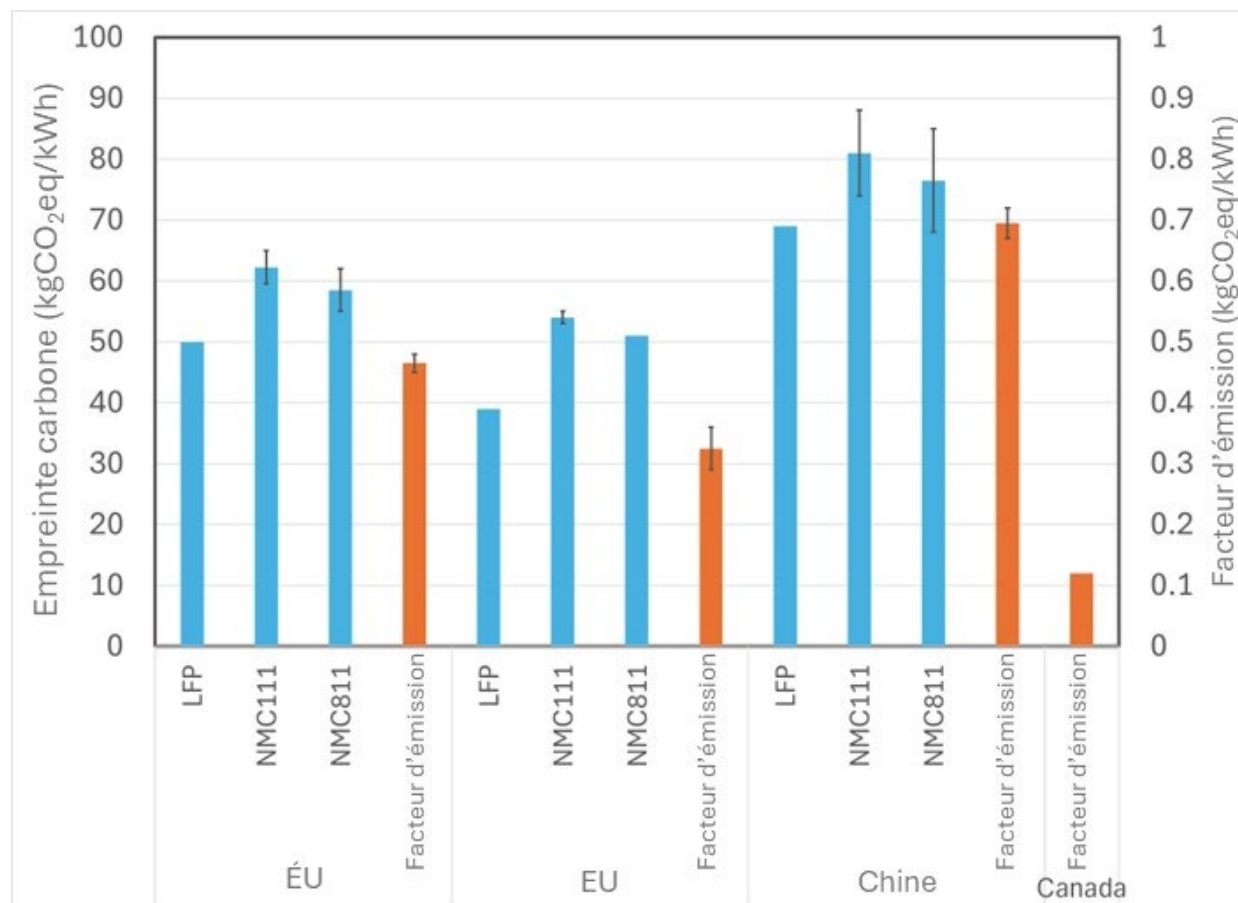


Figure 27 : (axe gauche, barres bleues) Emprise carbone des émissions de GES dérivée de l'ACV des composés chimiques LFP et NMC fabriqués aux États-Unis, dans l'Union européenne et en Chine ; (axe droit, barres orange) Facteurs d'émission liés à la production d'électricité régionale pour les réseaux électriques des États-Unis, de l'Union européenne, de la Chine et du Canada. Remarque : les barres d'erreur indiquent les variations de l'emprise carbone calculée pour ces sources et montrent comment les hypothèses peuvent influencer le calcul final, mais que ces analyses convergent néanmoins dans l'ensemble.

Figure 27 - version textuelle

Points à retenir

- L'emprise carbone est en partie proportionnelle à l'intensité des émissions du réseau local, ce qui signifie que la fabrication de batteries localisée au Canada a le potentiel de produire des batteries avec une

empreinte carbone nettement inférieure à celle de chacune des régions indiquées dans la **Figure 27**.

4.7. Possibilités d'innovation pour atteindre les objectifs

Il existe plusieurs approches innovantes visant à combler l'écart entre les performances actuelles des batteries et les objectifs futurs, tout en renforçant les arguments en faveur de la décarbonisation, de la sécurité et de la compétitivité de la chaîne de valeur canadienne des batteries. L'innovation dans la conception et la production de matériaux, de cellules et de packs pour batteries lithium-ion est une voie importante à suivre, mais il existe également diverses autres compositions chimiques, architectures et variantes des cellules de batterie standard évaluées ci-dessus qui sont également considérées comme prioritaires par l'ASIB. Ces compositions chimiques sont émergentes, en cours de mise à l'échelle ou actuellement à grande échelle et servent souvent des applications de niche qui nécessitent des mesures de performance difficilement réalisables avec des cellules NMC ou LFP.

4.7.1. Batteries lithium-ion

Les progrès progressifs réalisés tout au long de la chaîne de valeur des batteries se sont avérés efficaces pour améliorer constamment les performances tout en réduisant les coûts. Cela continue de stimuler les innovations dans la conception des batteries lithium-ion.

La conception et la synthèse des matériaux pour batteries constituent un segment de la chaîne de valeur des batteries qui offre des possibilités d'innovation. Les innovations dans ce domaine peuvent permettre de produire des composants de cellules en moins d'étapes, moins énergivores et générant moins de déchets, sans sacrifier les performances. Citons par exemple les innovations en matière de contrôle de la morphologie et d'ingénierie de la microstructure des matériaux de batterie, tels que les matériaux cathodiques monocristallins, le contrôle de la taille des particules, les revêtements et les dopants. Ces innovations ont également le potentiel d'améliorer la densité énergétique, la densité de puissance, la durée de vie et la sécurité.

Plus en aval, la conception et la production innovantes de cellules et de packs offrent également un potentiel d'amélioration des performances des batteries.

- Les conceptions de cellules telles que les architectures « sans anode », dans lesquelles l'anode est formée par placage de lithium métallique à partir de la cathode lors du premier cycle de charge, constituent un exemple de voie innovante pour augmenter la densité énergétique et réduire les coûts de fabrication.
- Les architectures de cellules « sans languette » qui permettent un collecteur de courant continu sont un autre exemple susceptible d'augmenter la puissance des cellules, permettant ainsi d'obtenir des cellules cylindriques à haute capacité et à plus forte densité énergétique.
- Des combinaisons innovantes d'anode, de cathode et d'électrolyte peuvent conférer aux cellules une meilleure capacité à basse température ou une durée de vie prolongée. Une longue durée de vie peut ouvrir la voie à de nouvelles applications pour les batteries, telles que la réutilisation prolongée des batteries de véhicules électriques dans des applications de seconde vie, comme le stockage stationnaire, et donc réduire le coût du cycle de vie, les émissions de GES et la charge de recyclage.
- Le revêtement à sec pendant la fabrication des cellules est une méthode innovante qui consiste à presser directement les matériaux de la cathode et de l'anode sur le collecteur de courant, évitant ainsi le processus humide traditionnel, plus énergivore, plus coûteux et pouvant utiliser des solvants toxiques.
- L'innovation visant à réduire le temps de formation des cellules, qui est la dernière étape de la production des cellules et qui implique des cycles de charge et de décharge lents pouvant durer plusieurs jours, est une autre approche pour réduire les coûts et la consommation d'énergie.
- Les innovations dans les configurations « cellule-pack » permettent une organisation plus efficace des cellules au niveau du pack qui, sans améliorer la densité énergétique au niveau de la cellule, peuvent améliorer la densité énergétique du pack, ce qui, en fin de compte, améliore les performances finales de la batterie.
- Les innovations en matière de gestion thermique et de systèmes de gestion des batteries constituent également des moyens d'augmenter la longévité et la sécurité des batteries.

4.7.2. Batteries au lithium avancées - Anodes

La plupart des cathodes NMC et LFP commerciales sont associées à une anode à base de graphite en raison de la combinaison favorable de la stabilité cyclique et de la densité énergétique du graphite. Le graphite a une capacité théorique de 372

mAh/g, ce qui est relativement faible par rapport au silicium ou au lithium métal, qui ont des capacités théoriques de 4200 mAh/g et 3860 mAh/g respectivement. Ces deux matériaux font actuellement l'objet de recherches en vue d'une utilisation dans des anodes avancées. [Référence\[65\]](#) Malgré leurs capacités théoriques plus élevées, leurs capacités pratiques sont beaucoup plus faibles et elles constituent un défi pour les matériaux d'anode de nouvelle génération en raison de leur faible stabilité cyclique.

Dans les batteries à anode en silicium, lorsque les ions lithium migrent de la cathode vers le silicium de l'anode, le matériau se dilate jusqu'à 400 %, pulvérisant l'anode et réduisant le rendement coulombique. Une anode composite graphite/silicium peut augmenter la densité énergétique des batteries dans une certaine mesure (plus de 20 %), mais une charge élevée en silicium n'est pas encore prête à être commercialisée. Grâce à des innovations dans la conception des anodes en silicium, les cellules de batterie utilisant une cathode NMC et des anodes à base de silicium pourraient atteindre une densité de 350 à 400 Wh/kg à moyen terme. [Référence\[66\]](#)

De même, les anodes en lithium métal ont montré un potentiel pour une utilisation dans des cellules à haute densité énergétique, avec un potentiel à long terme de dépasser 500 Wh/kg au niveau de la cellule. Les anodes en lithium métal présentent plusieurs inconvénients : la réactivité chimique du lithium métal entraîne des risques potentiels pour la sécurité ; le dépôt inégal du lithium sur l'anode pendant la charge peut éventuellement entraîner la pénétration de dendrites de lithium à travers le séparateur et créer un court-circuit interne ; la durée de vie est plus courte ; et la demande en lithium, un minéral déjà très demandé, augmente. Pour atténuer la plupart de ces problèmes, un électrolyte solide est utilisé pour bloquer la croissance des dendrites et remplacer l'électrolyte liquide inflammable par un électrolyte solide ininflammable, réduisant ainsi le risque d'incident de sécurité. Les matériaux candidats pour les électrolytes solides sont principalement des oxydes, des sulfures et des polymères. Bien que ces compositions chimiques ne soient pas encore commercialisées, des innovations continues sont nécessaires pour atteindre la viabilité à moyen et long terme. [Référence\[67\]](#)

4.7.3. Batteries au lithium avancées - Cathodes

La cathode NMC représente environ la moitié du coût des cellules de batterie lithium-ion modernes et détermine en grande partie leur densité énergétique, car elle occupe un peu plus d'un tiers de la masse et du volume de la cellule. [Référence\[68\]](#) L'innovation dans les matériaux cathodiques est donc l'une des

principales opportunités pour atteindre les objectifs futurs en matière de performances des batteries.

Le développement de compositions chimiques de cathodes offrant une capacité et/ou une tension plus élevée constitue la voie la plus directe pour augmenter la densité énergétique. Le remplacement des métaux critiques pour les batteries par des métaux plus abondants dans la nature offre la voie la plus directe pour réduire les coûts. L'ingénierie et l'optimisation de la microstructure des matériaux cathodiques sont essentielles pour améliorer leurs performances, et la recherche d'efficacités dans la production et la fabrication est un autre moyen de réduire les coûts.

À moyen terme, la poursuite de la tendance à la substitution du cobalt par le nickel dans les matériaux cathodiques à oxyde en couches tels que le NMC permet à la fois d'augmenter la densité énergétique et de réduire les coûts. Cependant, des innovations continues sont nécessaires pour maintenir la durée de vie et la sécurité en raison d'une dégradation plus rapide et d'une instabilité thermique accrue. [Référence\[69\]](#) L'innovation visant à augmenter la limite supérieure de tension tout en maintenant la stabilité des cellules avec des formulations NMC à teneur moyenne en nickel est une autre piste pour augmenter la densité énergétique tout en maintenant les coûts. [Référence\[42\]](#)

Les ajustements apportés au processus de fabrication du LFP afin d'optimiser la microstructure et d'obtenir une densité de compactage élevée se traduisent par une légère amélioration de la densité énergétique des cellules et une capacité de charge rapide, mais cela entraîne actuellement un surcoût. [Référence\[42\]](#) Le remplacement du fer par du manganèse (également abondant dans la croûte terrestre) pour obtenir du phosphate de lithium fer manganèse (LMFP) permet de conserver la capacité et le faible coût du LFP par rapport au NMC tout en augmentant la tension et donc la densité énergétique, mais cela introduit également une faible capacité de décharge et une durée de vie réduite.

À plus long terme, les cathodes à structure stratifiée riches en lithium et en manganèse (LMR) constituent une évolution du NMC qui remplace le nickel et le cobalt par du lithium et du manganèse, ce qui permet d'obtenir des capacités spécifiques pouvant dépasser 250 mAh/g (contre environ 200 mAh/g pour le NMC avec une teneur en nickel de 80 %) et une densité énergétique au niveau des matériaux proche de 900 Wh/kg. Les cellules équipées de cathodes LMR souffrent actuellement d'une baisse de tension, d'une perte de capacité initiale importante, d'une faible capacité de décharge et d'une durée de vie limitée, ce qui entrave leur commercialisation. [Référence\[70\]](#)

Une autre catégorie de matériaux cathodiques de nouvelle génération, appelés « DRX » (roches salines à excès de lithium et à désordre cationique), est capable d'atteindre une capacité pratique de 300 mAh/g et une densité énergétique au niveau des matériaux de 1 000 Wh/kg. Ces matériaux cathodiques comprennent une variété de compositions, notamment des oxydes et des oxyfluorures avec divers métaux de transition tels que le manganèse, le nickel, le vanadium, le molybdène, le chrome et le fer. [Référence\[71\]](#) À l'instar des cathodes LMR, les cathodes DRX souffrent actuellement d'une mauvaise performance cyclique et d'un faible rendement aller-retour, ce qui entrave également leur commercialisation. Les cathodes au soufre ont une capacité spécifique théorique de 1 675 mAh/g tout en utilisant des matériaux abondants sur Terre et respectueux de l'environnement. Associée à une anode en lithium métal, une batterie Li-S présente une densité énergétique théorique élevée de 2 500 Wh/kg. Il reste toutefois des défis pratiques à relever tant pour l'anode en lithium métal que pour la cathode au soufre : faible utilisation électrochimique du soufre, perte rapide de capacité et faible rendement coulombique. [Référence\[72\]](#)

4.7.4. Batteries à flux

Les batteries à flux redox ont une architecture à cellule ouverte basée sur des réactions réversibles de réduction et d'oxydation des matériaux actifs dans une solution électrolytique. L'électrolyte est stocké dans deux réservoirs (l'anolyte et le catholyte) et passe à travers des piles de demi-cellules séparées par une membrane échangeuse d'ions. L'augmentation du nombre de piles permet d'augmenter la puissance de sortie.

Ces systèmes dissocient la densité énergétique et la densité de puissance, car la taille des réservoirs et des piles peut être contrôlée indépendamment, ce qui est utile pour les applications de stockage stationnaire afin de contrôler la durée du stockage d'énergie. Ces systèmes ont traditionnellement été capables de fonctionner beaucoup plus longtemps que les batteries Li-ion avec une dégradation minimale, mais les innovations dans le domaine des batteries Li-ion rattrapent rapidement leur retard dans ce domaine.

Les batteries redox à flux de vanadium sont actuellement la technologie dominante dans le domaine des batteries redox à flux et sont basées sur les quatre états d'oxydation stables du vanadium. Si la densité énergétique des batteries redox au vanadium est généralement beaucoup plus faible que celle des batteries lithium-ion (seulement 25-30 Wh/kg), ces systèmes bénéficient d'une durée de vie d'environ 15 000 cycles [Référence\[73\]](#), contre un maximum actuel de 5 000

cycles pour une batterie lithium-ion destinée à des applications de stockage stationnaire. Le coût du système est également important. Cependant, en raison de la longue durée de vie, le coût actualisé du stockage (LCOS) est comparable à celui des batteries lithium-ion. Étant donné que l'électrolyte est aqueux, ces systèmes sont intrinsèquement plus sûrs (mais plus toxiques) que ceux à base de lithium-ion. [Référence\[74\]](#)

Les batteries à flux de nouvelle génération visent à améliorer les batteries à flux uniquement au vanadium, en utilisant des composés chimiques moins coûteux et/ou à plus haute densité énergétique, tels que des molécules actives organiques, du fer/chrome, du vanadium/brome, du brome/polysulfure, du zinc/cérium ou du zinc/brome, par exemple, mais ces ajustements se font souvent au détriment d'une plus grande perte de capacité, d'un rendement coulombique plus faible et d'une densité de puissance plus faible. [Référence\[75\]](#), [Référence\[76\]](#)

4.7.5. Batteries sodium-ion

Les batteries sodium-ion sont prometteuses pour atteindre des densités énergétiques équivalentes à celles des cellules LFP, mais sans avoir besoin de lithium, de cuivre ou de graphite comme matières premières minérales. Grâce à certaines optimisations de conception, elles promettent des densités énergétiques volumétriques pratiques et offrent de meilleures performances à des températures plus basses. Les batteries sodium-ion ont atteint le stade de la commercialisation, la première génération de cellules sodium-ion de CATL ayant un coût d'environ 110 \$/kWh en 2021. Le prix des minéraux pour les batteries sodium-ion est inférieur à celui des batteries Li-ion aujourd'hui, ce qui offre un potentiel de réduction du prix des cellules grâce à l'innovation. [Référence\[39\]](#)

Les ions sodium ne s'allient pas avec les collecteurs de courant en aluminium dans des conditions normales, ce qui constitue un avantage par rapport au lithium-ion, car il n'est pas nécessaire d'utiliser des collecteurs de courant en cuivre, plus coûteux. [Référence\[77\]](#) Il est encore nécessaire de perfectionner la chimie des ions sodium afin d'augmenter la densité énergétique actuellement limitée ; cela peut être réalisé en trouvant les combinaisons optimales de matériaux pour la cathode et l'anode. Enfin, le coût de fabrication pourrait encore diminuer par rapport à celui des cellules de première génération une fois la production à grande échelle atteinte. À long terme, les batteries sodium-ion pourraient atteindre des densités énergétiques supérieures à 200 Wh/kg. [Référence\[78\]](#)

4.7.6. Autres batteries à ions métalliques

Outre le lithium et le sodium, qui possèdent chacun un électron de valence transféré lors du processus redox, plusieurs autres métaux sont candidats pour la fabrication de batteries rechargeables à intercalation.

- Le zinc, qui possède deux électrons de valence, est un candidat potentiel en raison de son abondance et de sa compatibilité avec les électrolytes aqueux, ce qui promet un haut degré de sécurité, mais une fenêtre de tension plus faible. Les limites de la densité énergétique de cette chimie signifient qu'elle est plus adaptée aux applications de stockage stationnaire. À long terme, les batteries au zinc pourraient atteindre des densités énergétiques de 120 Wh/kg et 200 Wh/L.
- Le magnésium, un autre cation divalent, présente un potentiel de densité énergétique élevé grâce à son nombre d'électrons transférés par ion deux fois plus élevé que celui du lithium, malgré sa masse atomique plus élevée. Cette configuration de cellule est encore loin de la commercialisation, et la plupart des recherches actuelles se concentrent sur le choix des matériaux appropriés pour les électrodes. À long terme, les batteries à ions magnésium pourraient concurrencer les batteries lithium-ion en termes de densité énergétique, tout en dépendant de sources minérales plus abondantes. [Référence\[78\]](#)

4.7.7. Batteries métal-air

Les batteries rechargeables métal-air utilisent une anode métallique et de l'oxygène comme cathode. Dans une architecture de batterie ouverte, l'air ambiant peut être utilisé, mais une compression et une électrode à diffusion de gaz sont alors nécessaires pour empêcher les réactions secondaires et optimiser le flux d'air. Un électrolyte est également nécessaire. En raison de l'absence de matériau cathodique solide, la densité énergétique de ce type de batterie dépend principalement du choix de l'anode.

Les batteries lithium-air ont un potentiel très élevé en termes de densité énergétique et sont moins coûteuses que les batteries lithium-ion, car elles nécessitent moins de matériaux. Cette technologie en est encore à un stade très précoce de développement en raison de problèmes de stabilité et de sécurité, tels que la croissance de dendrites. Les batteries rechargeables zinc-air et fer-air sont des candidates potentielles pour les systèmes de stockage stationnaires en raison de leur abondance chimique et de leur bonne densité énergétique. La compatibilité avec les électrolytes aqueux promet également une grande sécurité pour ces systèmes. Cependant, des innovations supplémentaires sont nécessaires

pour surmonter les problèmes de durée de vie et de stabilité de ces batteries. [Référence\[78\]](#)

5. Conclusion

Les besoins du Canada en batteries sont motivés par l'électrification des transports et par la nécessité d'assurer la résilience du réseau électrique grâce au stockage stationnaire. Ils devraient atteindre 200 GWh/an d'ici 2035. L'écosystème canadien des batteries est encore naissant et, afin d'atteindre les objectifs de décarbonisation, de sécurité et de compétitivité, il doit remédier à la vulnérabilité des segments intermédiaires de la chaîne de valeur des batteries. Ce segment est largement occupé par des entités plus petites et moins établies que celles des segments en amont et en aval de la chaîne de valeur, bien qu'il bénéficie d'une infrastructure d'innovation en pleine expansion.

Les critères de référence en matière de densité énergétique, de densité de puissance, de durée de vie, de sécurité, de coût et de durabilité constituent des références utiles pour les innovateurs et les décideurs afin de caractériser et de comparer des batteries destinées à différentes applications et différents marchés cibles. Les innovations dans le domaine des batteries permettront d'affiner et d'étendre encore leur capacité à relever les défis spécifiques de la décarbonisation et de l'électrification pour des applications civiles et militaires. Ces applications comprennent le transport de marchandises sur de longues distances, les applications maritimes et aérospatiales, le stockage d'électricité pour les environnements résidentiels, commerciaux, les services publics et les réseaux hors réseau, pour n'en citer que quelques-unes. Une connaissance approfondie des différents indicateurs de performance des batteries est nécessaire pour optimiser ces indicateurs clés et répondre aux exigences finales des applications. Les objectifs, valeurs cibles et les innovations présentés dans ce rapport fournissent un point de référence commun pour les travaux futurs visant à réaliser ces optimisations.

L'innovation doit rester à l'avant-garde de l'écosystème canadien des batteries afin d'atteindre les objectifs futurs en matière de performances et de faire progresser l'état de l'art des cellules de batterie. Cet objectif peut être atteint grâce aux avancées suivantes : des techniques de fabrication permettant de réduire les coûts et l'impact environnemental ; la conception de cellules permettant d'augmenter la densité énergétique ou la densité de puissance ; et des innovations dans la chimie des batteries, qui permettent d'exploiter les propriétés

de matériaux et de composants alternatifs pour obtenir des performances difficiles à atteindre avec les cellules lithium-ion standard.

Appendice A - Explication des termes clés

Anode, cathode et électrolyte

Le cadre « Anatomie d'une batterie » identifie l'anode, la cathode et l'électrolyte comme les composants essentiels qui définissent tout type de batterie. L'énergie électrique est générée par la conversion de l'énergie chimique via des réactions de transfert de charge électronique (c'est-à-dire redox) à l'anode et à la cathode (c'est-à-dire les électrodes). Celles-ci sont séparées par un électrolyte qui assure la conductivité ionique, tandis que les électrons migrent à travers un circuit externe. [Référence\[1\]](#), [NRéférence\[2\]](#), [Référence\[79\]](#)

Architectures à cellules fermées et à cellules ouvertes

Les architectures à cellules fermées [Référence\[80\]](#) comprennent des conceptions de cellules dans lesquelles les composants critiques de la batterie sont hermétiquement scellés, ce qui s'applique aux batteries lithium-ion classiques (voir la **Figure 28 a**) ainsi qu'aux batteries de nouvelle génération telles que les batteries sodium-ion et les batteries à l'état solide. Dans ces exemples, les matériaux de l'anode et de la cathode sont constitués de solides, mais les électrolytes peuvent être liquides ou solides (comme dans le cas de toutes les batteries à l'état solide).

Les architectures à cellules ouvertes [Référence\[81\]](#) comprennent des conceptions de cellules dans lesquelles les composants critiques de la batterie ne sont pas hermétiquement scellés entre eux, ce qui s'applique aux batteries à flux redox (illustrées dans la **Figure 28 b**) et aux batteries métal-air.

Dans une **batterie à flux redox**, l'anode et la cathode sont des espèces électroactives dissoutes dans des solutions (appelées « anolyte » et « catholyte », ou « négolyte » et « posolyte »). Celles-ci sont stockées dans des réservoirs externes et pompées pendant la charge et la décharge à travers une cellule électrochimique contenant une membrane sélective aux ions.

Les batteries redox hybrides comprennent au moins un matériau actif solide contenu dans la cellule. Les batteries métal-air se composent généralement d'une

anode métallique, d'un électrolyte liquide et d'une cathode (oxygène) ouverte sur l'environnement.

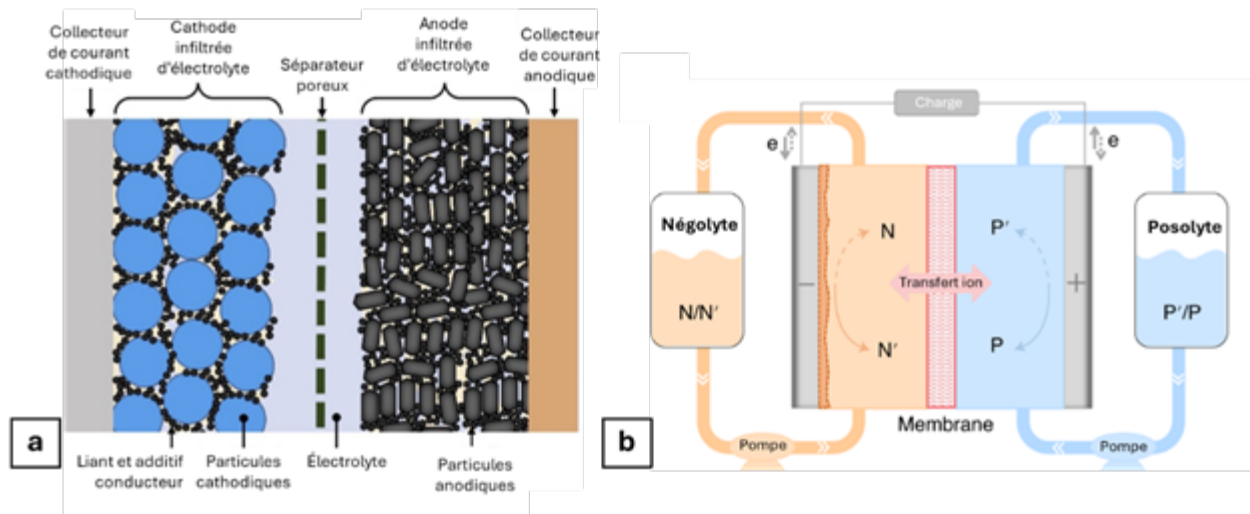


Figure 28 : Représentations schématiques d'architectures représentatives à cellules fermées et ouvertes, illustrées pour (a) une batterie lithium-ion classique (système fermé) et (b) une batterie à flux redox (système ouvert). [Référence\[82\]](#), [Référence\[83\]](#)

Figure 28 - version textuelle

Composants non actifs

Outre l'anode, la cathode et l'électrolyte, il existe divers composants non actifs [Référence\[79\]](#) qui jouent un rôle secondaire mais essentiel dans le fonctionnement de la batterie, dont certains sont mis en évidence dans la **Figure 28** pour les batteries lithium-ion classiques.

Un **séparateur** est une barrière physique entre l'anode et la cathode qui empêche les courts-circuits électriques et joue donc un rôle important dans la sécurité. Il doit être perméable aux ions de l'électrolyte, mais également inerte à l'environnement de la batterie. Les séparateurs poreux composés de matériaux polymères tels que le polyéthylène (PE) et le polypropylène (PP) ou de composites de matériaux polymères et céramiques sont les plus utilisés dans les batteries lithium-ion classiques. [Référence\[84\]](#), [Référence\[85\]](#) Dans une batterie à l'état solide, qui est une technologie de batterie de nouvelle génération, non seulement l'électrolyte liquide est remplacé par un électrolyte solide dans les électrodes, mais le séparateur rempli d'électrolyte l'est également. [Référence\[86\]](#)

Les collecteurs de courant et les languettes sont des composants de liaison qui collectent le courant électrique généré au niveau des électrodes et se connectent

aux circuits externes. Les collecteurs de courant commerciaux pour les batteries lithium-ion sont des feuilles d'aluminium et de cuivre pour les cathodes et les anodes, respectivement. [Référence\[87\]](#) Les languettes sont soudées aux collecteurs de courant et sont constituées de petites bandes métalliques.

Des additifs conducteurs sont ajoutés en petites quantités à l'électrode afin de faciliter les voies de conduction des électrons entre le collecteur de courant et les particules de l'anode et de la cathode. Ces additifs conducteurs électroniques sont généralement à base de carbone.

De petites quantités de **liant**, généralement composé de polymères (tels que le polyfluorure de vinylidène, PVDF, pour la cathode ou le caoutchouc styrène-butadiène/carboxyméthylcellulose, SBR/CMC, pour l'anode), sont responsables du revêtement homogène et de l'adhérence des particules actives de l'anode et de la cathode aux collecteurs de courant métalliques. [Référence\[88\]](#) Le liant maintient également l'intégrité mécanique de l'électrode, qui change de volume à plusieurs reprises au cours du cycle.

Tension de la cellule

La tension d'une cellule de batterie est la différence de potentiel électrique entre l'anode et la cathode et est mesurée en volts (V). En raison du couplage entre le flux d'électrons (à travers le circuit externe) et d'ions (à travers l'électrolyte) qui définit une batterie, la tension de la cellule est directement liée à la différence de potentiel chimique entre l'anode et la cathode et est donc une propriété intrinsèque des matériaux.

Une plage de tension est définie par **les limites de tension** supérieure et inférieure de fonctionnement qui déterminent la plage dans laquelle la cellule peut fonctionner de manière sûre et réversible. Une cellule de batterie fonctionne grâce à la réaction chimique réversible entre les matériaux actifs afin de stocker et de libérer de l'énergie de manière répétée à la demande.

À une tension trop élevée, l'électrolyte se décompose en raison de réactions d'oxydation (c'est-à-dire perte d'électrons) au niveau de la cathode délithiée et de réactions de réduction (c'est-à-dire gain d'électrons) au niveau de l'anode lithiée. [Référence\[89\]](#) À une tension trop faible, le collecteur de courant en cuivre s'oxyde, se dissout et se dépose sur la cathode, provoquant un court-circuit interne. [Référence\[90\]](#) Les limites de tension peuvent être ajustées pour être plus ou moins restrictives en fonction de conditions telles que la température ou le vieillissement de la batterie.

Lorsqu'une batterie fonctionne dans une plage de tension définie par les limites supérieure et inférieure, il est souvent pratique de spécifier une tension à une valeur unique ou **une tension nominale**, qui est une valeur moyenne dans la plage de tension.

Capacité (Q)

La capacité (Q) d'une cellule de batterie désigne la quantité de charge (c'est-à-dire le nombre d'électrons) qui peut être stockée dans les limites de tension de la cellule, qui est directement liée à la quantité de matériau actif de l'anode et de la cathode dans le système. La capacité est le plus souvent mesurée en ampères-heures (Ah), où 1 A est défini comme un flux de courant électrique de 1 coulomb par seconde (1 C/s), et un coulomb est l'unité fondamentale de charge électrique.

Tension (V) et capacité (Ah) d'un pack

Les packs de batteries sont composés de plusieurs cellules de batterie reliées entre elles en série et/ou en parallèle. [Référence\[91\]](#) Lorsque deux cellules identiques sont connectées en série (c'est-à-dire bout à bout dans un circuit électrique), la tension du système est la somme des tensions des cellules individuelles, tandis que la capacité du système reste constante, égale à la capacité de l'une des deux cellules qui le composent. Lorsque deux cellules identiques sont connectées en parallèle (c'est-à-dire avec des chemins électriques ramifiés qui divisent le courant), la tension du système reste constante, égale à la tension de l'une des cellules constitutives, tandis que la capacité du système est la somme des capacités des cellules individuelles. Dans les packs plus grands, les cellules sont généralement regroupées en parallèle, puis câblées en série, ce qu'on appelle une chaîne en série de configurations parallèles.

Courant (I)

Le courant (I) est défini comme le flux de charge électrique (c'est-à-dire le flux d'électrons) et mesuré en ampères (A). Un ampère est défini comme un flux de courant électrique de 1 coulomb par seconde (1 C/s), le coulomb étant l'unité fondamentale de charge électrique. Dans une batterie, pendant la décharge, le courant est généré par le flux d'électrons qui circulent de l'anode, où l'espèce active est oxydée, vers la cathode, où l'espèce active est réduite, en passant par un circuit externe.

Taux de charge (h^{-1})

Le taux de charge « C-Rate » est un indicateur normalisé du taux de charge ou de décharge d'une batterie. Il est obtenu en divisant le courant par la capacité et est mesuré en h^{-1} . L'inverse du C-Rate correspond donc à la durée de charge ou de décharge. Par exemple, une charge à un taux de 1C correspond à une charge complète de 0 à 100 % en une heure, une charge à 2C correspond à une charge complète en trente minutes et une charge à C/2 correspond à une charge complète en deux heures.

Pour les batteries à architecture à cellules fermées, le C-Rate maximal est une quantité fixe et une propriété de la conception de la cellule, mais pour les batteries à architecture à cellules ouvertes, le C-Rate peut être variable. Par exemple, pour une batterie à flux redox, la capacité peut être augmentée avec de plus grandes quantités d'anolyte et de catholyte contenues dans des réservoirs plus grands, indépendamment de la cellule électrochimique qui contrôle la capacité de débit.

État de charge (ÉdC) et profondeur de décharge (PdD)

L'état de charge (ÉdC) est une mesure de la capacité restante disponible dans une cellule et est exprimé en pourcentage, où 0 % correspond à la limite inférieure de tension et 100 % correspond à la limite supérieure de tension. La profondeur de décharge (PdP) est une mesure inverse, où 0 % correspond à la limite supérieure de tension et 100 % correspond à la limite inférieure de tension.

Efficacité coulombique

L'efficacité coulombique est le rapport entre la capacité de décharge et la capacité de charge au cours d'un même cycle, exprimé en pourcentage. Une efficacité coulombique de 100 % signifie que toute la charge introduite dans une batterie peut être extraite lors du cycle de décharge suivant. L'efficacité coulombique est largement considérée comme un indicateur quantifiable de la réversibilité d'une batterie, et l'efficacité coulombique d'une cellule lithium-ion est normalement supérieure à 99 % dans des conditions de fonctionnement normales.

Efficacité aller-retour

L'efficacité aller-retour est le rapport entre l'énergie totale produite (à la décharge) et l'énergie totale absorbée (à la charge) par le système. La tension de charge étant supérieure à la tension de décharge, l'efficacité aller-retour est généralement inférieure à l'efficacité coulombique. Pour une batterie lithium-ion

classique fonctionnant dans des conditions normales, l'efficacité aller-retour peut varier entre 85 % et 95 %. [Référence\[92\]](#)

Formats de cellules de batterie

Demi-cellules et cellules complètes

Dans le domaine de la RetD, les conceptions de cellules de batterie sont souvent axées sur la caractérisation plutôt que sur l'optimisation des performances. Une configuration courante est la « demi-cellule », qui sert à surveiller le potentiel d'une électrode indépendamment de l'autre électrode et ainsi, dans la mesure du possible, à évaluer les matériaux individuels des électrodes de la batterie. [Référence\[93\]](#) Dans une batterie lithium-ion, l'électrode d'intérêt est le plus souvent associée à une électrode en lithium métal (servant de référence et de contre-électrode) avec une plus grande réserve de capacité. L'utilisation d'un excès de matériau de contre-électrode à potentiel constant comme le lithium métal permet de minimiser son influence sur les mesures de tension de la cellule. Les batteries destinées à des applications pratiques sont construites selon des configurations « pleine cellule », dans lesquelles les capacités des matériaux de l'anode et de la cathode sont étroitement adaptées ou équilibrées. Le rapport de capacité entre l'anode et la cathode, ou « rapport N/P », est maintenu proche de la valeur 1. Les mesures de tension de la cellule dans les configurations pleine cellule reflètent la combinaison des comportements des deux électrodes.

Cellules rondes, cylindriques, prismatiques et à poche

Les cellules de batterie sont disponibles dans une grande variété de formes et de tailles en fonction de l'utilisation et de l'application prévues. Pour les batteries lithium-ion commerciales, qui sont des architectures à cellules fermées, les quatre formats de cellules les plus courants (pièce, poche, cylindrique et prismatique) sont illustrés dans la **Figure 29**. [Référence\[94\]](#), [Référence\[43\]](#)

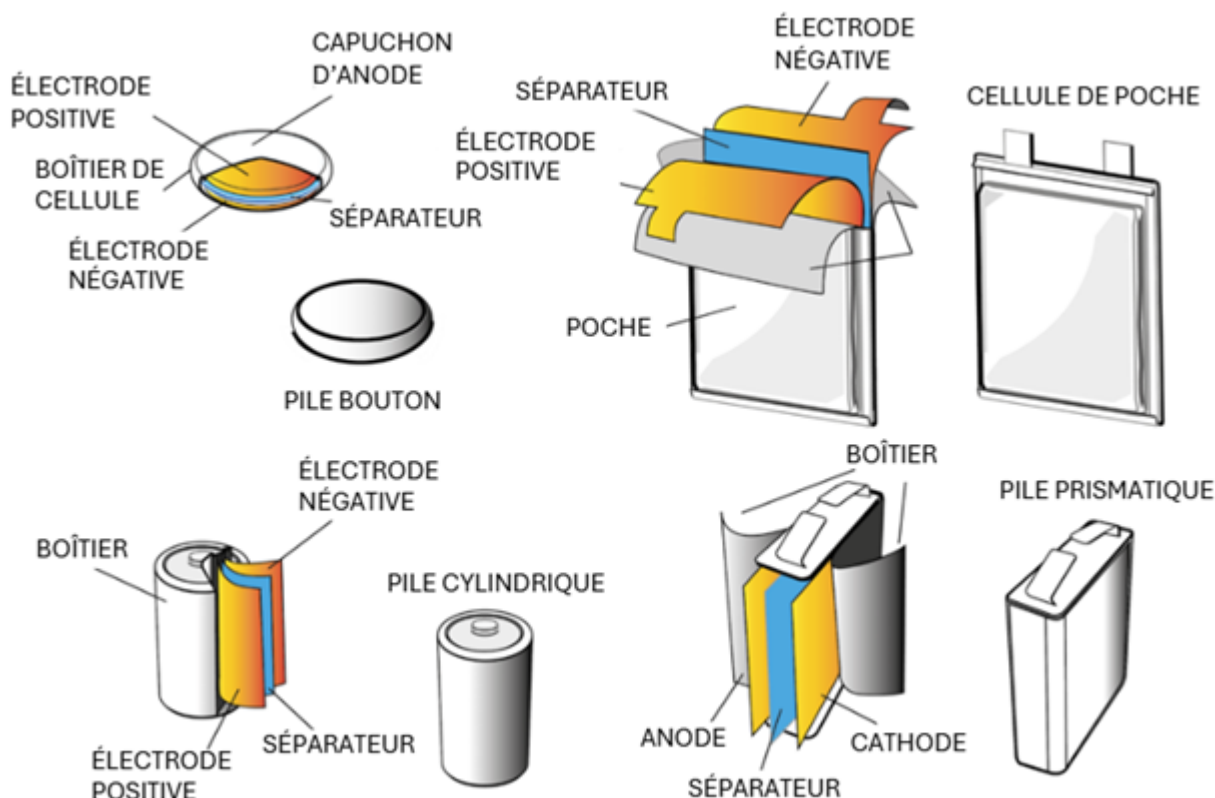


Figure 29 : Types de cellules typiques pour les batteries lithium-ion commerciales. [Référence\[95\]](#)

Figure 29 - version textuelle

Les piles boutons ont une faible capacité et sont principalement utilisées dans le domaine de la recherche et du développement, où elles sont le plus souvent fabriquées à la main, ou dans de petits appareils électroniques portables. Les piles boutons lithium-ion utilisées dans la recherche et le développement, dotées d'électrodes unilatérales, ont une capacité inférieure à 10 mAh, [Référence\[96\]](#) tandis que les piles lithium-ion rechargeables CR2032 commercialisées pour les appareils électroniques portables ont une capacité inférieure à 100 mAh. [Référence\[97\]](#)

Les cellules de poche sont des piles rectangulaires, flexibles, plates et légères dont le contenu est enfermé dans un film composite aluminium-polymère scellé, similaire aux matériaux utilisés dans l'industrie de l'emballage alimentaire (comme les croustilles). Bien que le matériau de la feuille souple soit léger et relativement peu coûteux, il présente une stabilité mécanique inférieure à celle d'autres formats dotés d'un boîtier rigide. Les cellules de poche peuvent être fabriquées avec des capacités aussi faibles que 25 mAh (pour une cellule de poche de R&D à couche unique de 5 x 7 cm²), [Référence\[96\]](#) et, dans leur limite supérieure, elles peuvent aujourd'hui dépasser des capacités de 100 Ah. [Référence\[98\]](#)

Les piles cylindriques ont des dimensions plus standardisées, telles que 18650 (18 mm de diamètre et 65 mm de longueur, capacité de 1 à 4 Ah), 21700 (21 mm de diamètre et 70 mm de longueur, capacité de 2,5 à 5,5 Ah) et, plus récemment, 4680 (47 mm de diamètre et 80 mm de longueur, capacité supérieure à 20 Ah), et le contenu des piles est enfermé dans un boîtier métallique rigide.

Les piles prismatiques sont des piles de forme rectangulaire dont le contenu est enfermé dans un boîtier métallique rigide. Les piles prismatiques peuvent être construites avec des capacités inférieures à 1 Ah et, dans leur limite supérieure, elles peuvent aujourd'hui dépasser des capacités de 1000 Ah. [Référence\[99\]](#), [Référence\[100\]](#)

Appendice B - Description des mesures de performance des batteries

Densité énergétique

L'énergie qui peut être stockée dans une cellule (mesurée en wattheures, Wh) est obtenue en multipliant la tension nominale de la cellule (mesurée en V) par sa capacité (mesurée en Ah). La densité énergétique est alors définie comme la quantité totale d'énergie stockée par masse ou par volume et est exprimée en Wh/kg pour la densité gravimétrique et en Wh/L pour la densité volumétrique, bien que d'autres unités puissent être utilisées en fonction de l'application.

Cette mesure peut être définie à différentes échelles, notamment au niveau du matériau actif (c'est-à-dire l'anode et la cathode), de la cellule, du module et du pack, avec une règle générale de diminution de la densité énergétique à mesure que l'on descend dans ces niveaux. Cela s'explique par le fait que les composants non actifs, tels que le séparateur, les collecteurs de courant, le boîtier et le système de gestion thermique, contribuent à la masse et au volume du système sans augmenter l'énergie stockée. Les densités énergétiques des matériaux actifs définissent donc la densité énergétique théorique, mais c'est la densité énergétique au niveau du pack qui est utilisée pour sélectionner l'adéquation des applications.

Pour illustrer cela, les densités énergétiques gravimétriques et volumétriques de deux compositions chimiques différentes de cathodes et d'anodes lithium-ion sont présentées ci-dessous dans la **Figure 30**. La densité énergétique est indiquée au niveau théorique et pratique des matériaux, au niveau de la cellule et au niveau du

pack. [Référence\[101\]](#) Cela montre que si la densité énergétique théorique du NCA est élevée, une fois combiné avec une anode sélectionnée et intégré dans une cellule et un pack, le NCA offre une densité énergétique similaire à celle d'une batterie LFP, dont la densité énergétique théorique est environ la moitié de celle du NCA. Un exemple plus complet pour la cathode LFP et l'anode graphite est présenté en détail dans l'**Appendice C - Exemple de calcul de la densité énergétique des cellules**.

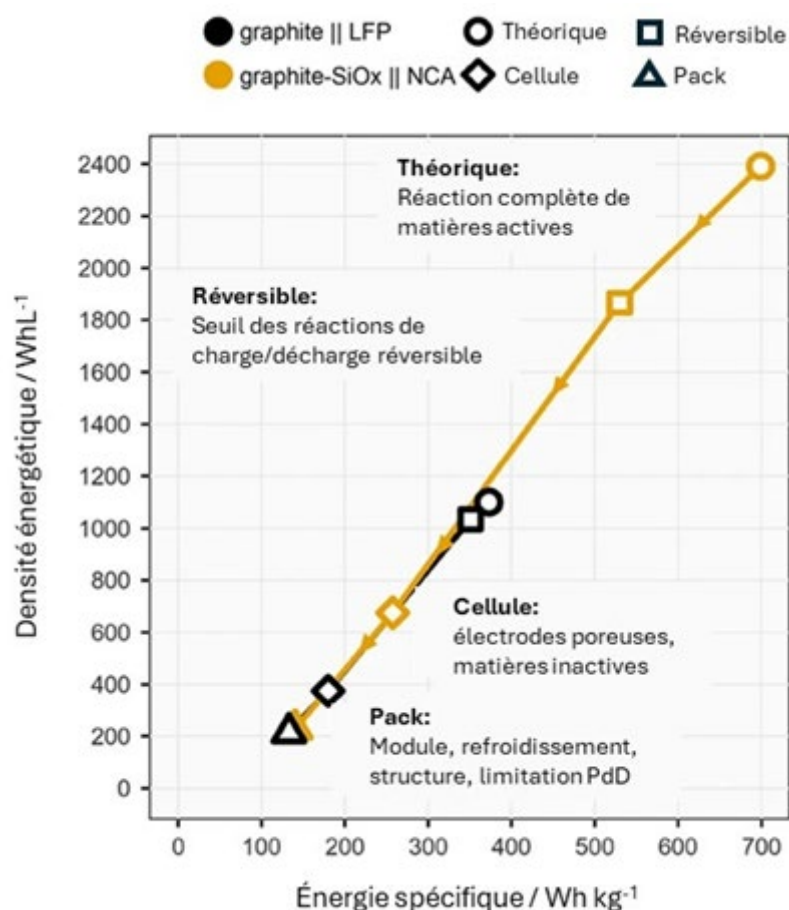


Figure 30 : Densités énergétiques gravimétriques et volumétriques pour les cathodes et anodes LFP/graphite et NCA/graphite-SiO_x au niveau théorique et pratique des matériaux, au niveau des cellules et au niveau des packs. [Référence\[101\]](#)

Figure 30 - version textuelle

Densité de puissance

La densité de puissance est une mesure de la capacité d'une batterie, décrivant le flux d'énergie qui peut être entré ou sorti pendant la charge et la décharge,

respectivement, normalisé par la masse (exprimée en W/kg) ou le volume (exprimé en W/L).

La puissance (mesurée en watts, W) est définie comme le produit du courant (I) et de la tension (V), et elle reflète à la fois les mécanismes indépendants du temps et dépendants du temps qui se produisent lors du fonctionnement d'une batterie (c'est-à-dire respectivement la thermodynamique et la cinétique). Pour une batterie lithium-ion, la cinétique en jeu comprend la diffusion du lithium dans les matériaux actifs, la conduction des électrons dans les électrodes, le transport de masse du lithium dans l'électrolyte, les transitions de phase et les réactions de transfert de charge, pour n'en citer que quelques-uns. À titre de comparaison, la densité énergétique est une propriété indépendante du temps d'une batterie.

Les exigences en matière de puissance des batteries sont spécifiées dans des conditions précises, notamment, mais sans s'y limiter, l'amplitude (ou taux de charge), la direction (charge ou décharge), la température, la durée (puissance continue ou pulsée) et l'état de charge (ÉdC).

À des taux de charge et de décharge plus élevés, les batteries subissent de plus en plus de processus dissipatifs qui contribuent à la génération de chaleur et à des phénomènes pouvant entraîner une dégradation, plutôt que la conversion réversible souhaitée de l'énergie chimique en énergie électrique. Une charge et une décharge à des taux plus élevés entraînent un dépassement précoce des limites de tension supérieure et inférieure, ce qui limite la capacité accessible et réduit le rendement aller-retour, illustrant ainsi un compromis inhérent entre l'énergie et la puissance.

Dans une batterie à architecture fermée, la capacité de débit peut être améliorée en augmentant la quantité de composants inactifs par rapport aux matériaux actifs, par exemple en utilisant des revêtements d'électrodes plus fins, des collecteurs de courant plus épais, des additifs plus conducteurs ou plus d'électrolyte. Cependant, cela se fait au détriment de la densité énergétique des cellules, comme l'illustre la **Figure 31**. Cette figure montre que pour une composition chimique de batterie donnée, la conception des cellules et l'ingénierie des électrodes (NMC 111 vs NMC 622) peuvent modifier le rapport puissance/énergie (P/E) des cellules sur une plage importante. [Référence\[102\]](#)

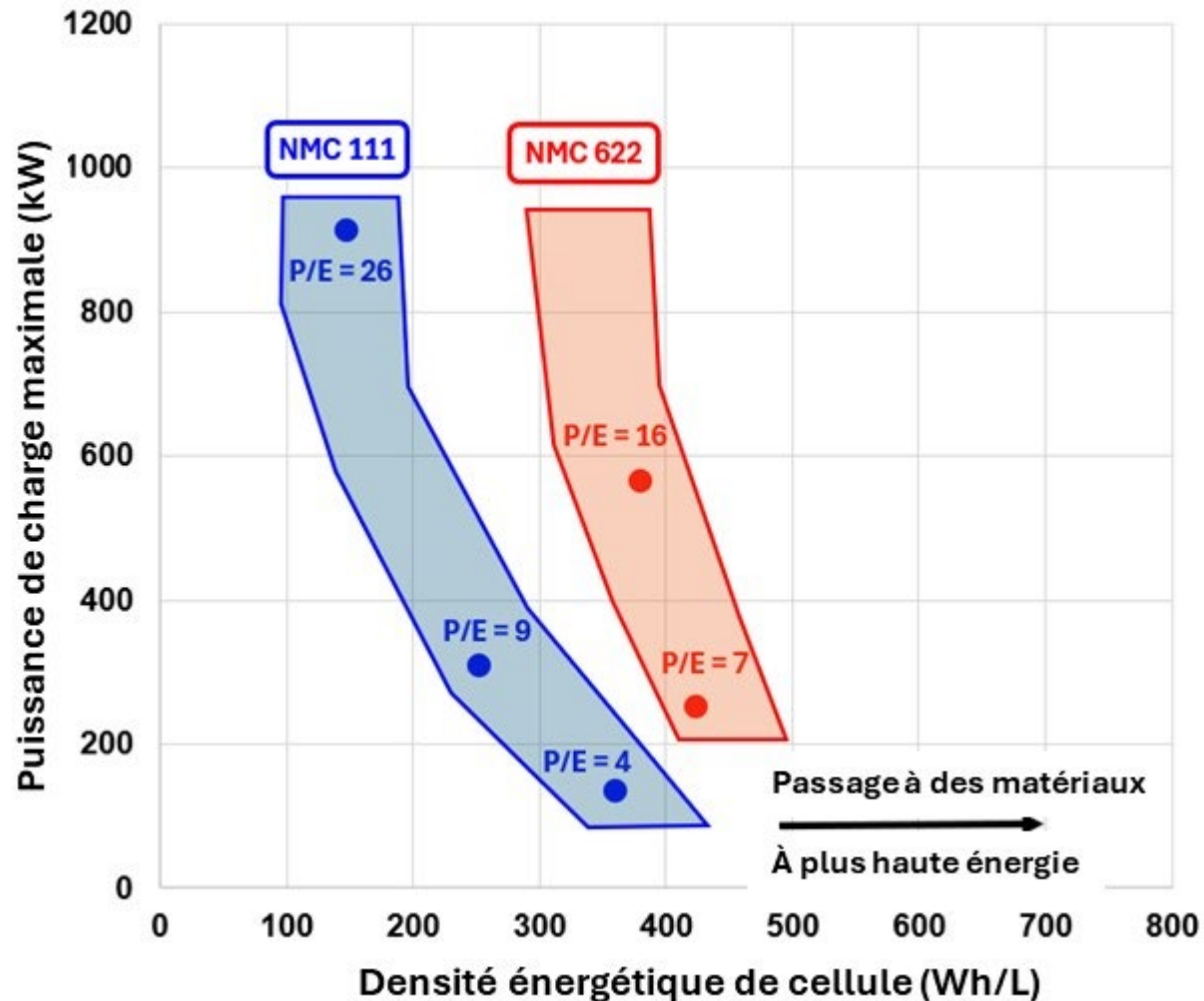


Figure 31 : Puissance de charge maximale estimée de la batterie en fonction de la densité énergétique des cellules pour des groupes de matériaux actifs cathodiques sélectionnés associés à des anodes en graphite pour une batterie hypothétique de 100 kWh. Adapté de Masias et al. [Référence\[102\]](#)

Figure 31 - version textuelle

Dans une batterie lithium-ion, une charge à des taux élevés comporte également le risque de favoriser le placage indésirable de lithium métal plutôt que son incorporation dans l'anode graphitée. La charge des batteries lithium-ion à basse température aggrave le placage de lithium métal (car les températures plus basses correspondent à une cinétique plus lente de tous les processus et donc à une capacité de puissance plus faible). En général, il est plus difficile de maintenir une puissance élevée pendant de longues durées que pendant des impulsions courtes, une puissance de charge élevée à un Édc élevé qu'à un Édc faible, et une puissance de décharge élevée à une profondeur de décharge (PdD) élevée qu'à une PdD faible.

Durée de vie

L'un des principaux avantages des batteries est leur capacité à se charger et se décharger pendant de nombreux cycles et pendant de longues périodes avec une dégradation limitée des performances. Bien qu'il existe des batteries primaires sans capacité de charge qui sont utilisées dans des applications à usage unique, leur rôle dans la transition énergétique est limité et n'est pas pris en compte dans l'analyse présentée dans ce rapport.

Dans un scénario idéal, une batterie fonctionnant dans des conditions où la réaction électrochimique réversible visée se produit à l'exclusion de toutes les réactions indésirables et de tous les processus irréversibles peut durer indéfiniment. Dans la pratique, à mesure que le nombre de cycles de charge et de décharge augmente et que le temps passe, les performances et la durée de vie d'une batterie se détériorent progressivement en raison des lois de la thermodynamique. Pour les batteries lithium-ion, qui peuvent atteindre des rendements coulombiens très élevés (99,99 %), l'accumulation de 2 000 cycles ne réduit la capacité que d'un peu moins de 20 % (soit $0,9999^{2000} = 0,82$).

Différentes conceptions de cellules et compositions chimiques de batteries subiront différents mécanismes de dégradation qui limitent leur capacité énergétique et leur puissance (exprimée sous forme d'état de santé, ou ÉdS). Les principaux processus de vieillissement qui se produisent dans les batteries lithium-ion comprennent, sans s'y limiter, les suivants : perte de contact entre les collecteurs de courant et les électrodes due à la corrosion et à la fissuration ; désorganisation de la microstructure de la cathode ; microfissuration et dégradation du matériau actif ; dissolution des métaux de transition ; formation et précipitation de dendrites ; et formation et croissance d'un film superficiel. [Référence\[103\]](#)

Différents mécanismes de dégradation des batteries sont déclenchés dans des conditions de fonctionnement variées, non seulement pendant les cycles, mais également lorsqu'aucun courant ne traverse la cellule, ce que l'on appelle le vieillissement calendaire. Le vieillissement calendaire est accéléré à des températures plus élevées, ce qui augmente la vitesse de toutes les réactions thermiques, et à des ÉdC plus élevés, qui représentent des conditions plus réactives dans la cellule. Lorsque les batteries sont stockées à l'état chargé pendant une période prolongée, des réactions chimiques parasites entraînent également une autodécharge qui réduit la capacité de charge (exprimée en pourcentage perdu par mois), dont une partie peut généralement être récupérée lors de la charge suivante.

La dégradation des batteries au cours des cycles dépend également de conditions spécifiques, telles que la température, la fenêtre ÉdC , le taux de décharge et le cycle de service spécifique. En laboratoire, les batteries sont le plus souvent soumises à des cycles dans des conditions de courant et de température constants sur toute la plage ÉdC (c'est-à-dire de 0 à 100 % ÉdC avec des limites de tension spécifiées). Pour les batteries lithium-ion, un choix judicieux des matériaux de l'anode, de la cathode et de l'électrolyte, ainsi que des conditions de cyclage, peut permettre plusieurs milliers de cycles avant d'atteindre la fin de vie, souvent considérée comme correspondant à 80 % de la capacité d'origine.

Les cycles de service des batteries présentent des oscillations de courant, des impulsions et des temps de repos, ainsi que des profils plus difficiles à normaliser pour les essais en laboratoire. Par conséquent, le nombre de cycles est généralement spécifié en tant que quantité de capacité cumulée (mesurée en Ah), d'énergie cumulée (mesurée en Wh) ou de cycles équivalents complets (la capacité cumulée normalisée par la capacité de la cellule). Pour les conditions de cyclage dynamiques, seule une description statistique des conditions de fonctionnement peut être utilisée, telle que des histogrammes basés sur le temps et les valeurs moyennes, minimales et maximales.

Ces distinctions sont importantes car les cycles à courant constant et les cycles spécifiques à une application peuvent avoir des effets différents sur le vieillissement des batteries. Dans les batteries lithium-ion, par exemple, une étude comparant 37 profils de décharge dynamique différents avec des courants de décharge moyens allant de $C/16$ à $C/2$ sur 92 cellules commerciales en oxyde de silicium-graphite/nickel-cobalt-aluminium (NCA) a révélé que la durée de vie des batteries augmentait jusqu'à 38 % par rapport à un cycle à courant constant avec le même C-Rate moyen et la même plage de tension. [Référence\[104\]](#)

Les périodes de garantie des batteries sont déterminées par les taux de défaillance plutôt que par les conditions réelles de fin de vie. Par exemple, si une garantie de 8 ans correspond à 1 % des cellules atteignant prématurément leur fin de vie et que la durée de vie des batteries est normalement distribuée avec un écart type de 3 ans, la durée de vie moyenne des batteries est de 15 ans.

Sécurité

La sécurité est essentielle dans toutes les applications des batteries. Cela est particulièrement vrai lorsqu'elles sont chargées, car elles contiennent des concentrations élevées d'oxydants (cathode) et de combustible (anode dégradée réagissant avec l'électrolyte), le plus souvent à proximité immédiate et dans un

environnement hermétique. [Référence105](#) Pour souligner ce point, cette disposition rapprochée des oxydants et du combustible n'est pas sans rappeler celle des explosifs et des fusées.

Le fonctionnement normal d'une batterie implique la conversion sûre et contrôlée d'énergie chimique en énergie électrique au cours de nombreux cycles. Des défauts microscopiques et des menaces en service peuvent entraîner une libération soudaine, irréversible et incontrôlée d'énergie ou un emballement thermique. Afin de démontrer leur performance en matière de sécurité, les batteries sont soumises à de multiples tests mécaniques, électriques et thermiques abusifs afin de simuler les mécanismes de défauts microscopiques et les effets macroscopiques des défauts d'emballement thermique et des conditions abusives.

Mécaniques :	Écrasement, pénétration, rupture, flexion
Électriques :	Court-circuit externe, court-circuit interne, décharge excessive, surcharge
Thermiques :	Exposition à une source de chaleur externe, sources d'inflammation externes, test de choc thermique, gestion thermique inappropriée

Pour les batteries lithium-ion individuelles, les défaillances sur le terrain dues à des défauts de fabrication provoquant des courts-circuits internes peuvent avoir une probabilité très faible (par exemple, le taux de défaillance catastrophique des cellules 18650 est estimé à 1 sur 1 à 4 millions de cellules), mais étant donné que des centaines, voire plusieurs milliers de cellules peuvent être déployées dans une application cible donnée, cela entraîne une augmentation importante du risque d'incident de sécurité. [Référence106](#)

Aucun indicateur ou paramètre unique ne permet de déterminer la sécurité d'une batterie et plusieurs modes de défaillance différents peuvent entraîner un incident de sécurité. Plusieurs approches sont mises en œuvre conjointement à tous les niveaux de la chaîne de production des batteries (matériaux, cellules, packs et système) et à toutes les étapes du cycle de vie d'une batterie afin de réduire la probabilité d'un incident de sécurité et d'en atténuer la gravité s'il venait à se produire. [Référence93](#) En conséquence, plusieurs organisations et pays ont élaboré des normes de sécurité et des protocoles d'essai qui sont essentiels pour garantir la sécurité des applications utilisant des batteries.

Coût

Le coût d'une batterie est principalement influencé par le coût des éléments suivants :

- les matières premières : précurseurs pour la cathode et l'anode, l'électrolyte, les collecteurs de courant, les séparateurs, le boîtier, etc. ;
- énergie consommée : électricité, transport, chaleur ; et
- fabrication : coûts directs tels que la main-d'œuvre, l'équipement, les consommables et le volume de production, et coûts indirects tels que l'ingénierie, les frais généraux, les frais d'expédition et d'importation.

Ce coût est cumulatif tout au long de la chaîne de valeur, bien qu'il soit parfois exprimé uniquement au niveau des matériaux, des cellules, des packs ou des systèmes. Le coût d'une batterie est généralement exprimé en dollars par volume de production, reflétant l'économie d'échelle totale de la production à grande échelle, par exemple en \$/kWh ou en \$/kg.

Le coût d'une cellule de batterie est une mesure composite qui reflète à la fois le coût des intrants et l'énergie stockée à l'intérieur de la cellule. Une batterie utilisant des intrants deux fois moins chers qu'une autre batterie, mais avec une densité énergétique inférieure pour ces matériaux, ne coûtera pas deux fois moins cher sur une base normalisée. Les cellules de puissance sont généralement plus chères que les cellules d'énergie sur une base \$/kWh, car elles optimisent la densité de puissance par l'ajout de matériaux non actifs au détriment des matériaux actifs dans le même volume.

Une grande partie de la chaîne d'approvisionnement des batteries est localisée en Chine (à l'exception de l'approvisionnement en minerais) et comprend des processus séquentiels en plusieurs étapes pour transformer les matières premières en modules de batteries finis. La réalisation de cette intégration verticale à grande échelle tout au long de la chaîne d'approvisionnement permet de réduire les prix en permettant aux entreprises en aval de fournir des intrants au prix coûtant et de créer des économies d'échelle qui réduisent les dépenses d'investissement par unité de production. Le savoir-faire acquis grâce à un rendement de fabrication plus élevé se traduit par une amélioration des rendements, car les processus sont rendus plus efficaces, ce qui réduit les dépenses d'exploitation globales de la production manufacturière en cours. [Référence\[107\]](#)

La géographie et la juridiction influencent également le coût de fabrication des batteries. Les considérations locales telles que les prix de l'électricité et les coûts

de main-d'œuvre, le coût du transport des biens physiques, ainsi que les barrières réglementaires et les droits d'importation ajoutent tous des coûts qui varient considérablement d'une région à l'autre. Des prix et des politiques favorables pour les matières premières, une automatisation accrue entraînant une réduction des besoins en main-d'œuvre et une consolidation géographique sont autant de facteurs qui contribuent à faire baisser les coûts.

Enfin, outre le coût initial, le fonctionnement et l'entretien des batteries nécessitent des investissements supplémentaires tout au long de leur durée de vie. La recharge des batteries nécessite l'achat d'équipements externes ainsi que des coûts d'électricité. Les coûts de maintenance des systèmes de batteries contribuent également au coût total de possession, comme le remplacement des pièces défectueuses.

Durabilité

Les batteries peuvent contribuer de manière significative à la décarbonisation des applications de transport (à condition d'utiliser une électricité propre) et permettre la décarbonisation du réseau électrique (en combinaison avec des énergies renouvelables intermittentes). Néanmoins, la production des systèmes de batteries entraîne toujours des coûts d'émissions initiaux élevés. L'impact de la fabrication et de l'utilisation des batteries peut être mesuré du berceau à la porte (émissions intégrées). Pour ce faire, on comptabilise les émissions de l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement jusqu'à la mise en service. Elles peuvent également être mesurées du berceau à la tombe, où les émissions liées à la fabrication sont comparées à la réduction totale des émissions sur la durée de vie du produit, ou du berceau au berceau, où les émissions liées à la fin de vie, à la réutilisation et au recyclage sont également prises en compte.

Afin de normaliser les impacts des émissions et de les comparer à des alternatives, les émissions sont exprimées en kgCO₂ eq/kWh. Cette unité de mesure tient compte du total des tonnes de CO₂ émises pendant la fabrication, en plus de tous les autres gaz à effet de serre (GES) émis. Ces autres GES émis sont convertis en tonnes de CO₂ qui auraient le même potentiel de réchauffement global. Ce chiffre, qu'il s'agisse du niveau des matériaux, des cellules ou des packs, est ensuite normalisé par rapport à la taille totale de la batterie.

Tout comme le coût d'une batterie, les émissions totales de GES liées à la fabrication des batteries s'accumulent tout au long du processus de transformation des matières premières en systèmes de batteries. L'extraction de chaque matière première a une empreinte carbone liée à toutes les activités

minières associées, telles que l'exploitation des équipements miniers, le défrichage et le déblayage du sol, le transport des minerais et le dynamitage. La purification des précurseurs pour les batteries nécessite également une importante consommation d'énergie, tant thermique qu'électrique. Le chauffage thermique peut provenir de combustibles émetteurs de carbone tels que le charbon ou le gaz naturel, et l'électricité sera fournie par le réseau local, qui a sa propre empreinte carbone. La fusion peut également nécessiter un agent réducteur, souvent du carbone, qui sera directement consommé au cours du processus et émettra du CO₂. L'électricité est également utilisée pendant les processus de fabrication et d'assemblage des composants, des cellules et des packs, ce qui génère à nouveau des émissions en fonction de l'empreinte carbone du réseau local. Enfin, le transport des composants et des cellules à travers les différentes zones géographiques contribue également à l'empreinte carbone totale des batteries.

La fabrication des batteries est également associée à la production d'autres déchets dérivés qui, bien qu'ils ne contribuent pas à l'effet de serre, soulèvent d'autres préoccupations en matière de durabilité environnementale.

Déchets de sulfate: La conversion des matières premières minérales en matériau cathodique nécessite une étape intermédiaire de conversion des métaux en sulfates métalliques, qui génère ensuite un sous-produit de sulfate de sodium lors de la production du matériau cathodique. Bien que non toxique par nature, une concentration excessive de sulfate de sodium entraîne des problèmes environnementaux tels que la prolifération de micro-organismes dans les bassins versants et l'eutrophisation. [Référence108](#)

Eau: La production de batteries a également une empreinte hydrique importante. L'eau est utilisée comme solvant dans le processus de production des cathodes, puis éliminée sous forme d'eaux usées contenant du sulfate de sodium et de l'ammoniac. L'eau est également utilisée dans la production d'hydroélectricité, qui peut représenter une part importante de la consommation d'énergie selon la composition du mix électrique local. [Référence\[109\]](#)

Compromis et indicateurs composites

Les indicateurs de performance examinés dans la présente appendice sont interdépendants et présentent plusieurs compromis fondamentaux qui sont influencés par la conception et la composition chimique des batteries.

Un premier compromis à examiner est le fait que les batteries fournissent moins d'énergie lorsqu'elles sont déchargées à des taux plus élevés, mais qu'une batterie avec une densité d'énergie et de puissance plus élevée est néanmoins capable d'une libération d'énergie plus extrême. [Référence\[110\]](#), [Référence\[111\]](#) Ceci est illustré dans la **Figure 32** pour les matériaux cathodiques des batteries NCA, NMC et LFP, qui sont comparés en termes de densité de puissance et d'énergie, et testés à différentes températures ambiantes et à différents taux de décharge. Les compositions chimiques à forte concentration en nickel présentent une densité énergétique et une puissance plus élevées que le phosphate de lithium fer, mais elles ont également une stabilité thermique plus faible, un coût plus élevé et sont plus susceptibles d'avoir une durée de vie plus courte (en fonction des conditions de cyclage spécifiques). Par conséquent, les batteries à haute énergie nécessitent une meilleure gestion thermique et présentent un risque plus élevé d'incidents liés à la sécurité.

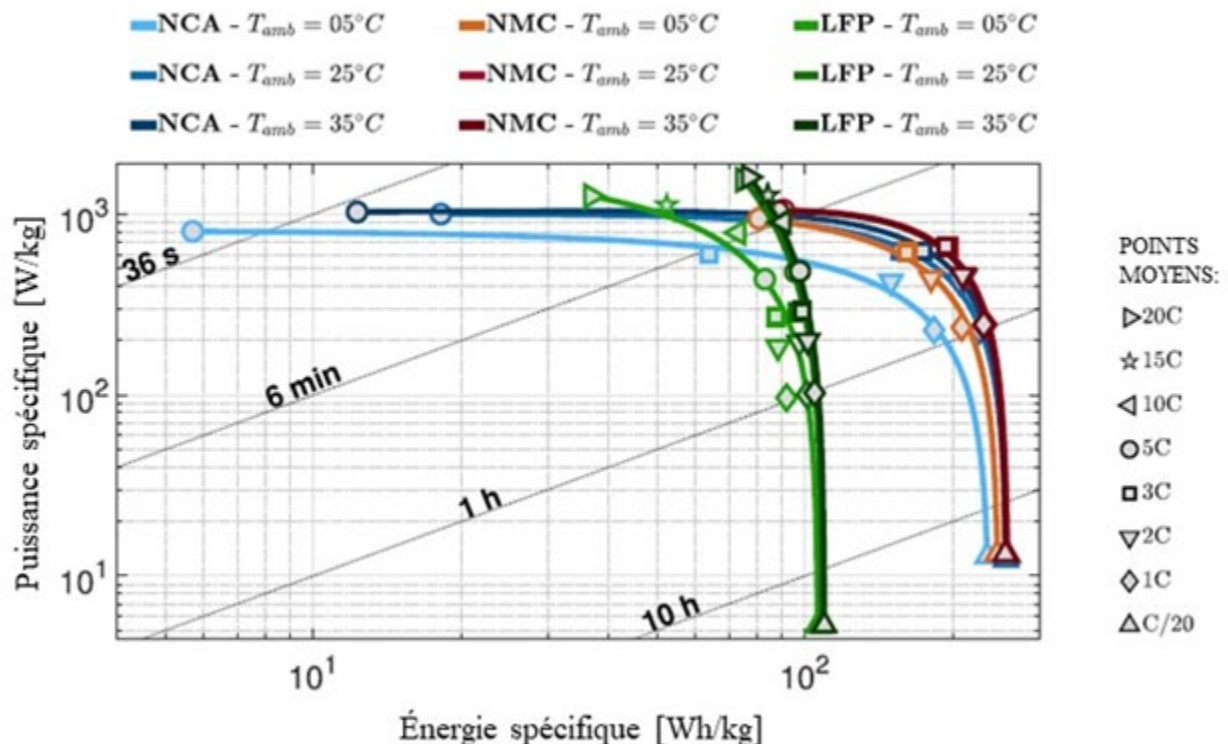


Figure 32 : Compromis entre densité énergétique et densité de puissance pour une sélection de cellules cylindriques lithium-ion commerciales avec cathode NCA, NMC et LFP testées à différentes températures ambiantes. [Référence\[111\]](#)

Figure 32 - version textuelle

Trois autres indicateurs utiles à prendre en compte pour évaluer les compromis entre les différentes performances des batteries sont l'énergie disponible, le coût

actualisé du stockage (LCOS) et le coût annualisé de la capacité (ACC). Ceux-ci combinent l'énergie, la puissance, la sécurité, la durée de vie et/ou le coût.

L'énergie disponible désigne la capacité énergétique (exprimée en Wh) pour une plage d'ÉdC permettant de répondre aux exigences de puissance spécifiées pour une application donnée. L'énergie disponible peut également être exprimée en termes de fin de vie (FdV) et peut donc constituer un indicateur composite pour l'énergie, la puissance et la durée de vie.

Le coût de stockage nivelé (LCOS) est une mesure du coût global par unité d'électricité déchargée, en divisant tous les coûts engagés au cours de la durée de vie par l'électricité cumulée fournie (exprimée en \$/MWh). [Référence\[112\]](#) Les coûts engagés au cours de la durée de vie comprennent l'investissement, les coûts d'exploitation, la recharge et l'élimination en fin de vie, tandis que l'énergie déchargée pendant la durée de vie est le produit de la capacité d'énergie de décharge, du nombre de cycles de décharge par an et du nombre d'années de fonctionnement. Le LCOS est exprimé comme suit.

$$\text{LCOS} = \frac{\text{Coût total encouru}}{\text{Énergie déchargée pendant la durée de vie}}$$

$$\text{LCOS} = \frac{\text{Investissement} + \text{O\&M} + \text{Chargement} + \text{Fin de vie}}{\text{Capacité énergétique} \cdot \text{Cycles par année} \cdot \text{Vie}}$$

Le coût de capacité annualisé (ACC) est une mesure du coût sur la durée de vie (tel que défini ci-dessus) divisé par le produit de la capacité électrique et de la durée de vie (exprimé en kW·années) : [Référence\[112\]](#)

$$\text{ACC} = \frac{\text{Coût total encouru}}{\text{Puissance pendant la durée de vie}}$$

$$\text{ACC} = \frac{\text{Investissement} + \text{O\&M} + \text{Chargement} + \text{Fin de vie}}{\text{Capacité de puissance} \cdot \text{Vie}}$$

Appendice C - Exemple de calcul de la densité énergétique des cellules

Calculs de la densité énergétique gravimétrique pour la cathode au lithium fer phosphate (LFP) et l'anode au graphite

L'exemple illustratif ci-dessous est dérivé des principes fondamentaux, de la densité énergétique gravimétrique au niveau des matériaux (théorique et

pratique), et compare les valeurs d'une cellule et d'un pack commerciaux représentatifs.

Densité énergétique gravimétrique théorique des matériaux

Les tensions nominales du LFP (formule chimique LiFePO_4) et du graphite (formule chimique C_6) dans des configurations de demi-cellules au lithium métal sont respectivement d'environ 3,35 V par rapport à Li/Li^+ et 0,1 V par rapport à Li/Li^+ . La tension nominale d'une cellule complète LFP-graphite sera donc d'environ 3,25 V.

Les capacités gravimétriques théoriques (Q_{th}) des matériaux cathodiques et anodiques sont obtenues en calculant la masse molaire (M) à partir de leurs formules chimiques respectives (où 1 mole = $6,022 \times 10^{23}$ unités de formule atomique), où un électron est stocké pour chaque ion lithium qui peut être théoriquement inséré dans les structures cristallines atomiques des matériaux électrodes.

$$M_{\text{LFP}} = M_{\text{Li}} + M_{\text{Fe}} + M_{\text{P}} + 4M_{\text{O}} = \frac{6.94\text{g}}{\text{mol}} + \frac{55.85\text{g}}{\text{mol}} + \frac{30.97\text{g}}{\text{mol}} + \frac{(4)(16.00)\text{g}}{\text{mol}} = 157.76 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

$$M_{\text{graphite}} = 6M_{\text{C}} = \frac{(6)(12.01)\text{g}}{\text{mol}} = 72.06 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

$$Q_{\text{LFP_th}} = \frac{nF}{M_{\text{LFP}}} = \frac{1000\text{mAh}}{1 \frac{\text{C}}{\text{s}} \cdot \frac{3600\text{s}}{\text{h}}} \cdot \frac{96,485 \frac{\text{C}}{\text{mol}}}{157.76 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 170\text{mAh/g}$$

$$Q_{\text{graphite_th}} = \frac{nF}{M_{\text{graphite}}} = \frac{1000\text{mAh}}{1 \frac{\text{C}}{\text{s}} \cdot \frac{3600\text{s}}{\text{h}}} \cdot \frac{96,485 \frac{\text{C}}{\text{mol}}}{72.06 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 372\text{mAh/g}$$

où $n = 1$ (c'est-à-dire 1 électron par lithium) et F est la constante de Faraday, qui reflète la charge d'une mole d'électrons, et où la charge est exprimée en Ah.

Dans une configuration de cellule complète équilibrée avec des capacités égales de l'anode LFP et de la cathode graphite (c'est-à-dire $N/P = 1$), la capacité gravimétrique théorique des matériaux actifs est la suivante.

$$Q_{\text{matériaux_th}} = \left(\frac{1}{Q_{\text{matériaux_th}}} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{Q_{\text{LFP_th}}} + \frac{1}{Q_{\text{graphite_th}}} \right)^{-1} = 116.7\text{mAh/g}$$

La densité énergétique gravimétrique théorique des matériaux actifs ($W_{\text{matériaux_th}}$) est obtenue en multipliant $Q_{\text{matériaux_th}}$ par la tension nominale de la cellule.

$$W_{\text{matériaux_th}} = Q_{\text{matériaux_th}} \cdot V_{\text{LFP-graphite}} = 116.7 \frac{\text{mAh}}{\text{g}} \cdot 3.25\text{V} = 379 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}}$$

Densité énergétique gravimétrique des matériaux pratiques

En pratique, la capacité théorique n'est pas entièrement disponible pour les cycles, même à des taux de charge et de décharge très faibles, et seule une fraction de la capacité théorique est réversible, ce qui correspond à la densité énergétique gravimétrique des matériaux pratiques (Q_{pr}).

$$Q_{LFP_pr} = 160 \frac{\text{mAh}}{g} \quad \text{et} \quad Q_{\text{graphite_pr}} = 350 \frac{\text{mAh}}{g}, \quad \text{donc} \quad Q_{\text{matériaux_pr}} = 109.8 \frac{\text{mAh}}{g}, \quad \text{et}$$

$$W_{\text{matériaux_pr}} = Q_{\text{matériaux_pr}} \cdot V_{LFP\text{-graphite}} = 109.8 \frac{\text{mAh}}{g} \cdot 3.25V = 357 \text{Wh/kg}$$

D'autres considérations pratiques, telles qu'une efficacité coulombique plus faible lors du premier cycle et un rapport N/P s'écartant de l'unité, réduiront encore la densité énergétique pratique des matériaux. [Référence\[113\]](#)

Densité énergétique gravimétrique des cellules

Dans les calculs précédents, seule la masse des matériaux actifs a été prise en compte dans le calcul, sans inclure la masse des composants inactifs de la cellule et du boîtier, ce qui réduit la densité énergétique. Dans cet exemple de calcul, nous utilisons la cellule BYD Blade C102F. Il s'agit d'une cellule prismatique LFP-graphite de grand format utilisée dans les véhicules électriques (illustrée ci-dessous dans la **Figure 29**) qui a une capacité de 138 Ah ($Q_{cellule}$) et pèse 2,54 kg ($m_{cellule}$). [Note de bas de page114](#)

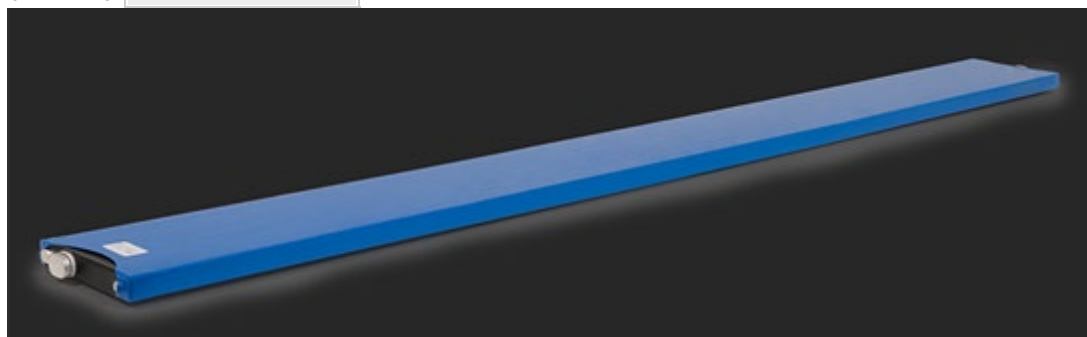


Figure 33 : Image d'une cellule prismatique LFP BYD Blade C102F. [Référence106](#)

La densité énergétique de la cellule est la suivante.

$$W_{\text{Cell}} = \frac{Q_{\text{Cell}} \cdot V_{LFP\text{-graphite}}}{m_{\text{cell}}} = \frac{138\text{Ah} \cdot 3.25V}{2.5363\text{kg}} = 177 \text{Wh/kg}$$

Densité énergétique gravimétrique du pack

Les cellules individuelles sont reliées entre elles et généralement regroupées en modules, puis en packs. Les cellules peuvent également être regroupées directement en packs, ce que l'on appelle l'intégration cellule-pack (illustrée dans la **Figure 34**). [Référence\[115\]](#)

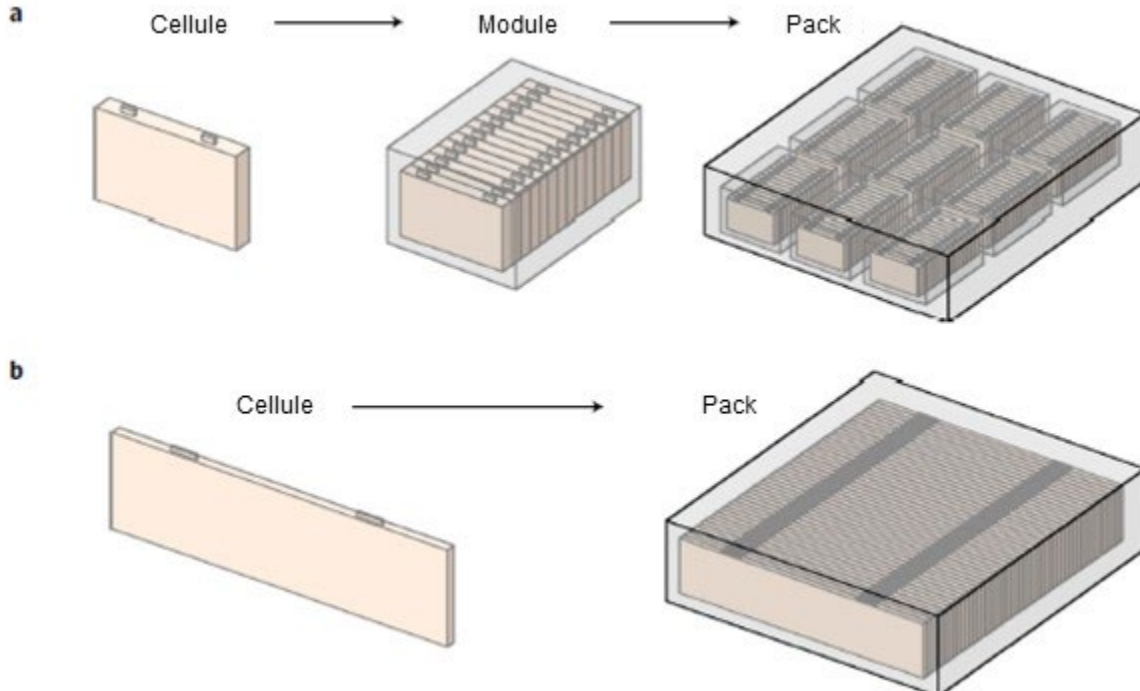


Figure 34 : Illustration schématique (a) d'un pack de batteries classique composé de cellules prismatiques et (b) d'un pack de batteries avec intégration cellule-pack. [Référence\[115\]](#)

Figure 34 - version textuelle

Dans cet exemple de calcul, nous utilisons la version longue autonomie du pack batterie BYD Dolphin. Ce véhicule électrique de tourisme pèse 1 650 kg, a une autonomie de 185 à 395 km (selon les conditions météorologiques et le type de conduite en ville ou sur autoroute) et se compose de 104 cellules BYD Blade C102F (n_{cellules}) connectées en série et pèse 308,6 kg (m_{pack}). [Référence\[116\]](#), [Référence\[117\]](#)

La densité énergétique du pack est la suivante.

$$W_{\text{Pack}} = \frac{n_{\text{cellules}} \cdot Q_{\text{Cellule}} \cdot V_{\text{LFP-graphite}}}{m_{\text{pack}}} = \frac{104 \cdot 138\text{Ah} \cdot 3.25\text{V}}{308.6\text{kg}} = 151\text{Wh/kg}$$

Appendice D - Données de référence

L'appendice suivante présente les tableaux de données qui ont été utilisés en partie pour établir les références et les objectifs du présent rapport. Ces données proviennent du Conseil européen pour la recherche et le développement dans le domaine automobile (EUCAR), de Batteries Europe, du Consortium américain pour les batteries avancées (USABC) et de l'Institut Fraunhofer pour les systèmes énergétiques solaires. Les données s'appliquent aux batteries destinées à des applications automobiles, à des applications de stockage stationnaire et aux nouvelles compositions chimiques et conceptions de cellules de batterie, y compris les batteries sodium-ion, les batteries à semi-conducteurs et d'autres compositions chimiques destinées à des marchés de niche (par exemple, zinc-ion, lithium-air, sodium-soufre, etc.).

Exigences de l'EUCAR pour les futures applications VEB Référence[118]

VEB – Paramètres au niveau des cellules	Unité	Conditions	État de l'art en 2019 (valeurs moyennes approximatives)	Objectif 2030 Marché de masse PC faible autonomie ~400 km	Objectif 2030 Marché de masse PC haut de gamme > 600 km	Objectif 2030 Véhicules utilitaires lourds grand public
Énergie spécifique	Wh/kg	@1/3C charge et décharge à 25° C (charge avec CC et CV* étape)	~250	450	450	450
Densité énergétique	Wh/L	@1/3C charge et décharge à 25° C (charge avec CC et CV* étape)	~500	1000	1000	1000

Exigences de l'EUCAR pour les futures applications VEB [Référence\[118\]](#)

VEB – Paramètres au niveau des cellules	Unité	Conditions	État de l'art en 2019 (valeurs moyennes approximatives)	Objectif 2030 Marché de masse PC faible autonomie ~400 km	Objectif 2030 Marché de masse PC haut de gamme > 600 km	Objectif 2030 Véhicules utilitaires lourds grand public
Puissance spécifique continue – décharge	W/kg	180 s, ÉdC 100 %-10 %, 25 °C	750	1000	1000	1000
Densité de puissance continue – décharge	W/L	180 s, ÉdC 100 %-10 %, 25 °C	1500	2200	2200	2200
Puissance spécifique de pointe PC – décharge / puissance spécifique de pointe CV** - décharge	W/kg	10 s, ÉdC 50 %, 25 °C / -25 °C (PC) 60 s, ÉdC 50 %, 25 °C / -25 °C (HDV)	1500 / 500	1800 / 600	1800 / 600	1350 / en raison des performances
Densité de puissance de pointe PC – décharge / densité de puissance de pointe	W/L	10 s, ÉdC 50 %, 25 °C / -25 °C 60 s, ÉdC 50 %, 25 °C / -25 °C	3000 / 1000	4000 / 1300	4000 / 1300	3000 / -

Exigences de l'EUCAR pour les futures applications VEB [Référence\[118\]](#)

VEB – Paramètres au niveau des cellules	Unité	Conditions	État de l'art en 2019 (valeurs moyennes approximatives)	Objectif 2030 Marché de masse PC faible autonomie ~400 km	Objectif 2030 Marché de masse PC haut de gamme > 600 km	Objectif 2030 Véhicules utilitaires lourds grand public
CV** - décharge						
Taux de charge	C (1/h)	ÉdC 0 %-80 %	3	3,5	3,5	3
Autodécharge	%	ÉdC 100 %, 25 °C, 30 jours	1	1	1	1
Durée de vie WLTP pour les voitures Cycle de vie pour les camions/bus	Consommation d'énergie MWh	25° C, PdD 90 % jusqu'à État de santé 80 %	~20	22 à 24	22 à 24	N/A
Niveau de danger	Niveaux de sécurité EUCAR	-	<=4	<=4	<=4	<=4
Coût	€/kWh	-	220	70	70	70
Volume des cellules par bloc-batterie	%	-	60	75	75	75

Exigences de l'EUCAR pour les futures applications VEB [Référence\[118\]](#)

VEB – Paramètres au niveau des cellules	Unité	Conditions	État de l'art en 2019 (valeurs moyennes approximatives)	Objectif 2030 Marché de masse PC faible autonomie ~400 km	Objectif 2030 Marché de masse PC haut de gamme > 600 km	Objectif 2030 Véhicules utilitaires lourds grand public
Poids des cellules par bloc-batterie	%	-	70	80	80	80
Durée de vie prévue	Années et km	PdD 90 %	Durée de vie d'une voiture 150 000 km	Durée de vie d'une voiture 150 000 km	Durée de vie d'une voiture 150 000 km	N/A
Coût	€/kWh	-	*+30 % du coût des cellules	*+20 % du coût des cellules	*+15 % du coût des cellules	N/A

PC = voiture particulière ; HDV = véhicule utilitaire lourd ; CC = courant constant ; CV* = tension constante ; CV** = véhicule utilitaire.

Objectifs de l'USABC pour les batteries avancées à faible coût et à charge rapide pour les véhicules électriques - 2023 [Référence\[119\]](#)

Caractéristiques en fin de vie à 30° C	Unités	Niveau de la cellule
Densité de puissance de décharge maximale, impulsion de 30 s	W/L	1400
Puissance de décharge spécifique maximale, impulsion de 30 s	W/kg	700

**Objectifs de l'USABC pour les batteries avancées à faible coût et à charge rapide
pour les véhicules électriques - 2023** [Référence\[119\]](#)

Caractéristiques en fin de vie à 30° C	Unités	Niveau de la cellule
Puissance spécifique de régénération maximale, impulsion de 10 s	W/kg	300
Densité énergétique utilisable	Wh/L	550
Énergie utilisable spécifique (définie à la puissance cible)	Wh/kg	275
Durée de vie	Années	10
Durée de vie (25 % FC)	Cycles	1000
Coût (pour un volume annuel de 250 000)	\$/kWh (USD)	75
Temps de recharge normal	Heures	< 7 heures, J1772
Taux de recharge rapide	Minutes	80 % de l'énergie utilisable en 15 minutes
Tension minimale de fonctionnement	V	>0,55 Vmax
Plage de température de fonctionnement sans assistance	Wh/kg	70 % d'énergie utile spécifique à -20 °C
Plage de température de survie, 24 h	°C	-40 à +66
Autodécharge maximale	%/mois	<1

FC = charge rapide ; les valeurs correspondent à la fin de vie (EOL) à 30° C ; se reporter au manuel de test USABC EV pour la définition et la procédure de test.

**Objectifs de l'USABC pour les batteries haute performance avancées destinées
aux applications VE** [Référence\[120\]](#)

Caractéristiques de fin de vie à 30 °	Unités	Niveau système	Niveau cellule
Densité de puissance de décharge maximale, impulsion de 30 s	W/L	1000	1500

**Objectifs de l'USABC pour les batteries haute performance avancées destinées
aux applications VE** [Référence\[120\]](#)

Caractéristiques de fin de vie à 30 °	Unités	Niveau système	Niveau cellule
Puissance de décharge spécifique maximale, impulsion de 30 s	W/kg	470	700
Puissance spécifique de régénération maximale, impulsion de 10 s	W/kg	200	300
Densité d'énergie utilisable à un taux de décharge C/3	Wh/L	500	750
Énergie spécifique utilisable à un taux de décharge C/3	Wh/kg	235	350
Énergie utilisable à un taux de décharge C/3	kWh	45	N/A
Durée de vie	Années	15	15
Cycle de vie DST	Cycles	1000	1000
Coût pour 250 000 unités	\$/kWh (USD)	125	100
Environnement d'exploitation	°C	-30 à +52	-30 à +52
Temps de recharge normal	Heures	< 7, J1772	< 7, J1772
Recharge rapide	Minutes	80 % ΔÉdC en 15 min	80 % ΔÉdC en 15 min
Tension maximale de fonctionnement	V	420	N/A
Tension minimale de fonctionnement	V	220	N/A
Courant maximal, 30 s	A	400	400

Objectifs de l'USABC pour les batteries haute performance avancées destinées aux applications VE [Référence\[120\]](#)

Caractéristiques de fin de vie à 30 °	Unités	Niveau système	Niveau cellule
Fonctionnement sans assistance à basse température	%	>70 % d'énergie utilisable à un taux de décharge C/3 à -20 °C	>70 % d'énergie utilisable à un taux de décharge C/3 à -20 °C
Plage de température de survie, 24 heures	°C	-40 à +66	-40 à +66
Autodécharge maximale	%/mois	<1	<1

DST = test de contrainte dynamique

Énergie

Feuille de route des indicateurs clés de performance de Batteries Europe pour les batteries destinées aux applications de transport et à l'intégration, valeurs d'énergie et de densité de puissance. [Note de bas de page\[121\]](#)

KPI	Définition	Niveau système/pack/cellule	Unité	NMT	2023	2027	2030	2035	2050
Densité énergétique gravimétrique	Contenu énergétique nominal divisé par le poids de la cellule*	Cellule	Wh/kg	7	250	400	>400	>500	750+
Densité énergétique	Contenu énergétique nominal divisé par le	Cellule	Wh/kg	7	500	1000	>1000	>1000	>1500

KPI	Définition	Niveau système/pack/cellule	Unité	NMT	2023	2027	2030	2035	2050
volumétrie	poids de la cellule*								

*Y compris les capteurs uniquement s'ils sont intégrés dans la cellule ou sur la cellule et les BMS (intégrés ou non) uniquement s'ils se trouvent au niveau de la cellule

Indicateurs clés de performance liés au fonctionnement (charge électrique)

KPI	Définition	Niveau système/pack/cellule	Unité	NMT	2023	2027	2030	2035	2050
Densité de puissance gravimétrique	Puissance moyenne nominale fournie par la cellule lors d'une décharge complète (sur la base de l'énergie utilisable de la cellule) divisée par le	Cellule	W/kg	7	750	900	1000	>1000	>1500

KPI	Définition	Niveau système/pack/cellule	Unité	NMT	2023	2027	2030	2035	2050
	poids de la cellule*								
Densité énergétique volumétrique	Puissance moyenne nominale fournie par la cellule lors d'une décharge complète (sur la base de l'énergie utilisable de la cellule) divisée par le volume de la cellule*	Cellule	W/kg	7	1500	2000	2500	>2500	>3000

*Y compris les capteurs uniquement s'ils sont intégrés dans la cellule ou sur la cellule et les BMS (intégrés ou non) uniquement s'ils se trouvent au niveau de la cellule

Batteries Na-ion Gen4 pour applications de stockage stationnaire

Indicateurs de performance clés de Batteries Europe pour les batteries sodium-ion avancées destinées au stockage stationnaire [Référence\[121\]](#)

Matériaux cathodiques typiques		Matériaux anodiques typiques			
Na _x T _M O ₂ oxydes stratifiés, cathodes polyanioniques (par exemple Na ₄ Fe ₃ (PO ₄) ₂ P ₂ O ₇ , Na ₃ V ₂ (PO ₄) ₂ F ₃ , bleu de Prusse et ses analogues		Carbones durs, carbones tendres ou à base de Sn, à base de métal Na			
Indicateurs	SOTA	2027	2029	2035	
Énergie spécifique au niveau de la cellule (Wh/kg)		160	220		
Densité énergétique volumétrique au niveau de la cellule (Wh/L)	-	250+	500		
Cycles (ECC à 60-80 % PdD)	-	1000+	4000+		
Niveau de danger EUCAR	-	2	2		
Plage de température de fonctionnement (°C)	-	En dessous de la température ambiante jusqu'à 60	-20 à 80		
Coût par cycle (€/kWh/cycle) (niveau pack)	-	0,5 – 1,0	< 0,25		

T_M = métaux de transition, RT = température ambiante

	2021/22 (À court terme)	2025 (moyen terme)	2030 (long terme)	2035 (vision)
Objectifs politiques		Objectif UE: Gen.3	Objectif UE: Gen.4	

		250-400 Wh/kg, 750-1000 Wh/L coût au niveau pack < 100 €/kWh	400-500+ Wh/kg, 800-1000+ Wh/L coût au niveau pack < 75 €/kWh	
Marché LIB	400 GWh	0.5–2 TWh	1-6 TWh	2–8 TWh
Marché BTS	EBP: < 2 GWh	EBO: 0–1 GWh EBS: 0–5 GWh EBP: 2-15 GWh	EBO: 5–10 GWh EBS: 5–15 GWh EBP: 5–30 GWh	EBO: 10–20 GWh EBS: 20–50 GWh EBP: 10–50 GWh
Applications BTS	EBP: Autobus; Applications industrielles, e.g. AGV	EBO: Équipement industriels robustes et adaptés aux environnements difficiles; Voitures particulières EBS: Aéronefs autonomes (drones); Voitures particulières EBP: Stockage stationnaire; Voitures particulières et camions	EBO: Équipement industriels robustes et adaptés aux environnements difficiles; Voitures particulières EBS : Aéronefs autonomes (drones); Voitures particulières EBP : Voitures particulières et camions	EBS: Transport aérien de passagers, Camions
Intégration de cellules	Toutes formes - Les aspects liés à la sécurité du lithium métallique et à la formation d'H ₂ S pour les sulfures	Toutes formes - Les aspects liés à la sécurité du lithium métallique et à la formation d'H ₂ S pour les sulfures en cas	Toutes formes - Les aspects liés à la sécurité du lithium métallique et à la formation d'H ₂ S pour les sulfures en cas	Toutes formes - Les aspects liés à la sécurité du lithium métallique et à la formation d'H ₂ S pour les

	en cas d'accidents doivent être pris en compte. Les variations de volume importantes doivent être compensées → pression externe élevée requise (oxydes, sulfures) / faible pression externe requise (polymères) PEB: Nécessite un chauffage 50-80 °C	d'accidents doivent être pris en compte. Les variations de volume importantes doivent être compensées → pression externe élevée requise (oxydes, sulfures) / faible pression externe requise (polymères)	d'accidents doivent être pris en compte. Les variations de volume importantes doivent être compensées → pression externe élevée requise (oxydes, sulfures) / faible pression externe requise (polymères)	sulfures en cas d'accidents doivent être pris en compte. Les variations de volume importantes doivent être compensées → pression externe élevée requise (oxydes, sulfures) / faible pression externe requise (polymères)
ICP LIB	Densité énergétique: 230-300 Wh/kg, 600-750 Wh/L Prix: 90-175 €/kWh	Densité énergétique: 250-330 Wh/kg, 650-850 Wh/L Prix: 60-130 €/kWh	Densité énergétique: 310-350 Wh/kg, 750-950 Wh/L Prix: 45-105 €/kWh	Densité énergétique: 320-360 Wh/kg, 800-960 Wh/L Prix: 45-90 €/kWh
Conception cellules BTS + BTS KPI	EBP: [Li métal] / [Polymère SE] / [Polymère SC, LFP] Densité énergétique: 240 Wh/kg, 360 Wh/L	EBO: [Li métal] / [Oxide SE] / [Gel catholyte, NMC] Densité énergétique: 315 Wh/kg, 1020 Wh/L EBS: [Si/C] / [Sulfure SE] / [Sulfure SC, NMC] Densité énergétique: 275 Wh/kg, 650 Wh/L EBS: [Li metal] /		EBO: [Li métal] / [Oxide SE] / [Gel catholyte, NMC] Densité énergétique: 350 Wh/kg, 1140 Wh/L EBS : [Si/C] / [Sulfure SE] / [Sulfure SC, NMC] Densité énergétique:

		[Sulfure SE] / [Sulfure SC, NMC] Densité énergétique: 340 Wh/kg, 770 Wh/L EBP: [Li métal] / [Polymère SE] / [Polymère SC, NMC] Densité énergétique: 440 Wh/kg, 900 Wh/L		325 Wh/kg, 835 Wh/L EBS: [Li métal] / [Sulfure SE] / [Sulfure SC, NMC] Densité énergétique: 410 Wh/kg, 1150 Wh/L EBP: [Li métal] / [Polymère SE] / [Polymère SC, NMC] Densité énergétique: 500 Wh/kg, 1150 Wh/L
--	--	---	--	--

Feuille de route de l'Institut Fraunhofer pour les batteries tout solide (BTS) à l'horizon 2035 et au-delà ; Batteries tout solides avec électrolyte solide à base d'oxyde-EBO, avec électrolyte à base de sulfure-EBS, et avec électrolytes à base de polymère-EBP. Adapté du rapport original. [Référence122](#)

Catégorie	Technologie	Aujourd'hui & à court terme (2025)	Moyen/long terme	Vision (2035)
	LIB	200-300 Wh/kg, 600-750 Wh/L 90-175 €/kWh	Amélioration continue	320-360 Wh/kg, 800-960 Wh/L 45-90 €/kWh
Me-ion	SIB	140-160 Wh/kg, 250-300 Wh/L 80-120 €/kWh	Optimisation des combinaisons de matériaux	>200 Wh/kg, >400 Wh/L <40 €/kWh

Catégorie	Technologie	Aujourd'hui & à court terme (2025)	Moyen/long terme	Vision (2035)
Me-ion	SIB - Sel	<150 Wh/kg, 10-25 Wh/L 700-1000 €/kWh*	Augmentation de la tension de fonctionnement et réduction des coûts	<200 €/kWh*
Me-ion	MIB	50-150 Wh/kg, 150-300 Wh/L	Combinaison cathode-électrode stable	>300 Wh/kg, >400 Wh/L <40 €/kWh
Me-ion	ZIB	30-60 Wh/kg, 40-100 Wh/L	Stabilité des électrodes et de l'électrolyte	50-120 Wh/kg, 80-200 Wh/L
Me-ion	AIB	30-35 Wh/kg, 35-50 Wh/L, mais 9,000 W/kg et >20,000 cycles	Électrolyte hautement corrosif	45-50 Wh/kg, 45-80 Wh/L, mais 10,000 W/kg et >50,000 cycles; économies 10-20% réalisées par rapport aux LIBs
Me-S	Li-S	> 300 Wh/kg, 300-450 Wh/L	Stabilité cyclique et densité de puissance	550 Wh/kg, 700 Wh/L 50 €/kWh
Me-S	Na-S RT	>300 Wh/kg	De multiples défis, en particulier du côté cathodique et anodique	>350 Wh/kg
Me-S	Na-S HT	180-268 Wh/kg, 300-414 Wh/L, calendrier et cycle de vie longs, 300-450 €/kWh*	Réduction des coûts et amélioration de la sécurité	220-300 Wh/kg, 320-440 Wh/L, calendrier et cycle de vie longs, <300 €/kWh*
Me-air	Li-air	<= 500 Wh/kg, mais avec une	Sécurité, efficacité énergétique,	Théorique: 3500 Wh/kg

Catégorie	Technologie	Aujourd'hui & à court terme (2025)	Moyen/long terme	Vision (2035)
		stabilité cyclique très faible	réactions secondaires nocives pour la santé	Pratique: 1230 Wh/kg
Me-air	Zn-air	100-200 Wh/kg, conception à flux unique avec pot. Haute stabilité cyclique, 100-150 €/kWh	Pas de conception stable des cellules planes, faible performance énergétique	200-300 Wh/kg, 2,000-14,000 cycles 10-100 €/kWh
	V-RFB	22-30 Wh/kg, > 10,000 cycles, 20 ans vie calendrier	Amélioration de la température de fonctionnement et empilement automatisé des cellules	>35 Wh/kg, > 10,000 cycles, 20 ans vie calendrier

Feuille de route de l'Institut Fraunhofer pour les technologies de batteries alternatives à l'horizon 2035 et au-delà. Adapté du rapport original. [Référence\[123\]](#)

Annexe 1 – Entreprises de l'écosystème canadien des batteries

Au moment de la rédaction du présent document, cette liste répertorie la plupart des entreprises connues dans les segments de la chaîne de valeur liés au traitement des batteries, aux composants, aux cellules, aux packs, aux applications, à la réutilisation et au recyclage.

- 14156048 Canada Inc.
- Abound Energy Inc. (formerly zinc 8)
- AdvEn Inc.
- Adventec Manufacturing
- AECON
- Agora Energy Technologies Ltd.
- AGT Electric Cars
- Alberta Lithium Battery Company
- Alstom Transport Canada Inc.

- AltaStream
- AlumaPower Corporation
- AMERESCO
- Aqua-Cell Energy Inc.
- Arianne Phosphate
- ArlanXEO
- Asahi Kasei Honda Battery Separator Corp
- Aspin Kemp and Associates Inc.
- Atlas Power Technologies Inc.
- Atura Power
- Avalon Advanced Materials
- Aypa
- BASF Canada
- Batteries Expert
- BC Research Inc. (BCRI)
- BIKTRIX
- Blue Solutions Canada Inc.
- Bobaek America
- BYD Canada
- Cadex Electronics Inc.
- Call2Recycle
- Calogy Solutions
- Calumix Technologies Inc
- Canada Fluorspar (NL) Inc.
- Canadian Electric Vehicles Ltd.
- Canadian Energy
- CanBat technologies Inc.
- Cantec Systems
- CarbonIP Technologies Inc.
- Carbonix Inc.
- Chang Chun Group
- ChemBioPower Ltd.
- Cirba Solutions
- Clear Power Solutions
- Concept GEEBEE
- Conductive Energy Inc. (formerly LiEP Energy Ltd.)
- CONVERGENT
- Corvus Energy
- Critical Elements Lithium corp.

- CSA Group
- Damon Motors
- Destrier Electric
- Discover Battery
- E3 Lithium Corp.
- East Penn Canada
- eCAMION Inc
- Eclipse Automation
- EcoPro
- Eecomobility Inc.
- Eguana Technologies
- Electra Battery Materials Corp.
- Electroveya
- EMP Metals
- Eneon ES
- Energy Plug Technologies
- enfinite
- Enlighten Innovations, Inc.
- E-One Moli Energy Ltd
- Epiroc (formerly FVT research Inc.)
- e-Storage Solutions
- Everwin Mobility
- EVLO
- Evolugen
- EVSX
- EVT Batteries
- Excell Battery
- Exro Technologies
- Eyelit
- e-Zinc Inc.
- Fenix Advanced Materials
- First Phosphate Corp.
- Flex-Ion Battery Innovation Centre, a division of Ventra Group Co.
- FLUENCE
- Focus Graphite
- Ford Motor Company
- Foreseeson Technology Inc.
- Fortune Minerals Limited
- Frontier Lithium

- G6 Energy Corp
- GBatteries Energy Canada Inc.
- General Motors (GM)
- GENOPTIC LED INC.
- Glencore
- Graphene Leaders Canada (GLC) Inc.
- Green Graphite Technologies
- Green Technology Metals
- GreenBattery
- Greenlight Innovation Corporation
- GREENWOOD SUSTAINABLE INFRASTRUCTURE
- Grengine Inc.
- H55 Canada
- Hartford Energy Solutions
- Hatch Ltd.
- Hexagon Purus
- Highwood Asset Management
- Honda
- Honda Posco Future M Co., LTD.
- HPQ Silicium Inc.
- Hutchinson Aéronautique et Industrie Ltée
- Hybrid Power Solutions Inc.
- Ignis Lithium
- Invinity Energy Systems (Canada) Corporation
- Kargo
- KFN Oil & Gas Co Ltd
- KSW DAHE International LTD
- Largo
- Letenda
- Levando Technologies Inc.
- Li-Cycle Corp.
- Li-Metal Corp.
- LION Electric
- Litens Automotive Group
- Lithion Recycling
- Lithium Universe
- LithiumBank Resources
- Litus Inc.
- Magnacharge

- MakeSens Inc.
- Malahat Centre of Excellence
- Manganese X Energy Corp.
- Mangrove Lithium
- Maplesoft
- Mason Resources
- Mazlite Inc.
- MEDATech Engineering Services Limited
- Metals Australia Ltd.
- Micro Bird
- Microgreen Energy
- Moment Energy Inc.
- Momentum Materials Solution
- Motor Coach Industries Ltd
- Motrec International Inc.
- Nano One Materials Corp.
- Nanode Battery Technologies
- Nanorial Technologies Ltd.
- NanoXplore Inc.
- Narval Energy
- Nautchiuk Environmental Inc.
- NEO Battery Materials Ltd.
- Neoen
- Neolithica
- Net Zero Metals
- New Flyer Industries
- New Nemaska Lithium
- NextStar Energy (Stellantis - LG Energy Solution JV)
- NiCAT Battery Technologies Inc.
- Northern Graphite Corp.
- Northland Power
- Northvolt
- Nouveau Monde Graphite
- Nova Bus/Volvo
- NOVONIX
- NRStor
- Nuvation Energy
- Nuvolt Energy Inc.
- Nuvvon

- Peregrine Energy Solutions LLC
- Pliant Power Devices Inc.
- Plus Power LLC
- Polar performance material
- Portable Electric Ltd.
- Potentia Renewables Inc.
- PowerCo (VW)
- Powin Energy Corporation
- Prairie Lithium Corporation
- Primobius Stelco Partnership
- Pulsenics
- Radiance Energy Corporation
- Rainhouse Energy Ltd.
- Recion Technologies Inc.,
- RecycLiCo Battery Materials Inc.
- Resonetics
- Rio Tinto Fer et Titane
- Rock Tech Lithium
- Salient Energy Inc.
- Sherritt International
- Shift Clean Solutions Ltd.
- Siemens
- Ski-Doo (Bombardier Recreational Products)
- Solid Ultrabattery
- Solus Advanced Materials
- Starz Energies Canada Inc.
- Stromcore
- Stryten Energy
- Sudano Consulting Inc.
- Summit NanoTech Corp
- Superionics
- Surrence Battery Company Ltd
- SysNergie Inc
- Taiga Motors
- Taranis Energy
- Tekna
- Teric Power
- Tesla Motors Canada ULC
- Toda Advanced Materials

- Transalta
- Trion Battery
- Troes Corp
- UgoWork
- Ultium CAM JV
- Umicore Canada
- VAH Power (Canada) Inc.
- Vale Canada Limited
- Vanadium Corp
- Vecture Inc.
- Veolia North America
- Volinergy Technologies Inc.
- Volt Carbon
- Volta Energy Solutions
- Voltari Marine Electric
- Volterra Battery Manufacturing
- VRB Energy
- Zen Electric Bikes
- Zen Energy Inc.
- Zentek Ltd.

Références

Référence 1

[Approche stratégique en matière d'innovation dans le domaine des batteries](#) - Ressources naturelles Canada.

[Retour à la référence1](#)

Référence 2

Malik, R., Bertens, K., Allard, R. P., Thompson, K., Hiscock, J., Handler, C., & Wilson, A. (2024). Une approche stratégique pour évaluer les investissements dans l'innovation en matière de batteries. *iScience*, 27(11).

[Retour à la référence2](#)

Référence 3

[Les minéraux et l'économie Minéraux critiques](#) (Consulté le 28 avril 2025)

[Retour à la référence3](#)

Référence 4

[L'industrie canadienne de l'automobile](#) (Consulté le 28 avril 2025)

[Retour à la référence4](#)

Référence 5

[La chaîne de valeur des batteries](#) (Consulté le 28 avril 2025)

[Retour à la référence5](#)

Référence 6

[Minerals and the economy](#)

[Retour à la référence6](#)

Référence 7

[From Rocks to Power: Strategies to Unlock Canada's Critical Minerals for Global Leadership in Energy Storage, EVs, and Beyond](#) (PDF 8.8 Mo)

[Retour à la référence7](#)

Référence 8

[China Regains Number One Spot in BloombergNEF's Global Lithium-Ion Battery Supply Chain Ranking \(En anglais\)](#)

[Retour à la référence8](#)

Référence 9

Krishnan, R., Gopan, G., 2024. Une revue complète de l'extraction du lithium : perspectives historiques, technologies émergentes, stockage et considérations environnementales. *Cleaner Engineering and Technology*, Volume 20

[Retour à la référence9](#)

Référence 10

[Lithium facts](#) (consulté le 1er août 2025)

[Retour à la référence10](#)

Référence 11

Lagadec, M.F., Zahn, R. et Wood, V., 2019. Caractérisation et évaluation des performances des séparateurs de batteries lithium-ion. *Nature Energy*, 4(1), pp.16-25.

[Retour à la référence11](#)

Référence 12

Zhu, P., Gastol, D., Marshall, J., Sommerville, R., Goodship, V. et Kendrick, E., 2021. A review of current collectors for lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 485, p.229321.

[Retour à la référence12](#)

Référence 13

Leung, P., Li, X., De León, C.P., Berlouis, L., Low, C.J. et Walsh, F.C., 2012. Progrès dans le domaine des batteries à flux redox, défis restants et applications dans le stockage d'énergie. *Rsc Advances*, 2(27), pp.10125-10156.

[Retour à la référence13](#)

Référence 14

Zhang, D., Zhao, H., Liang, F., Ma, W. et Lei, Y., 2021. Nanostructured arrays for metal-ion battery and metal-air battery applications. *Journal of Power Sources*, 493, p.229722.

[Retour à la référence14](#)

Référence 15

[Electric Vehicle Battery Management at End-of-Vehicle Life \(PDF, 14.5 Mo, En anglais\)](#) (Consulté le 8 août 2025)

[Retour à la référence15](#)

Référence 16

[Feuille de route pour la chaîne de valeur des batteries au Canada](#) (Consulté le 8 août 2025)

[Retour à la référence16](#)

Référence 17

Plante, M., 2025. Investir dans les batteries et les véhicules du futur : une perspective boursière. *Energy Economics*, p.108216.

[Retour à la référence17](#)

Référence 18

<https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/environmen...> (Consulté le 7 mai 2025)

[Retour à la référence18](#)

Référence 19

AIE (2024). [Tendances des voitures électriques – Perspectives mondiales pour les véhicules électriques en 2024 – analyse](#). (consulté le 13 mars 2025).

[Retour à la référence19](#)

Référence 20

Statistique Canada. Tableau 20-10-0024-01 Immatriculations de véhicules automobiles neufs, trimestre

[Retour à la référence20](#)

Référence 21

[National EV registrations fall to 8.7 per cent in Q1 2025: StatsCan](#) (consulté le 24 juin 2025)

[Retour à la référence21](#)

Référence 22

[Energy Storage Canada \(2022\). *Energy Storage: A Key Net Zero Pathway in Canada*](#) (consulté le 13 mars 2025).

[Retour à la référence22](#)

Référence 23

Zhang, A. et Kanduth, A. (2024). [Supercharger le stockage par batterie pour un réseau plus grand, plus propre et plus intelligent, 440 mégatonnes.](#) (consulté le 13 mars 2025).

[Retour à la référence23](#)

Référence 24

[Batemo Cell Explorer - Base de données sur les batteries.](#)

[Retour à la référence24](#)

Référence 25

[Byd A Grade Rechargeable C45f Lfp Prismatic Cell 3.2v 280ah 302ah 310ah Lifepo4 Battery Cells For Storage System - China Wholesale Lifepo4 Battery Cell 78 \\$ chez Dongguan Caixin Information Technology Co., Ltd | Globalsources.com.](#)

[Retour à la référence25](#)

Référence 26

[Les batteries de la BYD Dolphin en détail - Articles - PushEVs.](#)

[Retour à la référence26](#)

Référence 27

Pegel, H., Grimm, A., Frey, C., Seefeldt, V., Baazouzi, S. et Sauer, D.U., 2024. Fabrication de cellules lithium-ion cylindriques sans languette : quantification de l'influence des dimensions des cellules et du matériau du boîtier via une modélisation des coûts basée sur les processus. *Journal of Energy Storage*, 98, p.112863.

[Retour à la référence27](#)

Référence 28

[Présentation des produits Farasis : repenser les batteries \(PDF, 3.9 Mo\).](#)

[Retour à la référence28](#)

Référence 29

[Hina Battery - Détails et spécifications des batteries sodium-ion.](#)

[Retour à la référence29](#)

Référence 30

[Batterie pour mobilité et informatique](#) | LG Energy Solution.

[Retour à la référence30](#)

Référence 31

[LG E66a - Conception de la batterie.](#)

[Retour à la référence31](#)

Référence 32

[INR21700-P45B - Molicel.](#)

[Retour à la référence32](#)

Référence 33

Zhou, Y., Gohlke, D., Rush, L., Kelly, J. et Dai, Q., 2021. *Chaîne d'approvisionnement en batteries lithium-ion pour les véhicules électriques aux États-Unis : 2010-2020* (n° ANL/ESD-21/3). Argonne National Lab. (ANL), Argonne, IL (États-Unis).

[Retour à la référence33](#)

Référence 34

[Tesla construira le Model Y à Austin avec des cellules 4680 et 2170.](#)

[Retour à la référence34](#)

Référence 35

[Une société indépendante confirme les performances des cellules Farasis Energy - Farasis Energy.](#)

[Retour à la référence35](#)

Référence 36

[NCM 712 de LG Chem : les cellules de batterie E66A et E78 en détail - Articles - PushEVs.](#)

[Retour à la référence36](#)

Référence 37

[BMW i3 - Conception de la batterie.](#)

[Retour à la référence37](#)

Référence 38

[BMW i3 120 Ah \(2018-2022\) : prix et spécifications - Base de données EV.](#)

[Retour à la référence38](#)

Référence 39

Zhao, L., Zhang, T., Li, W., Li, T., Zhang, L., Zhang, X. et Wang, Z., 2023. Ingénierie des batteries sodium-ion : opportunités et défis. *Engineering*, 24, pp.172-183.

[Retour à la référence39](#)

Référence 40

[Quelles batteries Tesla utilise-t-elle dans ses voitures électriques ?.](#)

[Retour à la référence40](#)

Référence 41

Ank, M., Sommer, A., Gamra, K.A., Schöberl, J., Leeb, M., Schachtl, J., Streidel, N., Stock, S., Schreiber, M., Bilfinger, P. et Allgäuer, C., 2023. Les cellules lithium-ion dans les applications automobiles : démontage et caractérisation de la cellule cylindrique Tesla 4680. *Journal of The Electrochemical Society*, 170(12), p.120536.

[Retour à la référence41](#)

Référence 42

« The Battery Report 2024 ». *Fondation Volta*, janvier 2025. Web. (Consulté le 24 mars 2025).

[Retour à la référence42](#)

Référence 43

Link, S., Neef, C., Wicke, T., Hettesheimer, T., Diehl, M., Krätzig, O., Degen, F., Klein, F., Fanz, P., Burgard, M. et Kleinert, R., 2022. Institut Fraunhofer. Perspectives de développement pour les formats de cellules de batteries lithium-ion.

[Retour à la référence43](#)

Référence 44

[Spécifications et caractéristiques de la BMW Série 5 Plug-in Hybrid 530e iPerformance 2019 d'occasion | Edmunds.](#)

[Retour à la référence44](#)

Référence 45

[Spécifications et caractéristiques de la BMW i3 Base 2019 d'occasion | Edmunds.](#)

[Retour à la référence45](#)

Référence 46

[Prix et spécifications de la Toyota Camry Hybrid LE 2019 - The Car Guide.](#)

[Retour à la référence46](#)

Référence 47

[Nouveaux modèles hybrides rechargeables et batteries haute tension perfectionnées : BMW poursuit résolument sa stratégie d'électrification.](#)

[Retour à la référence47](#)

Référence 48

[BMW i3 120 Ah \(2018-2022\) prix et spécifications - EV Database.](#)

[Retour à la référence48](#)

Référence 49

[F1/Motorsport-Wanxiang A123 Systems Corp.](#)

[Retour à la référence49](#)

Référence 50

Lam, V.N., Cui, X., Stroebl, F., Uppaluri, M., Onori, S. et Chueh, W.C., 2025. Une décennie d'enseignements : analyse approfondie des tendances et des implications du vieillissement calendaire. *Joule*, 9(1).

[Retour à la référence50](#)

Référence 51

Wassiliadis, N., Steinsträter, M., Schreiber, M., Rosner, P., Nicoletti, L., Schmid, F., Ank, M., Teichert, O., Wildfeuer, L., Schneider, J. et Koch, A., 2022. Quantification de l'état de l'art des groupes motopropulseurs électriques dans les véhicules électriques à batterie : autonomie, efficacité et durée de vie, du composant au système, sur le modèle Volkswagen ID. 3. *Etransportation*, 12, p.100167.

[Retour à la référence51](#)

Référence 52

Preger, Y., Barkholtz, H.M., Fresquez, A., Campbell, D.L., Juba, B.W., Romàn-Kustas, J., Ferreira, S.R. et Chalamala, B., 2020. Dégradation des cellules lithium-ion commerciales en fonction de leur composition chimique et des conditions de cyclage. *Journal of The Electrochemical Society*, 167(12), p.120532.

[Retour à la référence52](#)

Référence 53

[Fiche technique du produit Molicel Lithium-ion Rechargeable Battery : Modèle INR-21700-P45B \(PDF, 373 Ko\).](#)

[Retour à la référence53](#)

Référence 54

[Dahn dévoile une batterie capable de parcourir un million de kilomètres dans un article révolutionnaire - ECS.](#)

[Retour à la référence54](#)

Référence 55

Harlow, J.E., Ma, X., Li, J., Logan, E., Liu, Y., Zhang, N., Ma, L., Glazier, S.L., Cormier, M.M., Genovese, M. et Buteau, S., 2019. Une large gamme de résultats d'essais sur une excellente chimie des cellules lithium-ion qui servira de référence pour les nouvelles technologies de batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 166(13), p.A3031.

[Retour à la référence55](#)

Référence 56

La Chine prend les devants en matière de sécurité des batteries pour véhicules électriques avec la nouvelle norme GB38031-2025 - Green Car Congress. <https://www.greencarcongress.com/2025/04/20250418-china.html>

[Retour à la référence56](#)

Référence 57

[Le prix du sulfate de nickel augmente de plus de 10 % dans un contexte de tension sur le marché et de croissance de la demande de batteries \(2021\) Benchmark Source](#) (consulté le 18 mars 2025).

[Retour à la référence57](#)

Référence 58

[Faits sur le lithium \(2025\)](#) (consulté le 18 mars 2025).

[Retour à la référence58](#)

Référence 59

Bajolle, H., Lagadic, M. et Louvet, N., 2022. L'avenir des batteries lithium-ion : exploration des conceptions des experts, des tendances du marché et des scénarios de prix. *Energy Research & Social Science*, 93, p.102850.

[Retour à la référence59](#)

Référence 60

Yao, A., Benson, S.M. et Chueh, W.C., 2025. Évaluation critique des feuilles de route et des scénarios de la technologie sodium-ion en matière de compétitivité technico-économique par rapport aux batteries lithium-ion. *Nature Energy*, pp.1-13.

[Retour à la référence60](#)

Référence 61

Xu, C., Steubing, B., Hu, M., Harpprecht, C., van der Meide, M. et Tukker, A., 2022. Émissions futures de gaz à effet de serre liées à la production de cellules de batteries lithium-ion pour automobiles. *Resources, Conservation and Recycling*, 187, p.106606.

[Retour à la référence61](#)

Référence 62

Winjobi, O., Kelly, J.C. et Dai, Q., 2022. Analyse du cycle de vie, par région du monde, des batteries lithium-ion nickel-manganèse-cobalt pour automobiles à teneur variable en nickel. *Sustainable Materials and Technologies*, 32, p.e00415.

[Retour à la référence62](#)

Référence 63

Xu, C., Steubing, B., Hu, M., Harpprecht, C., van der Meide, M. et Tukker, A., 2022. Émissions futures de gaz à effet de serre liées à la production de cellules de batteries lithium-ion pour automobiles. *Ressources, conservation et recyclage*, 187, p.106606.

[Retour à la référence63](#)

Référence 64

Environnement et Changement climatique Canada (2019). *Rapport d'inventaire national : sources et puits de gaz à effet de serre au Canada*.

[Retour à la référence64](#)

Référence 65

Zhu, B., Wang, X., Yao, P., Li, J. et Zhu, J., 2019. Vers des anodes de batteries au lithium à haute densité énergétique : silicium et lithium. *Science chimique*, 10(30), pp.7132-7148.

[Retour à la référence65](#)

Référence 66

Cunningham, B. (2023). « [BAT343 : Silicon and Intermetallic Anode Portfolio Strategy Overview](#) » [Présentation PowerPoint]. *Vehicle Technologies Office, Department of Energy* (consulté le 16 avril 2025).

[Retour à la référence66](#)

Référence 67

Institut Fraunhofer pour la recherche sur les systèmes et l'innovation (2022). *Feuille de route pour les batteries à semi-conducteurs 2035+*.

[Retour à la référence67](#)

Référence 68

Booth, S.G., Nedoma, A.J., Anthonisamy, N.N., Baker, P.J., Boston, R., Bronstein, H., Clarke, S.J., Cussen, E.J., Daramalla, V., De Volder, M. et Dutton, S.E., 2021. Perspectives pour les matériaux cathodiques de la prochaine génération de batteries lithium-ion. *Apl Materials*, 9(10).

[Retour à la référence68](#)

Référence 69

Jiang, M., Danilov, D.L., Eichel, R.A. et Notten, P.H., 2021. Examen des mécanismes de dégradation et des avancées récentes concernant les batteries lithium-ion à cathode riche en nickel. *Advanced Energy Materials*, 11(48), p.2103005.

[Retour à la référence69](#)

Référence 70

Zheng, J., Myeong, S., Cho, W., Yan, P., Xiao, J., Wang, C., Cho, J. et Zhang, J.G., 2017. Matériaux cathodiques riches en Li et Mn : défis pour la commercialisation. *Advanced Energy Materials*, 7(6), p.1601284.

[Retour à la référence70](#)

Référence 71

Chen, D., Ahn, J. et Chen, G., 2021. An overview of cation-disordered lithium-excess rocksalt cathodes. *ACS Energy Letters*, 6(4), pp.1358-1376.

[Retour à la référence71](#)

Référence 72

Manthiram, A., Chung, S.H. et Zu, C., 2015. Batteries lithium-soufre : progrès et perspectives. *Advanced materials*, 27(12), pp.1980-2006.

[Retour à la référence72](#)

Référence 73

Tolmachev, Y.V., 2023. Les batteries à flux de 1879 à 2022 et au-delà. *Journal of The Electrochemical Society*, 170(3), p.030505.

[Retour à la référence73](#)

Référence 74

Poli, N., Bonaldo, C., Moretto, M. et Guarnieri, M., 2024. Évaluation technico-économique des futures batteries à flux de vanadium sur la base de paramètres réels des dispositifs/du marché. *Applied Energy*, 362, p.122954.

[Retour à la référence74](#)

Référence 75

Dunn, B., Kamath, H. et Tarascon, J.M., 2011. Stockage d'énergie électrique pour le réseau : une batterie de choix. *Science*, 334(6058), pp.928-935.

[Retour à la référence75](#)

Référence 76

Yao, Y., Lei, J., Shi, Y., Ai, F. et Lu, Y.C., 2021. Méthodes d'évaluation et indicateurs de performance pour les batteries à flux redox. *Nature Energy*, 6(6), pp.582-588.

[Retour à la référence76](#)

Référence 77

Tang, F., Yang, Y., Liu, C., Yang, S., Xu, S., Yao, Y., Yang, H., Yang, Y., He, S., Pan, H. et Rui, X., 2025. Batterie au sodium métal initialement sans anode grâce à un substrat en aluminium monocristallin à orientation préférentielle (100) obtenu par ingénierie de contrainte. *Nature Communications*, 16(1), p.2280.

[Retour à la référence77](#)

Référence 78

Institut Fraunhofer pour la recherche sur les systèmes et l'innovation (2023). *Feuille de route pour les technologies alternatives de batteries 2030+*.

[Retour à la référence78](#)

Référence 79

Winter, M. et Brodd, R.J., 2004. Que sont les batteries, les piles à combustible et les supercondensateurs ? *Chemical reviews*, 104(10), pp.4245-4270.

[Retour à la référence79](#)

Référence 80

Tsurumaki, A., Brutti, S., Greco, G. et Navarra, M.A., 2024. Systèmes de batteries fermés. Technologies émergentes pour les batteries afin de stimuler la transition vers une énergie propre, p.173.

[Retour à la référence80](#)

Référence 81

Diéz, E.S., Poli, F. et Soavi, F., 2024. Systèmes de batteries ouverts. Dans Technologies émergentes de batteries pour accélérer la transition vers une énergie propre : analyse des coûts, de la durabilité et des performances (pp. 213-222). Cham : Springer International Publishing.

[Retour à la référence81](#)

Référence 82

81 Stallard, J.C., Wheatcroft, L., Booth, S.G., Boston, R., Corr, S.A., De Volder, M.F., Inkson, B.J. et Fleck, N.A., 2022. Propriétés mécaniques des matériaux cathodiques pour les batteries lithium-ion. *Joule*, 6(5), pp.984-1007.

[Retour à la référence82](#)

Référence 83

82 Li, A., Yuen, A.C.Y., Wang, W., De Cachinho Cordeiro, I.M., Wang, C., Chen, T.B.Y., Zhang, J., Chan, Q.N. et Yeoh, G.H., 2021. Étude des séparateurs pour batteries lithium-ion en vue d'améliorer les performances de sécurité et les approches de modélisation. *Molecules*, 26(2), p.478.

[Retour à la référence83](#)

Référence 84

Li, A., Yuen, A.C.Y., Wang, W., De Cachinho Cordeiro, I.M., Wang, C., Chen, T.B.Y., Zhang, J., Chan, Q.N. et Yeoh, G.H., 2021. Une revue des séparateurs de batteries lithium-ion pour améliorer les performances de sécurité et les approches de modélisation. *Molecules*, 26(2), p.478.

[Retour à la référence84](#)

Référence 85

Orendorff, C.J., 2012. Le rôle des séparateurs dans la sécurité des cellules lithium-ion. *The Electrochemical society interface*, 21(2), p.61.

[Retour à la référence85](#)

Référence 86

Janek, J. et Zeier, W.G., 2016. Un avenir solide pour le développement des batteries. *Nature energy*, 1(9), pp.1-4.

[Retour à la référence86](#)

Référence 87

Zhu, P., Gastol, D., Marshall, J., Sommerville, R., Goodship, V. et Kendrick, E., 2021. Une revue des collecteurs de courant pour les batteries lithium-ion. *Journal of Power Sources*, 485, p.229321.

[Retour à la référence87](#)

Référence 88

Srivastava, M., MR, A.K. et Zaghib, K., 2024. Liants pour les technologies de batteries Li-Ion et au-delà : une revue complète. *Batteries*, 10(8), p.268.

[Retour à la référence88](#)

Référence 89

Xu, K., Ding, S.P. et Jow, T.R., 1999. Vers des valeurs fiables des limites de stabilité électrochimique des électrolytes. *Journal of The Electrochemical Society*, 146(11), p.4172.

[Retour à la référence89](#)

Référence 90

Guo, R., Lu, L., Ouyang, M. et Feng, X., 2016. Mécanisme de l'ensemble du processus de surcharge et du court-circuit interne induit par la surcharge dans les batteries lithium-ion. *Rapports scientifiques*, 6(1), p.30248.

[Retour à la référence90](#)

Référence 91

Abdellahi, A., Atalay, S. et Rajan, A., 2021. Impact de la variabilité des cellules sur les statistiques des packs pour différents segments de véhicules. *Journal of Power Sources*, 508, p.230246.

[Retour à la référence91](#)

Référence 92

[Efficacité des batteries dans le monde en 2023](#) | Statista.

[Retour à la référence92](#)

Référence 93

Nölle, R., Beltrop, K., Holtstiege, F., Kasnatscheew, J., Placke, T. et Winter, M., 2020. Une mise au point et un tutoriel sur la caractérisation électrochimique des matériaux des cellules de batterie : comment choisir la configuration de cellule appropriée. *Materials Today*, 32, pp.131-146.

[Retour à la référence93](#)

Référence 94

Löbberding, H., Wessel, S., Offermanns, C., Kehrer, M., Rother, J., Heimes, H. et Kampker, A., 2020. De la cellule au système de batterie dans les véhicules électriques à batterie (BEV) : analyse de l'efficacité de l'emballage du système et des types de cellules. *World Electric Vehicle Journal*, 11(4), p.77.

[Retour à la référence94](#)

Référence 95

[Why batteries come in many different shapes and sizes](#)

[Retour à la référence95](#)

Référence 96

Garayt, M.D., Johnson, M.B., Laidlaw, L., McArthur, M.A., Trussler, S., Harlow, J.E., Dahn, J.R. et Yang, C., 2023. Guide pour la fabrication de cellules souples à couche unique Li-ion hautement reproductibles pour les chercheurs universitaires. *Journal of The Electrochemical Society*, 170(8), p.080516.

[Retour à la référence96](#)

Référence 97

[Batteries rechargeables haute capacité LI-ION RJD - CDE / Illinois Capacitor | Mouser.](#)

[Retour à la référence97](#)

Référence 98

[Batterie LiFePO4 en poche CATL M1C24A 3,2 V 100 Ah - Batterie LiFePO4.](#)

[Retour à la référence98](#)

Référence 99

[GRP451927G1 Batterie rechargeable Li-ion quadrilatérale | Grepow.](#)

[Retour à la référence99](#)

Référence 100

[Cellule ESS Hithium 1175 Ah. Produits-Hithium.](#)

[Retour à la référence100](#)

Référence 101

Frith, J.T., Lacey, M.J. et Ulissi, U., 2023. Une perspective non académique sur l'avenir des batteries au lithium. *Nature communications*, 14(1), p.420.

[Retour à la référence101](#)

Référence 102

Masias, A., Marcicki, J. et Paxton, W.A., 2021. Opportunités et défis des batteries lithium-ion dans les applications automobiles. *ACS energy letters*, 6(2), pp.621-630.

[Retour à la référence102](#)

Référence 103

Hu, X., Xu, L., Lin, X. et Pecht, M., 2020. Pronostic de la durée de vie des batteries. *Joule*, 4(2), pp.310-346.

[Retour à la référence103](#)

Référence 104

Geslin, A., Xu, L., Ganapathi, D., Moy, K., Chueh, W.C. et Onori, S., 2024. Le cyclage dynamique améliore la durée de vie des batteries. *Nature Energy*, pp.1-9.

[Retour à la référence104](#)

Référence 105

Doughty, D.H. et Roth, E.P., 2012. Discussion générale sur la sécurité des batteries lithium-ion. *The Electrochemical Society Interface*, 21(2), p.37.

[Retour à la référence105](#)

Référence 106

Doughty, D.H., 2012. Guide pour la sécurité des batteries automobiles (n° NREL/SR-5400-54404). Laboratoire national des énergies renouvelables (NREL), Golden, CO (États-Unis).

[Retour à la référence106](#)

Référence 107

« The Battery Report 2024 ». *Fondation Volta*, janvier 2025. Web. (Consulté le 24 mars 2025).

[Retour à la référence107](#)

Référence 108

Zak, D., Hupfer, M., Cabezas, A., Jurasinski, G., Audet, J., Kleeberg, A., McInnes, R., Kristiansen, S.M., Petersen, R.J., Liu, H. et Goldhammer, T., 2021. Le sulfate dans les écosystèmes d'eau douce : examen des sources, des cycles biogéochimiques, des effets écotoxicologiques et de la bioremédiation. *Earth-Science Reviews*, 212, p.103446.

[Retour à la référence108](#)

Référence 109

Dai, Q., Kelly, J.C., Gaines, L. et Wang, M., 2019. Analyse du cycle de vie des batteries lithium-ion pour applications automobiles. *Batteries*, 5(2), p.48.

[Retour à la référence109](#)

Référence 110

[Le tétraèdre malheureux. Toutes les batteries sont un compromis entre... | par Dan Steingart | le tétraèdre malheureux | Medium.](#)

[Retour à la référence110](#)

Référence 111

Catenaro, E., Rizzo, D.M. et Onori, S., 2021. Analyse expérimentale et modélisation analytique du graphique Ragone amélioré. *Applied Energy*, 291, p.116473.

[Retour à la référence111](#)

Référence 112

Schmidt O, Staffell I. Monetizing energy storage: A toolkit to assess future cost and value. Oxford University Press; 13 mars 2024.

[Retour à la référence112](#)

Référence 113

Zu, C., Ren, Y., Guo, F., Yu, H. et Li, H., 2021. Une réflexion sur les batteries lithium-ion du point de vue des ressources en lithium. *Advanced Energy and Sustainability Research*, 2(10), p.2100062.

[Retour à la référence113](#)

Référence 114

[Données, modèle et rapport sur la batterie BYD Blade C102F.](#)

[Retour à la référence114](#)

Référence 115

Yang, X.G., Liu, T. et Wang, C.Y., 2021. Batteries au lithium fer phosphate à modulation thermique pour les véhicules électriques grand public. *Nature Energy*, 6(2), pp.176-185.

[Retour à la référence115](#)

Référence 116

[BYD DOLPHIN 44,9 kWh Active \(2023-2025\) prix et spécifications - Base de données EV.](#)

[Retour à la référence116](#)

Référence 117

[Batteries of the BYD Dolphin in detail - Posts - PushEVs.](#)

[Retour à la référence117](#)

Référence 118

[Conseil européen pour la recherche et le développement dans le domaine automobile \(2019\). Exigences relatives aux batteries pour les applications automobiles futures](#) (consulté le 15 mai 2025).

[Retour à la référence118](#)

Référence 119

Consortium américain pour les batteries avancées. [Objectifs en matière de véhicules électriques à faible coût et à recharge rapide](#) (consulté le 15 mai 2025).

[Retour à la référence119](#)

Référence 120

Consortium américain pour les batteries avancées. [Objectifs pour les batteries avancées à haute performance destinées aux véhicules électriques \(VE\)](#) (consulté le 15 mai 2025).

[Retour à la référence120](#)

Référence 121

[Batteries Europe \(2025\). KPIs Benchmarking III, février 2025.](#) (consulté le 15 mai 2025).

[Retour à la référence121](#)

Référence 122

Fraunhofer ISI (2022). *Feuille de route pour les batteries à semi-conducteurs 2035+.*

[Retour à la référence122](#)

Référence 123

Fraunhofer ISI (2023). *Feuille de route pour les technologies alternatives de batteries 2030+.*

[Retour à la référence123](#)

Notes de bas de page**Note de bas de page a**

L'Alberta et Terre-Neuve-et-Labrador ne communiquent pas leurs chiffres de vente et ne sont donc pas représentés dans les données.

[Retour à la référence de la note de bas de pagea](#)

Note de bas de page b

Il convient de noter que le cadre « *Anatomie d'une batterie* » donne un aperçu général du principe de fonctionnement d'une batterie et définit les principales caractéristiques qui contribuent à son profil

de performance. **L'appendice A** offre des définitions des principales caractéristiques des batteries et fournit une compréhension commune du potentiel de performance des batteries.

[Retour à la référence de la note de bas de pageb](#)

Note de bas de page c

La régression linéaire produit une valeur r-carré supérieure à 0,95.

[Retour à la référence de la note de bas de pagec](#)

Note de bas de page d

1718L a cellule LG Chem E78 est une cellule plus grande qui présente la même composition chimique et une densité énergétique similaire à celle de la cellule LG Chem E66A répertoriée dans le tableau 1 illustrée dans les Figures 16, 17 et 18.

[Retour à la référence de la note de bas de paged](#)

Note de bas de page e

Basé sur la fusion de plusieurs études et objectifs présentés à l'appendice C.

[Retour à la référence de la note de bas de pagee](#)

Note de bas de page f

Les coûts sont exprimés en dollars canadiens, convertis à partir du dollar américain au taux de change de 1,35.

[Retour à la référence de la note de bas de pagef](#)

