



Rapport

Étude sur l'efficacité énergétique de la chaîne de valeur de la filière batterie au Québec

Avec le soutien financier de



Présenté à

Escouade énergie – regroupement des CCTT en énergie

Tél. : 418 653-6763

Courriel : info@reseauccctt.ca

Par

Arafat Fousseni, CPI, M. Sc. A., Chercheur

Centre de recherche et d'innovation en intelligence énergétique CR2ie

Courriel : arafat.fousseni@cr2ie.com

Téléphone : 418-962-9848, poste 340

Cellulaire : 581-447-6268

Et

Khaled Ziane, CPI, Ph.D, Gestionnaire R&D et Opérations

Centre de recherche et d'innovation en intelligence énergétique CR2ie

Courriel : khaled.ziane@cr2ie.com

Téléphone : 418-962-9848, poste 340

Cellulaire : 418-732-7232

Date: 30 juin 2025

À propos de l'Institut technologique de maintenance industriel (ITMI) et le Centre de recherche et d'innovation en intelligence énergétique (CR2ie)

L'Institut technologique de maintenance industrielle (ITMI), affilié au Cégep de Sept-Îles, est un Centre collégial de transfert de technologie (CCTT) spécialisé dans la maintenance industrielle et l'intégration des technologies numériques 4.0. Véritable catalyseur d'innovation, l'ITMI accompagne les entreprises québécoises, en particulier celles du secteur industriel dans l'optimisation de leurs procédés et l'amélioration de leur efficacité opérationnelle.

L'institut offre une gamme complète de services, incluant la recherche appliquée, le soutien technique, les audits numériques et la formation. Son expertise s'étend à des domaines stratégiques comme la maintenance prédictive et la fiabilité industrielle.

Le centre de recherche et d'innovation en intelligence énergétique (CR2ie) est une unité de recherche affiliée au Cégep de Sept-Îles qui œuvre dans le secteur énergétique et qui travaille en synergie avec les autres unités du Cégep notamment l'ITMI et le centre d'expertise ferroviaire RAIL.

La structure et le portfolio des services du CR2ie s'appuient sur 5 axes d'intervention : les réseaux intelligents ou smart-grids, les microréseaux connectés et systèmes électriques industriels, les bâtiments intelligents ou « smart buildings », l'efficacité énergétique industrielle, et la sécurité informatique des réseaux électriques et des systèmes énergétiques. Ces axes permettent au CR2ie d'appuyer efficacement le développement et le déploiement des solutions énergétiques avancées et intelligentes tout en satisfaisant à des normes élevées.

Le CR2ie propose des services en aide technique, en recherche et développement, en formation et en veille technologique. Les projets peuvent être complètement pris en charge par le CR2ie et s'échelonner à court, moyen et long terme.

Remerciements

L'Institut technologique de maintenance industrielle (ITMI) et le Centre de recherche et d'innovation en intelligence énergétique (CR2ie) tiennent à remercier l'Escouade énergie, la Caisse Desjardins de l'Énergie et des Ressources naturelles pour leur soutien financier, de même que l'Association de l'industrie électrique du Québec (AIEQ) pour son appui dans l'organisation de l'atelier sur l'efficacité énergétique de la filière des batteries, tenu dans le cadre du Sommet sur les batteries du futur et de l'hydrogène vert à Shawinigan en 2024.

Nous remercions également l'ensemble des collaborateurs et intervenants qui ont généreusement partagé leur expertise et leur temps précieux. Votre engagement reflète l'esprit de collaboration et d'innovation qui a porté ce projet du début à la fin.

Ce rapport témoigne des résultats de nos efforts conjoints et ouvre la voie à de nouvelles opportunités de collaboration pour l'avenir.

Table des matières

À propos de l'Institut technologique de maintenance industriel (ITMI) et le Centre de recherche et d'innovation en intelligence énergétique (CR2ie)	2
Remerciements	3
Introduction	6
1. Contexte de l'énergie électrique au Québec	12
2. Chaîne de valeur de la filière batterie.....	16
2.1. Disponibilité des ressources, extraction et traitement des minéraux critiques et stratégiques (MCS).....	17
2.1.1. Disponibilité des minéraux critiques et stratégiques (MCS).....	17
2.1.2. Exploitation des minéraux critiques stratégiques (MCS).....	19
2.2. Fabrication des cellules de batterie	20
2.2.1. Les étapes de fabrication d'une batterie	20
2.2.2. Coût de fabrication des batteries et consommation énergétique	22
2.3. Reconditionnement et recyclage des batteries usagées.....	25
2.3.1. Reconditionnement et utilisation en seconde vie	25
2.3.2. Recyclage des batteries et extraction des métaux critiques	25
3. État actuel de l'efficacité énergétique dans la filière de batterie.....	28
3.1. Les parties prenantes et les fonds disponibles pour les projets dans la filière batterie .	28
3.2. La gestion de pointe de puissance	31
3.3. Portrait des enjeux de la filière batterie au Québec	32
3.4. Intérêts des promoteurs à travailler sur la question d'efficacité énergétique dans la filière batterie	35
3.5. Initiatives d'efficacité énergétique en cours et identification des projets potentiels....	35
4. Solutions et recommandations.....	37
4.1. L'optimisation des processus industriels.....	37

4.2.	La stabilisation des procédés et la planification autour de la pointe.....	37
4.3.	L'autoproduction d'énergie.....	38
	Conclusion.....	40
	Annexe 1 : Valorisation des MCS au Québec : Gîtes, projets de mise en valeur et mines [12].....	45
	Annexe 2 : Coût, débit et consommation d'énergie des procédés de fabrication d'une cellule Lithium-ion.....	47

Introduction

Les émissions des gaz à effet de serre (GES) en 2022 au Canada s'élèvent à 708 mégatonnes équivalents de CO₂ (Mt eq.CO₂) et sont inégalement réparties d'une province à une autre tel qu'illustré à la figure 1. L'Alberta (270 Mt eq.CO₂), l'Ontario (157 Mt eq.CO₂) et le Québec (79 Mt eq.CO₂), représentent à elles seules plus de 71% des émissions d'après le Rapport d'inventaire national 1990 – 2022 des sources et puits de GES au Canada [1].

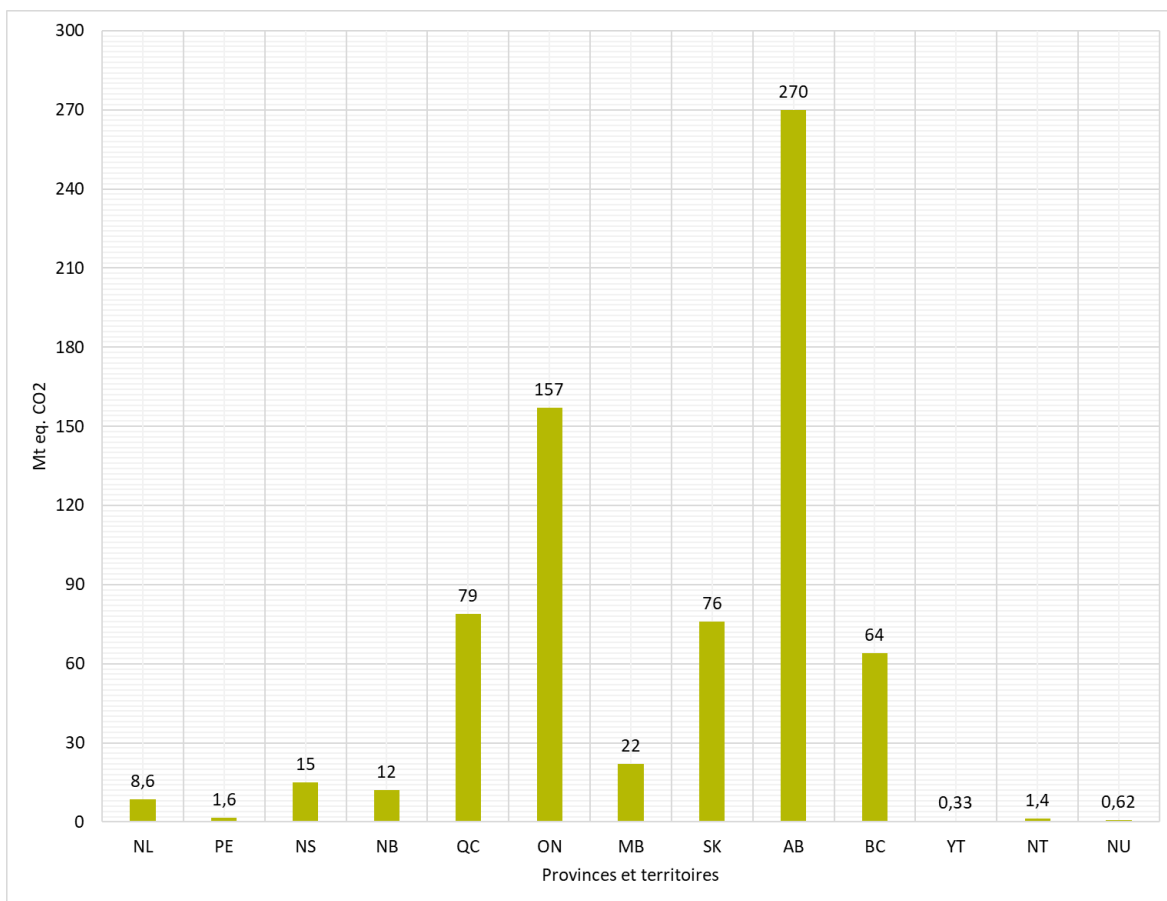


Figure 1 : Émissions de GES par province en 2022

Cette répartition inégale des émissions de gaz à effet de serre (GES) s'explique principalement par le niveau de développement des différents secteurs d'activité. En effet, à l'échelle fédérale, les industries du pétrole et du transport représentent à elles seules plus de 53 % des émissions. L'agriculture, l'industrie lourde et le secteur du bâtiment contribuent chacun pour environ 10 %. La

production d'électricité, quant à elle, est responsable d'environ 7 % des émissions totales.

Au Québec, le secteur des transports a contribué à hauteur de 43% aux 79 Mt eq. CO₂ d'émissions recensées en 2022, avec une prédominance marquée du transport routier. Les figure 2 et figure 3, dont les données proviennent du rapport d'inventaire national 1990 – 2022 des sources et puits de GES au Canada [1], ainsi que du ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP) du Québec [2] illustrent clairement la répartition des émissions de GES des différents secteurs économiques.

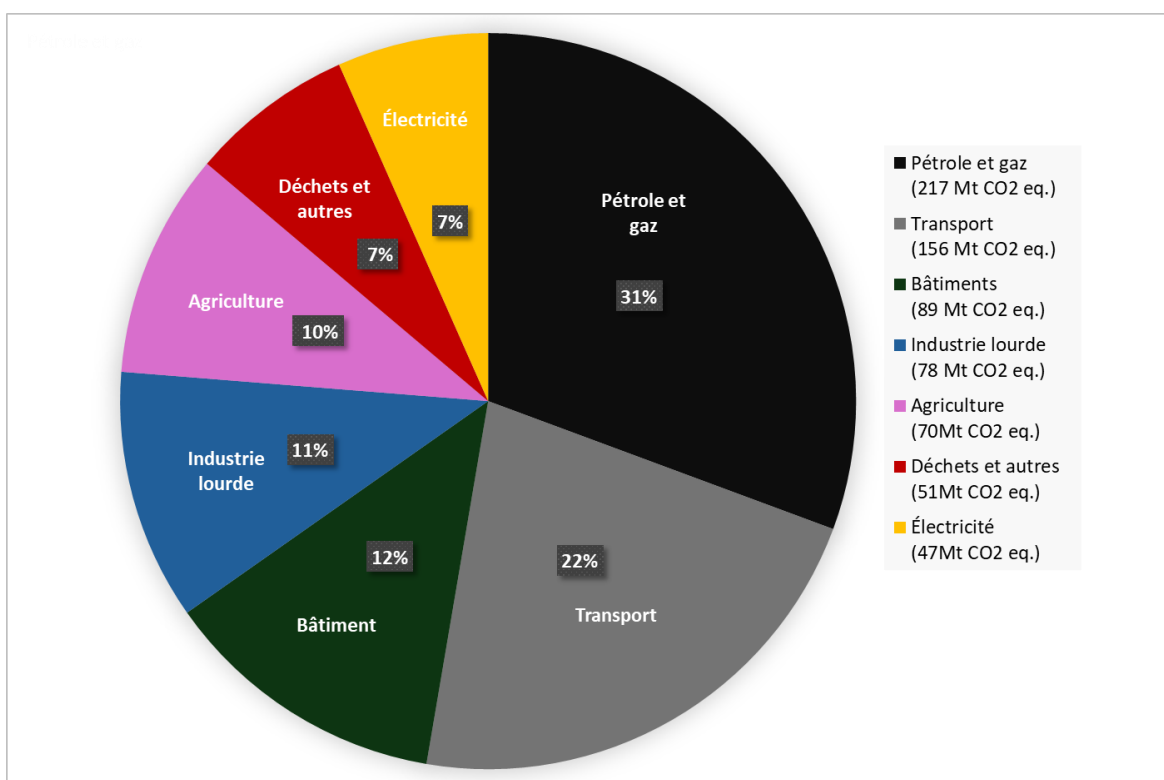


Figure 2 : Répartition des émissions de GES par secteur économique en 2022 au Canada

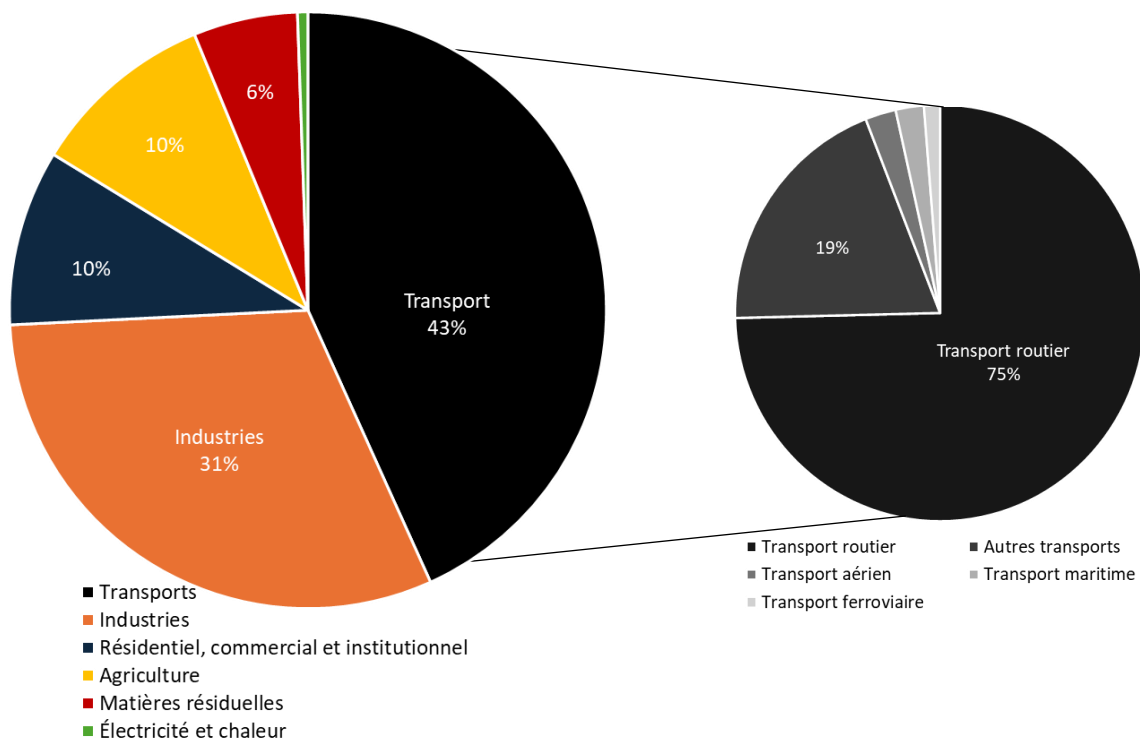


Figure 3 : Répartition des émissions de GES par secteur économique en 2022 au Québec

Pour atteindre l'objectif principal de l'accord de Paris, les projets favorisant la transition énergétique sont de plus en plus encouragés. Le développement de la filière batterie constitue un des projets phares pour cette transition. Cette filière est indispensable pour trois raisons fondamentales décrites ci-dessous :

- 1- Stabilité et fiabilité du réseau électrique** : Compte tenu des conditions météorologiques de plus en plus variables, la production d'électricité d'origine renouvelable connaît des fluctuations horaires et saisonnières, ce qui impacte le réseau électrique et sa capacité à répondre à une demande croissante. Pour corriger ce problème, un système de stockage d'énergie à batteries est souvent utilisé. Ces batteries ont pour rôle de maintenir la stabilité de la tension ou de la fréquence du réseau électrique, de fournir de l'énergie à court terme pendant les périodes de pointe de puissance ou de satisfaire totalement la demande d'énergie lorsque la source d'énergie principale n'est pas disponible [3]. C'est l'exemple des systèmes hybrides (solaire, éolien et stockage) dans lequel les batteries prennent le relais pendant la nuit et lorsqu'il n'y a pas assez de vent.

2- Compensation des émissions de GES des véhicules à moteur thermiques et celles issues de la production d'électricité à partir des combustibles fossiles: D'une part, les gaz à effet de serre (GES) émis par les moteurs thermiques des véhicules peuvent être considérablement réduits grâce à l'adoption croissante des véhicules électriques (VE), dont les batteries assurent la propulsion. Soutenue par diverses politiques incitatives gouvernementales, cette transition énergétique suscite un engouement mondial. En 2023, 14 millions de VE ont été immatriculés à l'échelle planétaire, portant leur nombre total à 40 millions [4]. Au Québec, un total de 387 101 VE ont été immatriculés d'après les données de l'Association des Véhicules électrique du Québec (AVÉQ) en date du 31 mars 2025 [5].

D'autre part, les batteries peuvent remplacer les groupes diesel dans les micro-réseaux. Cette substitution permet non seulement de réduire le bruit et les vibrations associés aux groupes diesel, mais contribue également à la réalisation d'au moins un objectif de développement durable (ODD) des Nations Unies, en l'occurrence l'Objectif 7 : garantir l'accès à une énergie propre, fiable et à un coût abordable. Elle participe aussi activement à la lutte contre les changements climatiques, en réduisant les émissions de gaz à effet de serre.

3- Raisons socio-économiques : à la fin de leur première vie, le recyclage ou le reconditionnement des batteries permet de réduire les coûts de fabrication tout en contribuant à la diminution de leur empreinte carbone.

Au Québec, la filière batterie occupe une place centrale dans la stratégie de transition énergétique et de décarbonation de l'économie provinciale. Avec l'objectif fixé par le gouvernement d'atteindre la carboneutralité d'ici 2050, l'électrification des transports apparaît comme un levier incontournable, d'autant plus que ce secteur est le principal émetteur de gaz à effet de serre (GES) dans la province. Pour soutenir cette transition, les infrastructures de production d'énergie renouvelable sont en pleine expansion, avec un ajout prévu de 10 000 MW de capacité éolienne et de 4 200 MW d'hydroélectricité d'ici 2035, selon le Plan d'action 2035 d'Hydro-Québec [6]. Ces projets visent à compenser les besoins additionnels en énergie, estimés entre 150 et 200 TWh d'ici 2050, nécessaires à l'électrification des transports et à la transition énergétique globale. Selon Hydro-Québec (HQ), l'électrification des véhicules au Québec pourrait réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) de 37,5 Mt éq. CO₂ d'ici 2035, soit environ 45 % des émissions actuelles du secteur des transports, qui demeure l'une des principales sources de pollution dans la province.

Cependant, pour atteindre ces objectifs ambitieux, la filière batterie fait face à d'importants défis énergétiques. La production, l'assemblage et le recyclage des batteries sont des processus très gourmands en énergie. Selon les estimations de Nano One, une entreprise active dans la filière, la production d'une seule tonne de cathodes de batteries lithium-ion peut nécessiter jusqu'à 70 MWh d'électricité. À titre comparatif, cela correspond à la consommation énergétique annuelle de près de quatre foyers québécois moyens. Cette demande énergétique élevée est également exacerbée par le fait que les installations de production de batteries et de minéraux critiques doivent opérer de manière continue et fiable pour répondre aux besoins croissants du marché des véhicules électriques (VE). Ainsi, l'implantation de projets majeurs dans le secteur de la production de batteries, essentiels pour soutenir la transition énergétique, soulève une question centrale: disposons-nous de la marge de manœuvre énergétique nécessaire pour les soutenir ?

Dans un contexte où la consommation électrique augmente de manière continue, notamment en raison de l'électrification des transports et de l'industrie, chaque nouveau projet industriel ajoute une pression supplémentaire sur le réseau. Cette marge de manœuvre peut être obtenue par deux leviers principaux : l'augmentation des capacités de production (nouvelles installations, diversification des sources, interconnexions) et, surtout, l'efficacité énergétique dans la filière batterie. Ce dernier levier, souvent sous-estimé, représente un potentiel important pour répondre à la demande croissante sans compromettre l'équilibre du réseau. Cette efficacité énergétique permet de baisser la demande énergétique, à service rendu égal, entraînant ainsi une diminution des coûts écologiques, économiques et sociaux liés à la production et à la consommation d'énergie. Ainsi, il est crucial d'intégrer les exigences de performance énergétique dès la planification de tels projets, afin qu'ils contribuent à la résilience du système énergétique plutôt qu'à son affaiblissement.

Face à ces enjeux, cette étude a pour objectif d'analyser l'efficacité énergétique de la chaîne de valeur de la filière batterie au Québec. Il s'agit d'identifier les besoins énergétiques spécifiques à la fabrication et au recyclage des batteries, en passant par l'assemblage des modules et des packs. En mettant en lumière les points de rupture dans l'utilisation de l'énergie et en proposant des solutions innovantes pour réduire la demande énergétique, cette étude vise également à explorer des options pour accroître l'autoproduction énergétique sur site, notamment à partir de sources renouvelables. Ce faisant, elle contribuerait à accélérer le déploiement de la filière batterie tout en minimisant son impact environnemental et énergétique global.

Pour atteindre les objectifs visés, cette étude s’est déroulée en trois principales phases tel que présentée sur l’organigramme de la figure 4. Lors de la première phase, une série d’études a été réalisée afin de mettre en place une banque de données relative à la chaîne de valeur de la filière batterie incluant les minéraux critiques et stratégiques (MCS), leur transformation en composantes de batterie et leur assemblage. La seconde phase a consisté en un atelier de mobilisation des parties prenantes lors du Sommet sur les batteries du futur et de l’hydrogène vert coorganisé par l’Association de l’industrie électrique du Québec (AIEQ) et le Catalyseur d’innovation pour la transition énergétique au Québec (CITEQ) le 16 mai 2024. Cet atelier a permis de mobiliser l’écosystème de la chaîne de valeur des MCS, d’identifier les opportunités et solutions, de faire du maillage entre les projets industriels, les chercheurs et les bailleurs, et de générer des projets multiples. Propulsion Québec, Hydro-Québec, Tétra Tech, HATCH, IDEA Contrôle, Schneider Electric ont également participé à cet atelier. Ce rapport constitue la dernière phase et est réalisé grâce aux notes et enregistrements effectués pendant l’atelier.

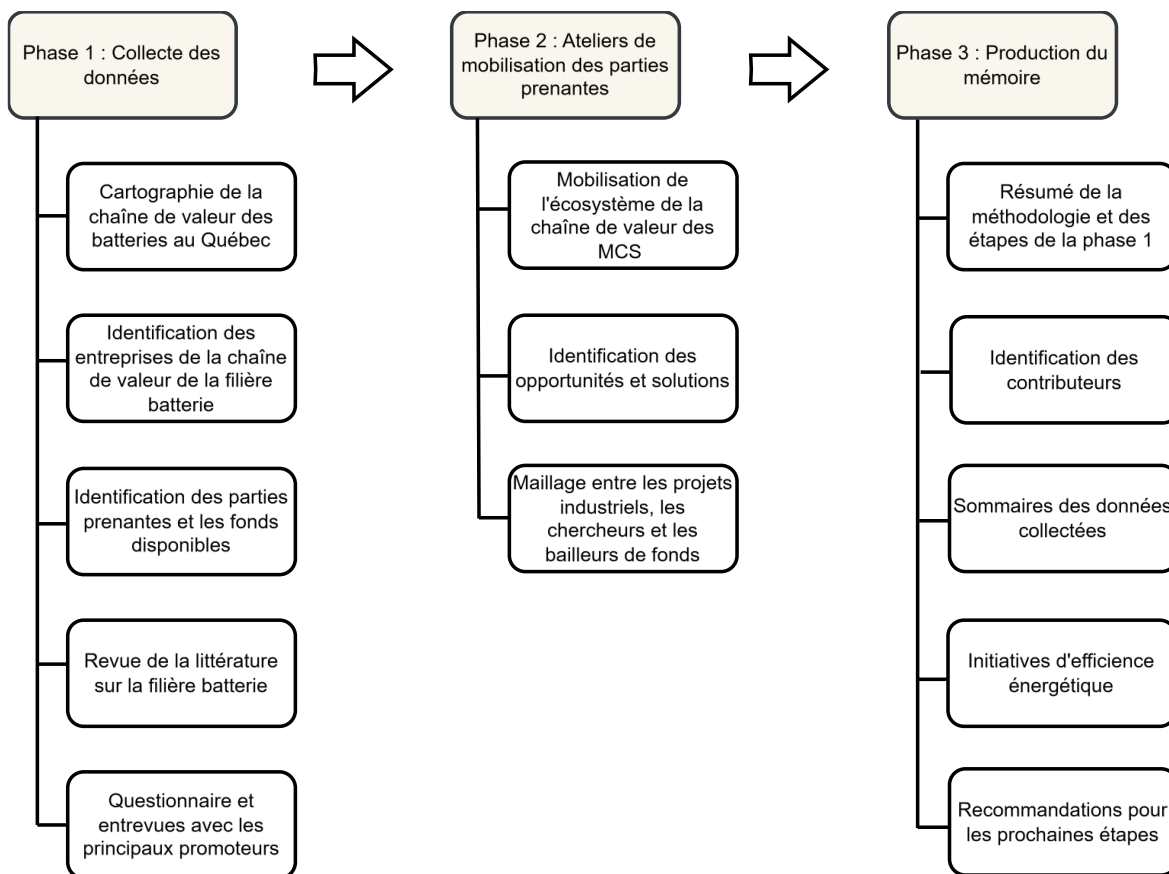


Figure 4 : Les différentes phases du projet

Dans la suite de ce rapport, le contexte énergétique du Québec est d’abord présenté, avec un récapitulatif des données de production et de consommation d’électricité. Ensuite, la chaîne de valeur de la filière batterie est décrite, abordant différents aspects tels que l’extraction minière, la fabrication des cellules et le recyclage en fin de vie. L’état de l’efficacité énergétique dans la filière batterie au Québec est ensuite analysé. Pour conclure, un ensemble de recommandations visant à améliorer cette efficacité énergétique est formulé.

1. Contexte de l’énergie électrique au Québec

La production d’électricité au Québec est d’origine diverse mais largement dominée par l’hydroélectricité (95%) avec une capacité installée de 36 933 MW par Hydro-Québec (HQ) d’après le site d’information géographique (SIG) en date de 2024. La seconde source de production d’électricité provient des éoliennes (3 336 MW) dont la plupart sont implantées dans les régions de la Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine (1 284 MW) et du Bas-Saint-Laurent (989 MW). En plus de ces deux principales sources, il existe également quelques centrales solaires, la biomasse et quelques centrales thermiques au mazout et au diesel. Ces différentes sources de production en plus de celles du privé ayant un contrat avec HQ sont à l’origine d’une production totale d’électricité estimée à 216 TWh en 2022 d’après le Rapport annuel 2022 d’HQ [7]. Par ailleurs, la consommation en énergie électrique liée au réseau d’HQ est évaluée à 180,730 TWh en 2022 avec des disparités selon le secteur d’activité et la région administrative. Les secteurs industriel et résidentiel sont les plus énergivores avec plus de 74% de la consommation. Le tableau 1 présente la consommation d’électricité par secteur et par région administrative du Québec en 2022. Il s’agit des ventes d’Hydro-Québec, ce qui exclue l’autoconsommation.

Tableau 1 : Consommation d’électricité par secteur et par région administrative en 2022 [8]

Régions	Industriel	Commercial	Institutionnel	Résidentiel	Agricole	Total
	GWh					
01 Bas-Saint-Laurent	1 797,1	727,7	289,6	1 698,2	165,0	4 677,6
02 Saguenay-Lac-Saint-Jean	3 353,2	882,5	1 030,8	2 218,8	95,8	7 581,0
03 Capitale-Nationale	6 564,3	3 277,3	860,5	6 688,8	81,4	17 472,3

Régions	Industriel	Commercial	Institutionnel	Résidentiel	Agricole	Total
	GWh					
04 Mauricie	2 101,0	889,3	261,8	2 529,3	90,6	5 872,0
05 Estrie	2 644,6	1 241,7	3 963,9	3 035,9	287,3	11 173,4
06 Montréal	3 817,5	10 285,1	2 624,2	13 747,2	15,3	30 489,3
07 Outaouais	2 365,1	1 042,3	407,6	3 324,5	52,0	7 191,4
08 Abitibi-Témiscamingue	3 277,7	515,7	270,4	1 345,6	40,5	5 449,9
09 Côte-Nord	14 655,5	526,0	434,8	813,8	4,8	16 434,9
10 Nord du Québec	736,7	211,0	282,5	321,6	0,8	1 552,7
11 Gaspésie-Îles de la Madeleine	323,6	337,3	137,8	879,2	11,4	1 689,2
12 Chaudière-Appalaches	2 046,2	1 353,1	346,0	3 787,3	413,8	7 946,4
13 Laval	379,7	1 348,6	261,5	3 500,6	10,8	5 501,2
14 Lanaudière	738,5	1 230,0	774,3	4 889,5	157,5	7 789,8
15 Laurentides	744,2	2 145,9	480,0	6 678,8	126,4	10 175,4
16 Montérégie	8 696,1	4 389,0	1 468,0	12 125,7	553,8	27 232,6
17 Centre du Québec	8 892,5	912,0	240,2	2 147,8	309,0	12 501,5
Ensemble du Québec	63 133,6	31 314,5	14 134,0	69 732,5	2 416,2	180 730,7
Part du total	35 %	17 %	8 %	39 %	1 %	100 %

Pour venir en complément des sources d'énergie intermittentes, HQ a lancé sa filiale EVLO Stockage d'énergie qui conçoit, vend et exploite des systèmes de stockage d'énergie sécuritaires et écoproductifs. Cette filiale est à l'origine de plusieurs grands projets aussi bien à l'échelle nationale qu'internationale. Ainsi, à la suite du drame ferroviaire de juillet 2013, le premier micro-réseau du Québec a vu le jour dans la ville de Lac-Mégantic. Ce micro-réseau est constitué de 1 700

panneaux solaires avec un stockage de 0,6 MWh composé de batteries de la technologie lithium-fer-phosphate (LFP). Ces batteries peuvent en cas de surproduction stocker de l'énergie qui sera après réinjectée dans le réseau principal aux heures de pointe. Les autres grands projets réalisés au Québec sont résumés dans le tableau 2.

Tableau 2 : Quelques projets d'EVLO stockage d'énergie au Québec [9]

Emplacements	Puissance installée/capacité de stockage	Année de mise en service
Kuujjuarapik	900 kW / 900 kWh	Phase 1 : 2021 Phase 2 : 2023
Institut de Recherche en Électricité du Québec (IREQ)	1 MW/2MWh	2023
Hemmingford	1,2 MW/2,4MWh	2017
Quaqtaq	600 kW / 600 kWh	2018
Bainville	120 kW / 120 kWh	2019
Gabrielle-Bodis	2 MW / 4 MWh	2021
Parent	4 MW / 20 MWh	Phase 1 : 2022 Phase 2 : 2023

Au-delà des systèmes de stockage d'énergie à batterie pour des applications stationnaires, les efforts se font également dans le secteur des transports pour réduire les émissions. En effet, en date du 31 mars 2025, un total de 387 101 véhicules électriques sont immatriculés au Québec [5]. Les véhicules entièrement électriques dominent le classement avec un taux de plus de 71% suivi des véhicules hybrides rechargeables qui représentent environ 29% des VE immatriculées. Les autobus électriques, les véhicules à basse vitesse ou encore les motoneiges représentent chacune moins de 1%. Parallèlement, l'installation de bornes de recharge progresse dans la province. Selon le gouvernement du Québec, plus de 12 550 bornes de recharge publiques étaient en service au 31 décembre 2024, dont plus de 2000 bornes de recharge rapide [10]. Le tableau 3 présente les données fournies par la Société de l'assurance automobile du Québec (SAAQ) et nettoyée par l'Association des véhicules électriques du Québec (AVÉQ).

Tableau 3 : Données corrigées¹ d'immatriculation au 31 mars 2025 [5]

Type de véhicules électriques	Nombre immatriculé
Véhicules entièrement électriques	275 191
Autres véhicules	
Autobus électriques	1 588
Motocyclettes à vitesse limitée électriques	887
Véhicules tout-terrain	824
Camions lourds ²	944
Véhicules outils	646
Motos électriques	229
Véhicules à basse vitesse	146
Motoneiges	122
Véhicules hybrides rechargeables	111 910

Actuellement, le Québec est en pleine transition énergétique, porté par son engagement à atteindre la carboneutralité d'ici 2050. Pour répondre aux besoins croissants d'une économie de plus en plus électrifiée en particulier dans les secteurs des transports et de la production de batteries, il devient nécessaire d'accroître de manière significative la capacité de production énergétique.

D'ici 2035, la province devra ajouter entre 150 et 200 TWh d'électricité, avec des projets visant à installer 10 000 MW de nouvelles capacités éoliennes et 4 200 MW supplémentaires en hydroélectricité. Ces investissements sont cruciaux pour soutenir la transition énergétique, mais ils posent également des défis majeurs en termes de planification et de disponibilité des ressources.

Une partie importante de cette demande énergétique découle directement de la production locale de batteries, secteur clé pour la décarbonation des transports. En effet, les batteries lithium-ion sont au cœur de l'électrification des véhicules et des systèmes de stockage d'énergie. Toutefois,

¹ Plusieurs corrections ont dû être faites par l'AVÉQ sur les données fournies par la SAAQ afin d'en extraire un maximum d'information.

² Est considéré comme camion lourd tout véhicule ayant un « poids du véhicule brut » (le véhicule et sa cargaison) de 4537 kg et plus.

leur production est extrêmement énergivore.

Malgré ces efforts pour accroître la production d'énergie, la filière batterie fait face à des contraintes d'approvisionnement en blocs énergétiques. En novembre 2023, l'ex-ministre de l'Économie, de l'Innovation et de l'Énergie, Pierre Fitzgibbon, a annoncé la disponibilité de 956 MW de blocs énergétiques pour des projets industriels majeurs, dont 67 % étaient destinés à la filière batterie. Cependant, plusieurs projets critiques restent en attente ou sont ralentis, en raison d'une allocation insuffisante de ces blocs. Des entreprises prometteuses, qui innovent dans le domaine des matériaux avancés pour les batteries, sont directement touchées par ces retards. Le manque d'énergie disponible entrave le développement de ces projets et, par ricochet, celui de toute la filière batterie.

Ces limitations mettent en lumière un enjeu crucial : l'optimisation de l'utilisation de l'énergie dans la filière batterie. Pour permettre son développement à grande échelle, il est impératif d'accroître l'efficacité des différentes étapes de la chaîne de valeur, de l'extraction des matériaux jusqu'à l'assemblage et au recyclage des batteries. Cette optimisation passe par l'adoption de technologies plus économes en énergie, mais aussi par une meilleure gestion de la demande énergétique. Parallèlement, le recours à l'autoproduction d'énergie renouvelable sur les sites industriels, via des systèmes solaires ou éoliens, pourrait contribuer à alléger la pression sur le réseau électrique et à garantir une alimentation énergétique stable pour les projets stratégiques.

Le contexte énergétique au Québec impose de repenser l'approvisionnement et la gestion de l'énergie pour soutenir la filière batterie. L'efficacité énergétique de la chaîne de valeur de la filière batterie devient une priorité, afin de maximiser l'impact de chaque kilowattheure utilisé et de permettre le développement des projets critiques sans être freinés par des contraintes énergétiques.

2. Chaîne de valeur de la filière batterie

La chaîne de valeur de la filière batterie au Québec comprend plusieurs étapes interdépendantes, chacune ayant des besoins énergétiques spécifiques et des défis d'optimisation. Une compréhension approfondie de ces différentes phases est cruciale pour identifier les leviers

d'efficacité énergétique et les opportunités d'amélioration. Les principales étapes de cette chaîne de valeur sont décrites dans les sous-sections ci-dessous.

2.1. Disponibilité des ressources, extraction et traitement des minéraux critiques et stratégiques (MCS)

Que ce soit pour la fabrication des différents équipements et appareils médicaux, de médicaments et d'instruments dentaires ou pour la mise au point des technologies de production et de stockage d'énergie renouvelable, les MCS sont de plus en plus présents dans notre quotidien.

La filière batterie dépend entièrement des MCS, qui constituent à la fois les matières premières essentielles et les principaux facteurs limitants de sa croissance. Leur disponibilité et leur exploitation sont déterminantes pour la réussite de la transition énergétique au Québec.

2.1.1. Disponibilité des minéraux critiques et stratégiques (MCS)

Au Canada, un minerai est considéré comme critique lorsque la chaîne d'approvisionnement est menacée et qu'il y a une chance raisonnable que le minerai soit produit par le Canada. En plus de ces deux conditions fondamentales, le minerai doit soit être essentiel à la sécurité économique du Canada, soit être requis pour la transition vers une économie durable à faibles émissions de carbone, ou encore contribuer à positionner le Canada comme un partenaire stratégique et durable au sein des chaînes d'approvisionnement mondiales. Ainsi, la disponibilité de ces minéraux critiques dans le sous-sol canadien en général, et québécois en particulier, comme l'illustre la figure 5, constitue un atout majeur, puisque ces ressources peuvent être exploitées localement et utilisées dans la fabrication de nombreuses technologies.

2.1.2. Exploitation des minéraux critiques stratégiques (MCS)

Lors de l'atelier tenu dans le cadre du Sommet sur les batteries du futur et l'hydrogène vert en 2024, il a été souligné que la fabrication des batteries repose sur l'approvisionnement en minéraux critiques tels que le lithium, le cobalt, le nickel et le graphite. L'extraction de ces ressources exige des procédés à forte intensité énergétique, ce qui pose des défis tant sur le plan environnemental que sur celui de la durabilité de la filière. Par exemple, l'extraction du lithium à partir de saumures dans les salars requiert l'évaporation d'importantes quantités d'eau, ce qui peut impliquer une énergie thermique ou électrique importante comme c'est le cas au Québec. De plus, la purification et la transformation de ces matériaux en produits utilisables pour les batteries, comme les oxydes de cobalt ou les hydroxydes de nickel, demandent des procédés chimiques complexes et énergivores.

Au Québec, même si une partie des minéraux est importée, les efforts pour extraire et transformer localement certains minéraux critiques, notamment le lithium dans le Nord-du-Québec, sont en cours de développement. Le tableau 4 présente les usines de première transformation des MCS ainsi que les projets de transformation. Les gîtes, les projets de mise en valeur et les mines pour la valorisation des MCS au Québec sont présentés à l'annexe 1. Toutefois, ces projets nécessitent des infrastructures énergétiques robustes pour répondre à la demande. Selon certaines études, la transformation du nickel ou du cobalt peut nécessiter jusqu'à 60 MWh par tonne de produit fini.

Tableau 4 : Transformation des MCS : Usines et projets [12]

MCS	Usines de première transformation
Graphite	<ul style="list-style-type: none">Immerys Graphite
Cuivre	<ul style="list-style-type: none">Fonderie Horne, Glencore CanadaAffinerie CCR, Glencore Canada
Zinc	<ul style="list-style-type: none">Zinc électrolytique du Canada, Société en commandite Revenu Noranda, Glencore Canada
Graphène	<ul style="list-style-type: none">Nanoxplore
Tellure, bismuth, antimoine, cadmium, indium, gallium, sélénium, étain, zinc	<ul style="list-style-type: none">5N +
Titane	<ul style="list-style-type: none">Rio Tinto et Titane
Ferroniobium	<ul style="list-style-type: none">Niobec, Magris Resources inc.

MCS	Projets de transformation
Lithium	<ul style="list-style-type: none"> Lithium d'Amérique du Nord*, Sayona Québec Nemaska Lithium
Graphite	<ul style="list-style-type: none"> Nouveau Monde Graphite
Magnésium	<ul style="list-style-type: none"> KSM Éco2Magnésia Magnésium Technologies Recycles inc. Alliance Magnésium
Vanadium	<ul style="list-style-type: none"> BlackRock, Métaux BlackRock
Scandium	<ul style="list-style-type: none"> Rio Tinto et Titane
Terres rares	<ul style="list-style-type: none"> Innord inc., Ressources GéoMégA

2.2. Fabrication des cellules de batterie

2.2.1. Les étapes de fabrication d'une batterie

La cellule est la plus petite entité constitutive d'une batterie. Elle peut être de forme rectangulaire, cylindrique, prismatique ou encore en pochette. Quel que soit son type, une cellule est essentiellement composée de trois éléments :

- **des électrodes:** il s'agit de deux feuilles métalliques recouvertes d'une pâte contenant des matériaux tels que le graphite, le fer, le carbone et des agents de lithium. L'une transporte le courant négatif (anode) et l'autre le courant positif (cathode);
- **d'un séparateur:** inséré entre les deux électrodes pour éviter les courts-circuits, le séparateur est un matériau poreux qui baigne dans de l'électrolyte;
- **de l'électrolyte:** c'est un liquide absorbé par le séparateur et qui permet la circulation des ions porteurs de charge.

Bien qu'il ait plusieurs technologies, la fabrication des cellules se fait généralement en 11 étapes d'après les travaux de Liu et al. 2021 [13]:

1. **Mélange de la préparation du lisier:** c'est une pâte homogène, mélangée sous vide, contenant des agents liants qui permettent d'assembler tous les composants : des matériaux actifs pour produire l'énergie électrique, et des matériaux conducteurs pour augmenter la conductivité électrique.

2. **Revêtement et calandrage** : le mélange obtenu précédemment est utilisé pour revêtir les deux faces des feuilles d'électrode, qui sont ensuite séchées après élimination de l'excédent de pâte. Le calandrage consiste à comprimer ces feuilles afin d'obtenir la porosité et l'épaisseur souhaitées.
3. **Découpage des feuilles**: la découpe au laser est généralement utilisée afin d'obtenir la forme exacte requise selon le type de cellule à fabriquer.
4. **Identification pour la traçabilité**: le marquage au laser est employé de manière à repérer en permanence les feuilles d'anode et de cathode pour trois raisons fondamentales:
 - Optimiser la performance énergétique des cellules en regroupant les cellules de mêmes propriétés électriques et mécaniques ;
 - Identifier le type de cellule qui se trouve dans un module ou dans une batterie quelconque ;
 - Situer la cellule dans la chaîne d'approvisionnement en cas de problème.
5. **Conditionnement** : c'est l'empilage des feuilles d'électrodes de façon alternée (anode, séparateur, cathode, séparateur etc.)
6. **Soudure feuille à feuille**: grâce à une soudure ultrasonique ou au laser, une bande métallique est soudée à l'anode et l'autre à la cathode. Elles sont ensuite connectées aux bornes de la cellule et seront plus tard reliées à une barre omnibus pour créer un circuit électrique.
7. **Remplissage, dégazage et scellement**: l'électrolyte est versé dans le boîtier, où il est absorbé par les feuilles séparatrices. Un dégazage est ensuite effectué dans une chambre sous vide pour éliminer les bulles d'air. Enfin, le boîtier est scellé.
8. **Mise en forme, inspection et regroupement** : les cellules subissent plusieurs cycles de charge et de décharge, entrecoupés de temps de repos. Ensuite, des tests de vérification des caractéristiques — telles que la tension, la capacité et la résistance — sont réalisés. Cette procédure permet de définir les propriétés des cellules et de regrouper celles présentant des caractéristiques similaires afin de constituer les modules et les packs batterie.
9. **Collage des composants des modules et des enrobages** : les surfaces sont d'abord préparées, puis les mastics et adhésifs sont appliqués pour assembler les modules du pack batterie.

10. Soudage au laser ou aux ultrasons : Il permet de créer un circuit électrique en connectant les languettes positives et négatives des cellules à une barre omnibus. Ce jeu de barres relie toutes les cellules entre elles, en les connectant en série et en parallèle, afin d'obtenir une capacité et une tension spécifiques.

11. Installation et intégration des derniers composants : Une fois le pack batterie assemblé, d'autres composants indispensables à son bon fonctionnement sont ensuite intégrés. Il s'agit du :

- **Système de gestion de la batterie (BMS : Battery Management System)** : C'est en quelque sorte le cerveau de la batterie. Il gère toutes ses fonctions et assure la communication, aussi bien entre les cellules qu'avec les autres composants, tels que le chargeur.
- **Circuits hydrauliques** : il s'agit des circuits utilisés pour contrôler le flux du liquide de refroidissement dans les batteries.
- **Protection contre le feu** : les revêtements endothermiques sont appliqués sur les cellules et les modules pour absorber la chaleur et aider à réguler la température de la batterie. Ils agissent comme des retardateurs de flamme en absorbant la chaleur et en bloquant les flammes en cas d'emballement thermique. Ils contribuent également à améliorer les performances, la sécurité et la longévité de la batterie.

Après toutes ces étapes, une validation finale est effectuée afin de s'assurer que tout fonctionne correctement. Cependant, pour garantir une production efficiente et rentable, il est nécessaire d'évaluer les coûts liés à chacune de ces étapes de fabrication ainsi que la consommation énergétique.

2.2.2. Coût de fabrication des batteries et consommation énergétique

Le coût et la consommation énergétique pour la production des batteries dépend de nombreux facteurs dont le type de cellule, la forme, la capacité etc. En se basant sur le modèle BatPac du Laboratoire national d'Argonne et en considérant une production de 100 000 packs de batteries VE/an, Nelson et al. 2019 [14] ont développé un modèle pour évaluer la répartition des coûts de fabrication à partir des cellules $\text{LiNi}_{0,6}\text{Mn}_{0,2}\text{Co}_{0,2}\text{O}_2$ (NMC622) / graphite de 67 Ah. Les figure 6 et

figure 7 permettent de mieux appréhender les ordres de grandeur en termes de coût et de consommation énergétique. L'analyse des figure 6 et Figure 7 révèle que lors de la production des batteries, le revêtement et le séchage (14,96%), l'enrobage (12,45%) et la mise en forme sont les plus coûteux (32,61%). Pour la fabrication de 100 000 packs batteries par an en utilisant les cellules $\text{LiNi}_{0,6}\text{Mn}_{0,2}\text{Co}_{0,2}\text{O}_2$ (NMC622) /graphite de 67 Ah, il faudrait déboursier environ 56 102 750 USD. De plus, la durée des processus varie de quelques minutes à plusieurs semaines et occasionne des consommations énergétiques diverses. En effet, lors de la fabrication d'une cellule, le séchage et la récupération des solvants nécessitent 6,11 kWh (46,84%) et la mise en forme 3,9 kWh (29,37%). Ces processus à elles seules représentent plus de 75 % de la consommation énergétique totale. En plus de ces coûts, les installations des usines de fabrication des batteries doivent maintenir des conditions extrêmement précises, notamment en matière de contrôle de l'humidité et de la température, ce qui contribue également à la consommation énergétique. L'annexe 2 de ce document présente le détail des coûts des principales étapes de fabrication ainsi que la consommation énergétique associée.

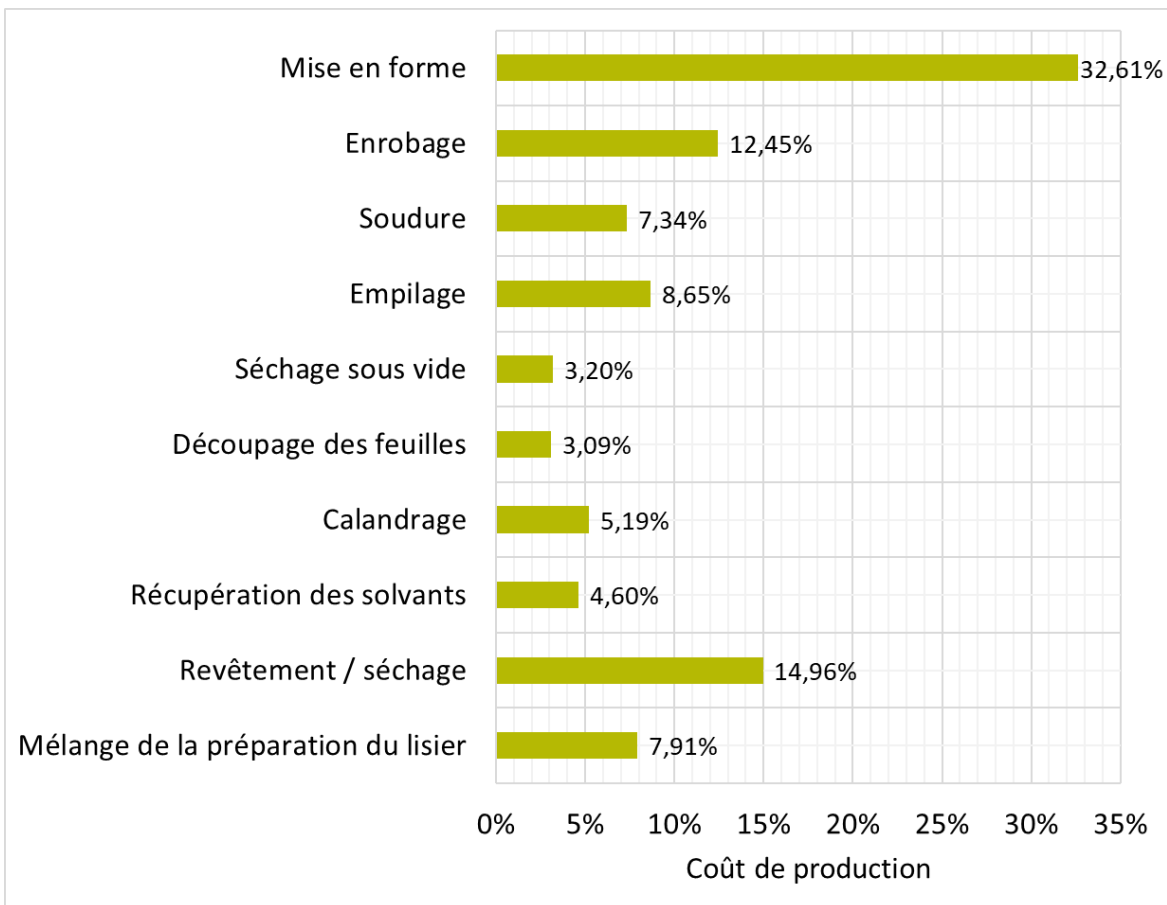


Figure 6 : Coût d'un procédé de fabrication de batterie

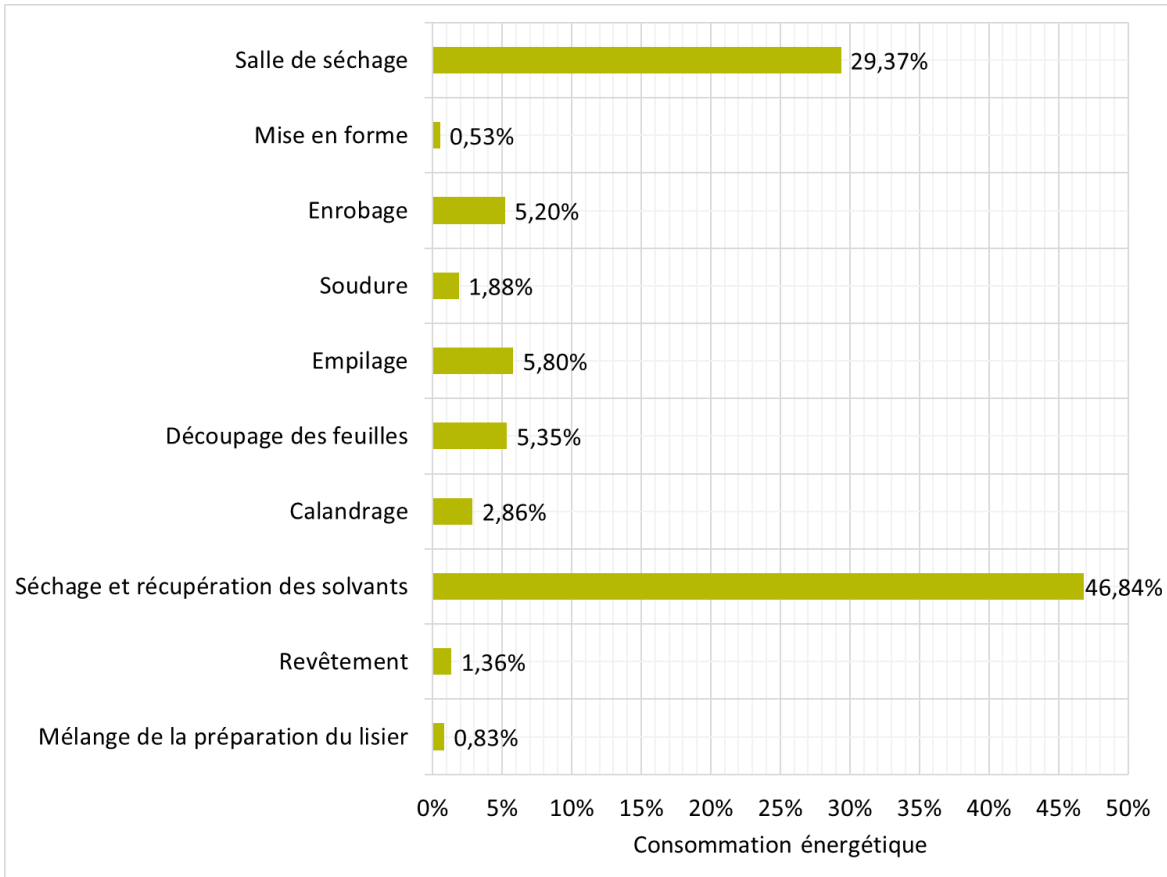


Figure 7 : Consommation énergétique d'un procédé de fabrication de batterie

Le Québec, en raison de son climat et de ses coûts d'électricité relativement bas, bénéficie d'un avantage comparatif dans la fabrication de cellules de batteries, ce qui explique le projet d'implantation de l'usine Northvolt Six au Québec. Cependant, la nécessité de rendre cette production plus écoénergétique demeure un enjeu majeur pour assurer la compétitivité à long terme de la filière. Par ailleurs, plusieurs projets de recherche sont en cours pour développer des BMS intelligents capables d'adapter leur fonctionnement aux conditions réelles d'utilisation, optimisant ainsi la gestion thermique et l'équilibrage des cellules, deux facteurs critiques pour maximiser l'autonomie et la longévité des batteries. Après leur première utilisation, les batteries doivent également être recyclées ou reconditionnées afin de soutenir l'économie circulaire et favoriser la transition énergétique.

2.3 Reconditionnement et recyclage des batteries usagées

Le développement du secteur de l'électrification des transports a inévitablement entraîné une augmentation de la disponibilité des batteries usagées. En effet, après une perte d'environ 20 % de leur capacité nominale, les batteries des véhicules électriques (VE) ne peuvent plus assurer efficacement la traction. Les constructeurs de VE recommandent alors leur remplacement [15]. Ainsi, les batteries usagées de VE, avec un état de santé d'environ 80 %, peuvent être réutilisées dans d'autres applications. De la même manière, les batteries utilisées pour des applications stationnaires ou dans les appareils électroniques peuvent être recyclées.

2.3.1. Reconditionnement et utilisation en seconde vie

Grâce à leur capacité de stockage élevée et à leur forte densité énergétique, l'utilisation des batteries usagées de véhicules électriques (VE) présente de nombreux avantages. En effet, en plus d'offrir des coûts réduits, Li et al. 2022 [16] ont démontré dans leur étude que l'utilisation de ces batteries permet non seulement de réduire de 12 % à 57 % les coûts de lissage de la production d'énergie électrique, mais aussi de diminuer les émissions de CO₂ de 7 % à 31 % par rapport à une batterie neuve. Outre le lissage de la production dans les micro-réseaux, ces batteries sont également utilisées dans les systèmes de stockage d'énergie stationnaire ou pour les véhicules à vitesse réduite, comme les vélos électriques. Néanmoins, avant leur réutilisation, les batteries usagées de VE doivent suivre des étapes de reconditionnement.

2.3.2. Recyclage des batteries et extraction des métaux critiques

Le recyclage des batteries usagées peut être divisé en quatre étapes fondamentales : la préparation, le prétraitement, le traitement et la métallurgie.

Étape 1 : La préparation

Dans cette première étape du processus de recyclage, les batteries sont collectées, transportées puis stockées. Au Québec, les constructeurs de véhicules électriques ont lancé le 28 juin 2023 un programme de récupération des batteries à travers la plateforme recuperationdesbatteriesve.ca.

Ce programme est soutenu par 16 constructeurs de véhicules et offre gratuitement, tant aux particuliers qu'aux entreprises, des services de récupération des batteries de véhicules électriques (VE) admissibles sur l'ensemble du territoire. Pour être admissible, une batterie doit répondre à cinq critères définis dans le cadre dudit programme. Une fois l'admissibilité confirmée, des renseignements de base tels que la marque, le modèle et l'année du véhicule, la taille et le poids de la batterie, ainsi que sa composition chimique sont recueillis afin de déterminer le mode de transport le plus approprié ainsi que la destination finale. Ces informations permettent aux détenteurs de batteries d'identifier le fournisseur de services désigné par le constructeur pour effectuer la collecte. Les batteries usagées sont ensuite triées en fonction de leur type et de la nature de leur cathode, puis stockées.

Étape 2 : le prétraitement

Le prétraitement consiste, dans un premier temps, à désactiver ou à réduire les différents dangers. En effet, la décharge est utilisée pour diminuer le contenu énergétique de la batterie. Le traitement cryogénique, quant à lui, permet d'éviter les réactions exothermiques. Pour éliminer plus facilement les composants inflammables de l'électrolyte, la pyrolyse est souvent employée. Ensuite, des techniques manuelles, automatisées ou semi-automatisées sont mises en œuvre pour désassembler les batteries. Une fois la batterie désassemblée, on obtient des cellules, des électrodes, des métaux, des plastiques ainsi que certains composants électroniques pouvant être réutilisés dans des applications secondaires.

Étape 3 : le traitement

Après les étapes de préparation et de prétraitement, cette troisième phase vise à séparer individuellement les composants de la batterie à l'aide de procédés chimiques, mécaniques ou thermiques. La séparation magnétique, la séparation par courants de Foucault, le criblage, le tri gravimétrique dans des champs d'écoulement [17] ou encore l'utilisation de tables à secousses pneumatiques sont quelques exemples de méthodes employées. Cependant, l'efficacité de la séparation dépend non seulement du degré de libération mécanique des composants à séparer, mais aussi de la performance de la technologie de séparation utilisée.

Étape 4 : la métallurgie

Cette dernière étape concerne les procédés métallurgiques, qui permettent de produire des matériaux intermédiaires d'une pureté suffisante. Pour ce faire, la pyrométallurgie et l'hydrométallurgie sont les techniques les plus couramment utilisées.

Dans le cadre de la pyrométallurgie, les composants de la batterie sont d'abord soumis à de hautes températures, ce qui favorise l'évaporation des composés organiques. Ensuite, les oxydes métalliques sont réduits, et une partie du cuivre, du nickel, du cobalt et du fer contenus dans les batteries est récupérée sous forme d'alliages, entrant dans la composition de la matte. Cette technologie est robuste et ne nécessite qu'un prétraitement et un conditionnement mineurs. De plus, de nombreux risques sont automatiquement éliminés lors de la fusion [18]. Toutefois, malgré sa robustesse, la pyrométallurgie présente une efficacité de recyclage limitée et nécessite une consommation énergétique élevée [18-20].

L'hydrométallurgie est une autre technique largement utilisée dans l'industrie du recyclage des batteries. Elle permet d'extraire sélectivement les métaux du broyat obtenu après traitement mécanique, ou de séparer les métaux formant les alliages issus de la pyrométallurgie. Si les métaux du revêtement de la cathode peuvent être récupérés de manière efficace et sélective sur le plan énergétique grâce à l'hydrométallurgie [21], cette méthode exige cependant l'utilisation d'acides organiques puissants et d'additifs coûteux, générant d'importantes quantités de résidus liquides ainsi que des émissions nocives ou toxiques [22]. La figure 8 inspirée des travaux de Werner et al. 2020 [23], présente les trois procédés industriels de recyclage de batteries les plus courants.

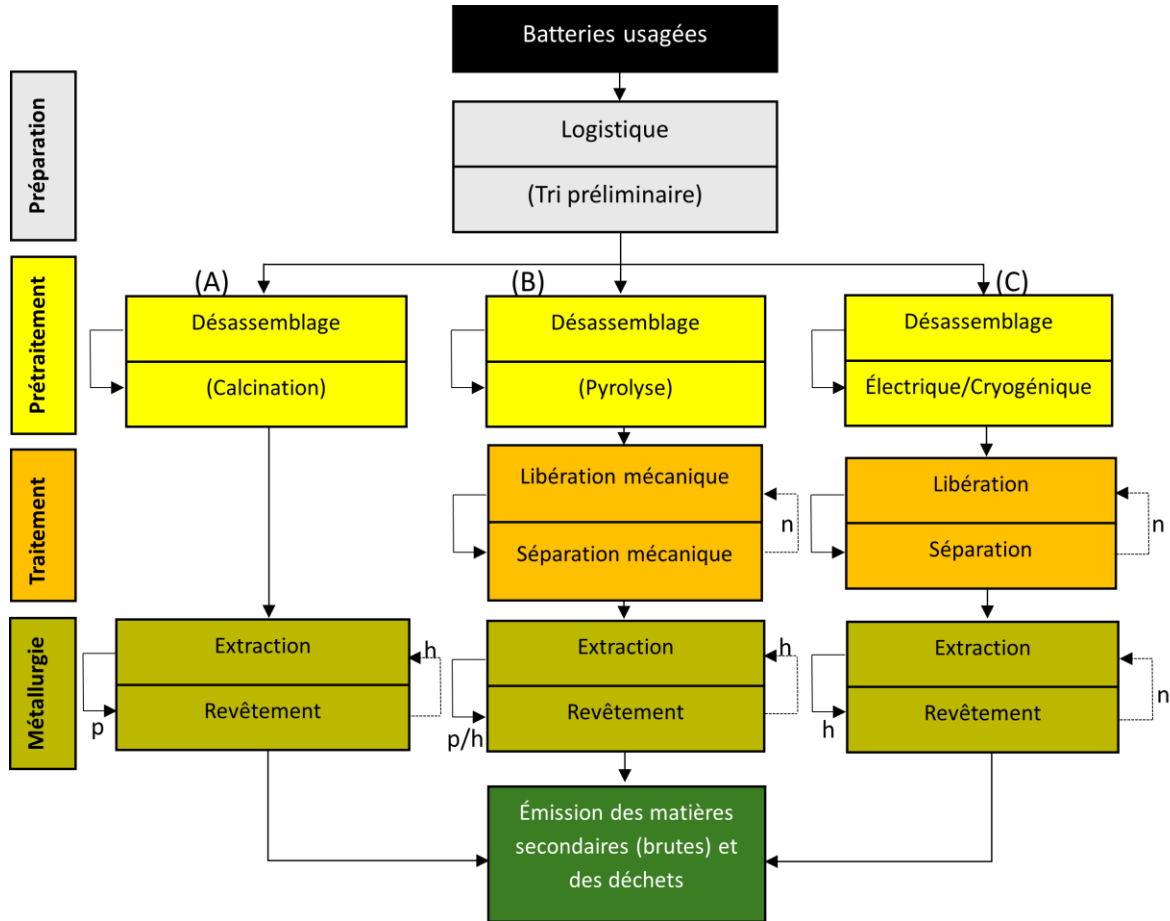


Figure 8 : Organigramme des trois procédés industriels les plus courants : procédé à haute température (A), procédé à température modérée (B), procédé à basse température (C), p-pyroméallurgie, h-hydroméallurgie, n-nombre d'itérations

3. État actuel de l'efficacité énergétique dans la filière de batterie

3.1. Les parties prenantes et les fonds disponibles pour les projets dans la filière batterie

Les projets d'efficacité énergétique dans la filière batterie mobilisent de nombreuses parties prenantes, dont les responsabilités respectives sont essentielles au succès de ces initiatives. Ces acteurs clés, issus de secteurs variés, collaborent étroitement afin d'atteindre des objectifs communs. Au Québec, la liste des principales parties prenantes impliquées telle qu'établie lors de l'atelier tenu dans le cadre du Sommet sur les batteries du futur et de l'hydrogène vert comprend notamment :

- **Le gouvernement du Québec** : le ministère de l'Économie, de l'Innovation et de l'Énergie (MEIE), le ministère des Ressources naturelles et des Forêts (MRNF), ainsi que le ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP) sont les principaux ministères par lesquels le gouvernement du Québec s'implique dans la filière batterie.

Le MRNF assure la gestion et le soutien des ressources énergétiques et minérales du Québec nécessaires à la production de batteries, tout en intégrant les principes du développement durable et en encourageant l'innovation ainsi que l'efficacité énergétique à travers divers programmes et initiatives.

Le MELCCFP, quant à lui, veille à la protection de l'environnement en établissant des normes et des règlements destinés à minimiser l'impact écologique des projets liés à cette filière.

Ces deux ministères collaborent étroitement avec les entreprises privées, les institutions de recherche, les organismes de financement, ainsi que les communautés locales et autochtones afin de favoriser le développement responsable et durable de la filière batterie.

- **Les entreprises privées** : Il s'agit notamment des fabricants de batteries, des entreprises de technologies propres, ainsi que des fournisseurs de matériaux. Ces acteurs collaborent avec les universités et les centres de recherche afin de développer de nouvelles technologies et d'améliorer les processus de fabrication des batteries.
- **Les institutions de recherche** : Elles initient et participent à des projets innovants portant sur les technologies émergentes, tout en fournissant des analyses et des recommandations aux décideurs publics afin de soutenir le développement du secteur.

À ce jour, quinze Centres collégiaux de transfert de technologies (CCTT) sont activement engagés dans cette dynamique, disposant collectivement de près de 50 millions de dollars en équipements. Leur implication couvre un large éventail d'activités, notamment la structuration de la filière, le développement de procédés de fabrication et de recyclage, ainsi que la mise en place de formations techniques en partenariat avec des universités, dans le but de former une main-d'œuvre qualifiée.

L'identification précise des expertises et des contributions potentielles de chaque centre permet à l'écosystème de mobiliser efficacement des partenaires, qu'ils soient industriels, collégiaux ou universitaires. Ces collaborations facilitent l'accompagnement des projets

tout au long de leur cycle de développement, de l'idéation (niveau de maturité technologique 1) à la mise en œuvre concrète (niveau de maturité technologique 9).

Enfin, la mutualisation des ressources et des expertises rendue possible par une meilleure connaissance des offres disponibles et par la concertation entre les parties prenantes de chaque CCTT impliqué renforce l'efficacité et la cohérence des actions menées à l'échelle de la filière.

- **Les communautés locales et autochtones** : l'intégration de ces communautés permet une consultation et une collaboration adéquates surtout dans les régions où les projets sont réalisés.
- **Les organismes de financement** : les programmes gouvernementaux tels que Transition énergétique Québec (TEQ), les fonds institutionnels et privés comme Investissement Québec, ainsi que les subventions fédérales (notamment via Ressources naturelles Canada) jouent un rôle essentiel dans le développement et la mise en œuvre de l'efficacité énergétique au sein de la filière batterie.

Selon Investissement Québec, la valeur des principaux projets annoncés dans la filière batterie est estimée à plus de 16 milliards de dollars [24]. Près de 66 % de ce montant provient du secteur privé, tandis que 15,5 % sont constitués de prêts remboursables et d'investissements en capital-actions (Québec). En outre, 880 millions de dollars prennent la forme de prêts pardonnables sous conditions et de subventions accordées par le gouvernement du Québec. La contribution du gouvernement fédéral s'élève, quant à elle, à 2,17 milliards de dollars.

Dans ce contexte, le programme ÉcoPerformance permet aux entreprises de bénéficier d'une aide financière pour réaliser des analyses visant la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES). Le montant de l'aide varie entre 25 000 \$ et 75 000 \$ pour les petits et moyens consommateurs d'énergie, et entre 100 000 \$ et 300 000 \$ pour les grands consommateurs.

Au niveau fédéral, l'appel de propositions pour l'accélération de la filière batterie, lancé dans le cadre du Programme d'innovation énergétique (PIE) de Ressources naturelles Canada [25], cible des technologies contribuant à la décarbonisation, à la sécurité et à la compétitivité de la chaîne de valeur des batteries. Cet appel est ouvert aux projets de recherche et développement (R-D), dont le financement demandé varie entre 500 000 \$ et 3 000 000 \$, ainsi qu'aux projets de démonstration, pour lesquels le financement demandé

est compris entre 1 000 000 \$ et 5 000 000 \$. Les contributions financières peuvent couvrir jusqu'à 75 % des coûts pour les projets de R-D et 50 % pour les projets de démonstration.

3.2. La gestion de pointe de puissance

Malgré son rôle stratégique dans la transition énergétique, la filière batterie demeure vulnérable en contexte de forte demande énergétique, notamment lors des périodes de pointe hivernales au Québec. Cette fragilité résulte d'un enchaînement de dépendances énergétiques, logistiques et technologiques qui limite la résilience du secteur.

Tout d'abord, certaines étapes clés de la chaîne de valeur, comme la synthèse des matériaux actifs ou la fabrication des cellules, sont extrêmement énergivores. Ces processus reposent en grande partie sur l'approvisionnement en électricité une ressource abondante au Québec, mais soumise à des contraintes de disponibilité durant les périodes de pointe. C'est notamment le cas du 3 février 2023, où Hydro-Québec a enregistré une pointe historique de consommation d'environ 43 124 MW, bien au-delà de la capacité du réseau, estimée à 40 000 MW [26].

Dans ce type de situation, la priorité est généralement accordée à la consommation résidentielle. Ainsi, une tension sur le réseau peut ralentir, voire interrompre temporairement certaines opérations industrielles, affectant à la fois la productivité et l'efficacité énergétique des sites de production.

En réponse, plusieurs programmes ont été mis en place par Hydro-Québec pour mieux gérer ces pointes de consommation, en complément des travaux de recherche menés à l'Institut de l'énergie Trottier.

- **Hydro-Québec** : les entreprises peuvent recevoir des crédits sur leur factures d'électricité si elles réduisent leur consommation pendant les heures de pointe à travers l'option de Gestion de la Demande de Puissance (GDP) [27]. Aussi, la tarification dynamique offerte par Hydro-Québec à sa clientèle qui décide de déplacer leur consommation en dehors des plages horaires (entre 6h et 9h et entre 16h et 20h) permet de faire des économies.
- **Institut de l'énergie Trottier** : d'après les chercheurs de cet institut, l'isolation des bâtiments, les systèmes de stockage, la géothermie ou les micro-réseaux sont des solutions

qui peuvent être règlementées afin de limiter la contribution des nouveaux bâtiments à la pointe de demande d'électricité [28].

Au-delà des programmes d'Hydro-Québec, plusieurs autres solutions permettent d'optimiser la consommation d'énergie, comme cela a été souligné lors de l'atelier sur le Sommet des batteries du futur et de l'hydrogène vert, à savoir:

- **Les systèmes de gestion d'énergie** : ils sont équipés d'algorithmes avancés qui surveillent et contrôlent la consommation d'énergie en temps réel.
- **La déconnexion temporaire des appareils** : les appareils non essentiels peuvent être déconnectés pendant les périodes de pointe afin de réduire la puissance maximale.
- **Le stockage d'énergie** : les batteries permettent de stocker de l'énergie pendant les périodes creuses et de la libérer pendant les périodes de pointe.
- **L'optimisation des équipements** : Une mise à niveau des équipements est nécessaire pour accroître leur efficacité afin de réduire leur consommation énergétique.

3.3. Portrait des enjeux de la filière batterie au Québec

Dans le contexte de la transition énergétique, le Québec mise sur le développement d'une filière batterie intégrée et durable. Cette filière, qui s'étend de l'extraction des minéraux critiques jusqu'au recyclage en fin de vie, représente un levier stratégique pour décarboner les secteurs les plus émissifs, notamment les transports. Toutefois, elle soulève également de nombreux enjeux liés à l'efficacité énergétique, à la localisation des ressources, à la dépendance technologique et à la structuration territoriale de la chaîne de valeur.

La figure 9 présente un portrait global de la chaîne de valeur de la filière batterie au Québec et identifie les principales entreprises actives à chaque étape du processus : extraction, transformation, fabrication, assemblage et recyclage.

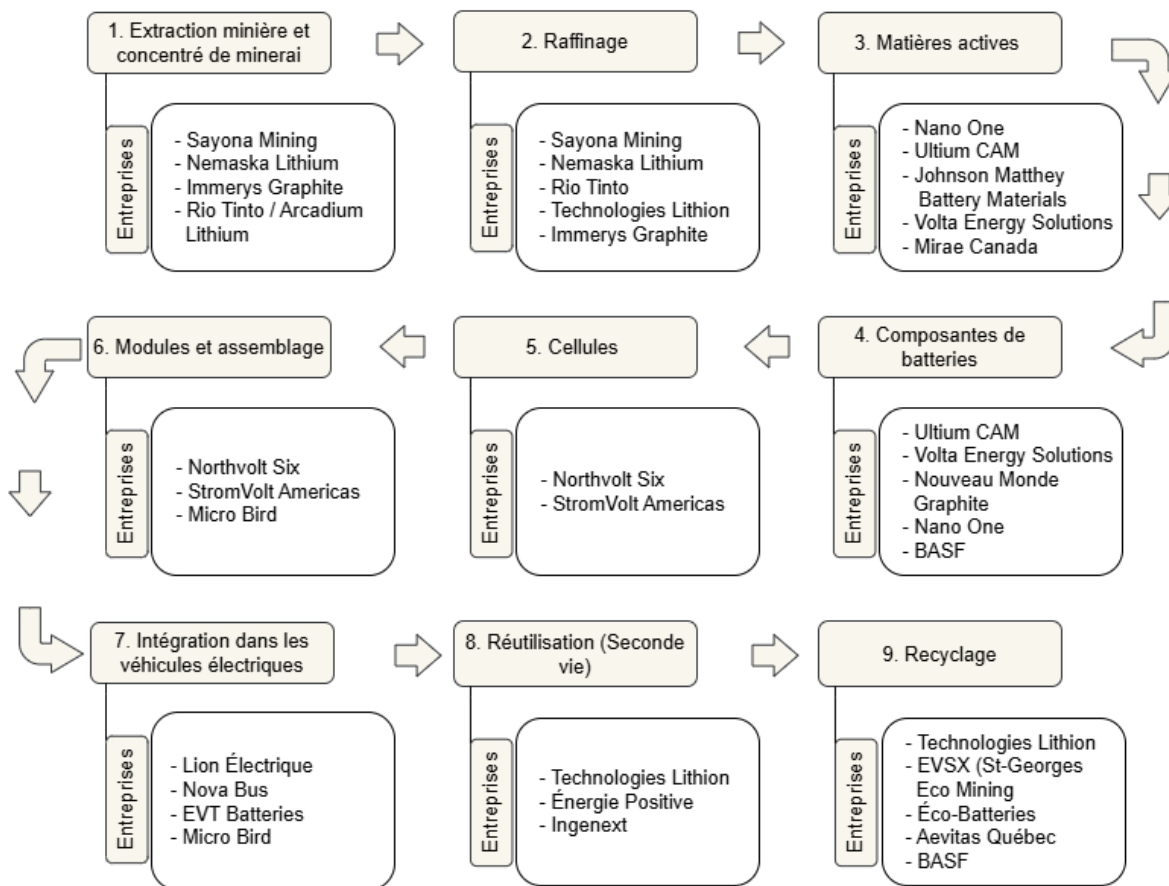


Figure 9 : La chaîne de valeur de la filière batterie et les entreprises impliquées

Actuellement, plusieurs entreprises au Québec sont confrontées à des défis liés au manque de blocs d'électricité et à l'efficacité énergétique, notamment dans le contexte d'une chaîne de valeur fragmentée où chaque étape est énergivore. Les principales problématiques comprennent notamment :

- **Le faible nombre de projets d'efficacité énergétique subventionnés** : les coûts liés à la mise en œuvre des solutions d'efficacité énergétique pour les petites et moyennes entreprises qui désirent s'impliquer dans la filière peuvent être ou paraître plus élevés.
- **La forte dépendance à Hydro-Québec et la faible intégration de solutions d'autoproduction énergétique** : la majorité des entreprises de la filière batterie dépendent largement de l'électricité fournie par Hydro-Québec, avec peu ou pas d'intégration de sources d'énergie renouvelable sur site. En effet, huit (8) entreprises de la filière batterie ont présenté des demandes d'obtention des blocs d'électricité en 2023 tel que listé dans le tableau 5. Seules Réseau Allégé Québec, Technologies Lithion et Vale Canada ont été

sélectionnés pour obtenir un raccordement d’une puissance de 5 mégawatts (MW) ou plus. Ces projets attendent désormais que HQ négocie les ententes techniques et financières liées au raccordement et aux conditions de raccordement au réseau (capacités, tarification, infrastructure, etc.).

Tableau 5 : Liste des entreprises de la filière batterie ayant fait une demande de blocs d’énergie [29,30]

Entreprise	Lieu	Emplacement dans la chaîne de valeur
Air Liquide Canada	Bécancour	Matières actives
Ford-ÉcoPro CAM Canada	Bécancour	Matières actives
Northvolt Six	Saint-Basile-le Grand et McMasterville	Cellules, modules et assemblage
Nouveau Monde Graphite	Bécancour	Composantes de batteries
Volta Energy Solutions Canada	Granby	Matières actives, composantes de batteries
Technologies Lithion	Bécancour	Raffinage, réutilisation (seconde vie), recyclage
Réseau Allégé Québec	Shawinigan	Filière batterie
Vale Canada	Bécancour	Filière batterie

Par ailleurs, l’exploitation des MCS est également soumise aux problématiques de gestion de la puissance pour les mines raccordées au réseau et une auto-production d’énergie pose un problème de coût, de fiabilité de l’énergie et de la rentabilité du projet.

- **La continuité des procédés actuels de la filière** : Selon les experts présents aux différents ateliers du Sommet sur les batteries du futur et de l’hydrogène vert, le fonctionnement continu de la plupart des équipements lors des procédés actuels de fabrication des batteries contribue à l’augmentation des pointes de puissance.
- **L’utilisation non optimisée des systèmes de gestion de l’énergie** : bien que certaines entreprises aient mis en place des systèmes de gestion de l’énergie (EMS), ceux-ci ne sont pas toujours optimisés ou adaptés à la complexité de la production des batteries.

3.4. Intérêts des promoteurs à travailler sur la question d'efficacité énergétique dans la filière batterie

L'utilisation des batteries dans les systèmes d'énergies renouvelables et pour l'électrification des transports contribue de manière significative à la transition énergétique. Pour les promoteurs de ce secteur en pleine expansion, l'investissement en recherche et développement visant à améliorer l'efficacité énergétique dans la filière batterie permet aux entreprises de rester à la pointe de l'innovation et de se démarquer de la concurrence. Cette démarche favorise la fabrication de batteries bas carbone à faible coût. De plus, les subventions offertes par le gouvernement du Québec aux entreprises de la filière qui mettent en œuvre des efforts en matière d'efficacité énergétique constituent un avantage financier important.

3.5. Initiatives d'efficacité énergétique en cours et identification des projets potentiels

Plusieurs initiatives sont mises en place pour encourager l'efficacité énergétique dans les industries. En effet, à travers le programme ÉcoPerformance [31], les industries peuvent recevoir entre 25 000 \$ et 300 000 \$ pour des projets visant à réduire leurs émissions de GES. De plus, le gouvernement du Québec, en partenariat avec Hydro-Québec, soutient le Laboratoire Industriel en Transition Énergétique (LITE) par une aide financière de 75 millions de dollars, visant à accélérer la commercialisation des innovations et à renforcer la compétitivité du Québec dans le secteur des batteries. Par ailleurs, le Plan québécois pour la valorisation des minéraux critiques et stratégiques propose des mesures pour intégrer l'économie circulaire aux chaînes de valeur des minéraux critiques et stratégiques (MCS). Ainsi, au-delà de ces initiatives, plusieurs projets potentiels sont en cours dans la filière des batteries au Québec.

Dans le cadre du développement de la filière batterie québécoise, l'entreprise Nano One met en œuvre un projet novateur à Candiac visant à transformer une usine existante en site pilote de production de matériaux actifs de cathodes pour batteries LFP (lithium-fer-phosphate).

L'objectif central du projet est d'industrialiser le procédé « One Pot », une technologie propriétaire permettant la synthèse directe des cathodes en une seule étape. Contrairement aux procédés conventionnels, plus complexes et énergivores, cette approche permet :

- une réduction significative des émissions de gaz à effet de serre (GES);
- une consommation énergétique moindre tout au long de la chaîne de production;
- une simplification du processus avec moins d'étapes chimiques intermédiaires et de rejets.

Ce procédé est donc au cœur de l'effort québécois visant à verdir l'aval de la filière batterie, tout en augmentant sa compétitivité technologique [32].

Plusieurs autres projets, tels que résumés dans le tableau 6, dessinent un écosystème solide : de la recherche et développement à la production locale de matériaux, en passant par des systèmes de stockage à l'échelle utilitaire et des micro-réseaux. Ces initiatives portent un potentiel réel de réduction de la consommation énergétique, d'optimisation de l'intégration au réseau et de renforcement de la résilience, tant pour les sites industriels que pour les communautés québécoises.

Tableau 6 : Quelques projets d'efficience énergétique

Projet	Type d'intervention	Gains d'efficience
Nano One Usine pilote	Procédé de production de matériaux	Moins d'émissions, consommation optimisée
EVLO - Parent	BESS transmission	Réduction des pointes, fiabilité du réseau
Micro-réseaux	Stockage distribué	Îlotage, autosuffisance, optimisation
Laboratoire industriel en Transition énergétique (LITE)	R&D pour la filière batterie	Innovation et efficience accrue
Ultium & Volta	Production locale de matériaux essentiels	Réduction des pertes logistiques

Par ailleurs, la zone d'innovation de la Vallée de la Transition Énergétique située entre Bécancour, Trois-Rivières et Shawinigan accueille des nouvelles entreprises et offre des opportunités économiques pour les entreprises locales. Ainsi, Propulsion Québec qui est une grappe d'entreprises et d'institutions québécoises engagées dans les transports terrestres zéro émission et intelligents soutient une chaîne de valeur complète pour les batteries lithium-ion, couvrant

l'extraction et la transformation des MCS, la fabrication des batteries, leur réutilisation en deuxième vie et leur recyclage.

4. Solutions et recommandations

Afin d'améliorer l'efficacité énergétique globale de la chaîne de valeur de la filière batterie au Québec, plusieurs leviers d'action, tant technologiques que stratégiques, doivent être activés de manière intégrée et coordonnée. Ces recommandations, dont les grandes lignes ont été proposées lors de l'atelier du Sommet des batteries du futur et de l'hydrogène vert, s'inscrivent dans une perspective d'optimisation technico-économique, de réduction de l'intensité énergétique par unité de production et de renforcement de la résilience énergétique.

4.1 L'optimisation des processus industriels

L'amélioration de l'efficacité énergétique passe par une refonte technologique des chaînes de production, notamment via l'intégration de systèmes cyber-physiques et de capteurs IoT (Internet des objets) permettant une supervision en temps réel des flux énergétiques. L'automatisation avancée, combinée à l'intelligence artificielle (IA) en particulier les approches d'apprentissage automatique pour la prédiction des consommations et d'apprentissage par renforcement pour l'optimisation adaptative peut considérablement diminuer les pertes thermiques et électriques.

Des technologies telles que les robots collaboratifs (cobots), les algorithmes d'ordonnancement multi-objectifs et les systèmes de contrôle prédictif permettent également de stabiliser les rendements des procédés complexes comme le séchage, le calandrage ou l'enrobage. L'adoption de jumeaux numériques permet de simuler et d'ajuster les paramètres critiques avant la mise en production, ce qui réduit la consommation énergétique marginale par unité produite.

4.2. La stabilisation des procédés et la planification autour de la pointe

La stabilisation des procédés industriels, notamment ceux impliquant des cycles thermiques ou électrochimiques sensibles, est cruciale pour atténuer les pics de demande énergétique. Une gestion proactive des séquences de démarrage et d'arrêt des équipements, soutenue par des

systèmes de contrôle avancés, permet d'éviter les surconsommations lors des montées en charge. Par ailleurs, l'ordonnancement de la production industrielle en fonction des signaux tarifaires (tarification dynamique) permet d'aligner les activités les plus énergivores avec les plages horaires de faible demande sur le réseau. Cette approche repose sur l'utilisation de systèmes de gestion de l'énergie (EMS) dotés de modules de prévision de la charge et d'optimisation en temps réel, facilitant un délestage automatique ou un transfert de charge vers les heures creuses.

4.3. L'autoproduction d'énergie

Les entreprises opérant dans la filière batterie sont encouragées à intégrer des systèmes de production décentralisée d'énergie renouvelable, notamment à partir de photovoltaïque, d'éolien ou de biomasse résiduelle, couplés à des systèmes de stockage d'énergie stationnaire (BESS). Cette stratégie vise à renforcer l'autonomie énergétique des sites industriels et à réduire leur dépendance au réseau public.

L'hybridation des sources renouvelables avec des convertisseurs bidirectionnels intelligents (onduleurs multifonctions) permet de maximiser la souplesse opérationnelle tout en stabilisant les micro-réseaux industriels. En outre, l'intégration de systèmes de contrôle et d'acquisition de données énergétiques à distance favorise une surveillance et un pilotage en temps réel, rendant possible une optimisation fine de la production et de la consommation internes.

4.4. L'optimisation de la gestion des batteries

Les systèmes de gestion de batteries intelligents (BMS) doivent évoluer vers des plateformes capables d'assurer un diagnostic continu de l'état de santé (SoH), de l'état de charge (SoC) et de la durée de vie résiduelle (RUL) des cellules. Cela permet d'exploiter au mieux les capacités restantes des batteries et de limiter les remplacements prématurés, avec des effets positifs sur la consommation énergétique de la filière. Par ailleurs, l'adoption de BMS intelligents aiderait Hydro-Québec à améliorer la résilience et l'efficacité globale du réseau électrique.

L'introduction de stratégies d'équilibrage actif, ainsi que l'amélioration de la gestion thermique grâce à des matériaux à changement de phase (PCM) ou à des circuits de refroidissement à haut

rendement, contribuent également à prolonger la durée de vie utile des cellules tout en réduisant les pertes énergétiques internes.

4.5. L'innovation dans le recyclage

Le recyclage des batteries doit s'orienter vers des procédés à haute sélectivité et à faible intensité énergétique, tels que la biohydrométallurgie, la précipitation sélective ou l'utilisation de solvants organiques à faible impact environnemental. Ces technologies permettent une valorisation efficace des métaux critiques tout en réduisant les rejets toxiques et les coûts énergétiques.

L'intégration de la notion de seconde vie des batteries, notamment pour des applications stationnaires ou de secours, constitue une piste prometteuse. Cette approche requiert des protocoles de diagnostic post-usage fiables ainsi que des normes de certification afin de garantir la sécurité et les performances des modules réutilisés.

4.6. La mobilisation des parties prenantes

La coordination entre les entreprises de la filière batterie, le gouvernement, les instituts de recherche et les communautés autochtones est essentielle pour harmoniser les efforts en matière d'efficacité énergétique. La création d'une plateforme intersectorielle de collaboration regroupant entreprises, instituts de recherche, gouvernements et fournisseurs d'énergie permettrait d'améliorer la gouvernance technologique et énergétique.

Une telle plateforme pourrait s'appuyer sur une cartographie dynamique des initiatives en cours, des technologies disponibles et des besoins futurs en matière d'énergie, facilitant ainsi la mutualisation des ressources, le partage des données énergétiques et l'élaboration de feuilles de route communes. Elle pourrait également soutenir la création de groupes de travail sectoriels, encourager le maillage interrégional et stimuler le développement de projets pilotes collaboratifs.

Conclusion

La filière de batterie au Québec représente une opportunité stratégique pour répondre aux défis de la transition énergétique tout en stimulant l'économie locale. Grâce à son sous-sol riche en minéraux, son électricité propre et renouvelable, son expertise dans la recherche sur les minéraux critiques et stratégique, le Québec est bien positionné pour jouer un rôle clé dans le développement durable et la production de batteries écologiques.

Cependant, pour maximiser le potentiel de cette filière, il est essentiel de relever certains défis, tels que l'efficacité énergétique. Dans ce rapport, le contexte énergétique, les minéraux critiques et stratégiques ainsi que l'état actuel de l'efficacité énergétique de la filière batterie ont été présentés. À travers le soutien à l'innovation technologique, la formation d'une main-d'œuvre qualifiée et d'autres recommandations adressées dans ce rapport, l'amélioration de l'efficacité énergétique de cette filière constitue un engagement envers un avenir plus vert et plus durable pour les générations à venir.

Références

- [1] Environnement et Changement climatique Canada, "Rapport d'inventaire nationale 1990 – 2022 : Sources et puits des gaz à effet de serre au Canada ", issue 1910-7072.
Disponible : <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/changements-climatiques/emissions-gaz-effet-serre/inventaire.html>
- [2] Ministère de l'Environnement de la Lutte contre les changements climatiques de la Faune et des Parcs du Québec, "Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre," "Inventaire 2022 et évolution depuis 1990."
Disponible: <https://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/ges/index.htm>
- [3] M. G. Molina, "Dynamic modelling and control design of advanced energy storage for power system applications," *Dynamic Modelling*, vol. 300, 2010.
- [4] International Energy Agency (IEA), "Global EV Outlook 2024 ", Paris, 2024.
Disponible: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>
- [5] Association des Véhicules électrique du Québec (AVEQ), "Médias / Information et statistiques". Disponible : <https://www.aveq.ca/meacutedias--stats.html>).
- [6] Hydro-Québec, "Vers un Québec décarboné et prospère, Plan d'action 2035"
Disponible : <https://www.hydroquebec.com/data/a-propos/pdf/plan-action-2035.pdf>).
- [7] Hydro-Québec, Rapport annuel 2022
Disponible : <https://www.hydroquebec.com/data/documents-donnees/pdf/rapport-annuel-2022-hydro-quebec.pdf?v=20240220>
- [8] Hydro-Québec, "Historique des données de consommation d'électricité au Québec par secteur d'activité"
Disponible : <https://donnees.hydroquebec.com/explore/?sort=modified&refine.theme=Consommation+d%E2%80%99%C3%A9lectricit%C3%A9>
- [9] Evlo Stockage d'énergie, "Des projets conçus pour être efficaces et résilients"
Disponible : <https://evloenergy.com/fr/nos-projets/>
- [10] Gouvernement du Québec, "Les bornes de recharge pour aller partout"
Disponible : https://www.quebec.ca/transports/transport-electrique/recharge/bornes-recharge-partout?utm_source=chatgpt.com

- [11] Gouvernement du Canada, "Les minéraux critique du Canada"
 Disponible : <https://www.canada.ca/fr/campagne/mineraux-critiques-au-canada/les-mineraux-critiques-une-occasion-pour-le-canada.html>)
- [12] Gouvernement du Québec, "Les minéraux critiques et stratégiques, Plan Québécois pour la valorisation des minéraux critiques et stratégiques 2020 - 2025"
 Disponible : https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/energie-ressources-naturelles/publications-adm/plan-strategique/PL_valorisation_mineraux_critiques_strategiques.pdf
- [13] Y. Liu, R. Zhang, J. Wang, and Y. Wang, "Current and future lithium-ion battery manufacturing," *iScience*, vol. 24, no. 4, p. 102332, 2021/04/23/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.102332>.
- [14] P. A. Nelson, S. Ahmed, K. G. Gallagher, and D. W. Dees, "Modeling the Performance and Cost of Lithium-Ion Batteries for Electric-Drive Vehicles, Third Edition," United States, 01 2019.
 Disponible : <https://www.osti.gov/biblio/1503280>
- [15] W. Waag, C. Fleischer, and D. U. Sauer, "Critical review of the methods for monitoring of lithium-ion batteries in electric and hybrid vehicles," *Journal of Power Sources*, vol. 258, pp. 321-339, 2014/07/15/ 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.02.064>.
- [16] P. Li, X. Xia, and J. Guo, "A review of the life cycle carbon footprint of electric vehicle batteries," *Separation and Purification Technology*, vol. 296, p. 121389, 2022/09/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121389>.
- [17] G. Zhao, "Resource Utilization and Harmless Treatment of Power Batteries," in *Reuse and Recycling of Lithium-Ion Power Batteries*, 2017, pp. 335-377.
- [18] G. Harper *et al.*, "Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles," *Nature*, vol. 575, no. 7781, pp. 75-86, 2019/11/01 2019, doi: 10.1038/s41586-019-1682-5.
- [19] W. Gao *et al.*, "Lithium Carbonate Recovery from Cathode Scrap of Spent Lithium-Ion Battery: A Closed-Loop Process," *Environmental Science & Technology*, vol. 51, no. 3, pp. 1662-1669, 2017/02/07 2017, doi: 10.1021/acs.est.6b03320.
- [20] T. W. Ellis and J. A. Howes, "Roadmap for the Lifecycle of Advanced Battery Chemistries," in *REWAS 2016: Towards Materials Resource Sustainability*, R. E. Kirchain *et al.* Eds. Cham: Springer International Publishing, 2016, pp. 51-56.
- [21] S. Zhao, W. He, and G. Li, "Recycling Technology and Principle of Spent Lithium-Ion Battery," in *Recycling of Spent Lithium-Ion Batteries: Processing Methods and Environmental Impacts*, L. An Ed. Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 1-26.

- [22] L. Yun *et al.*, "Metallurgical and mechanical methods for recycling of lithium-ion battery pack for electric vehicles," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 136, pp. 198-208, 2018/09/01/ 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.04.025>.
- [23] D. Werner, U. A. Peuker, and T. Mütze, "Recycling Chain for Spent Lithium-Ion Batteries," *Metals*, vol. 10, no. 3, doi: 10.3390/met10030316.
- [24] Investissement Québec, "Des investissements privés majeurs pour le Québec"
Disponible : <https://filierebatterie.investquebec.com/#:~:text=priv%C3%A9s%20majeurs-,pour%20le%20Qu%C3%A9bec,priv%C3%A9s%20qui%20s'implanteront%20ici>.
- [25] Gouvernement du Canada, "Appel à proposition pour l'accélération de la filière batterie"
Disponible : <https://ressources-naturelles.canada.ca/financement-partenariats/appel-propositions-l-acceleration-filiere-batterie-guide-demandeur>
- [26] Hydro-Québec, "Pointes hivernales et hiver doux : Nous répondons à toutes vos questions"
Disponible : https://www.hydroquebec.com/residentiel/mieux-consommer/offres-pour-economiser-cet-hiver/bilan-questions-reponses.html?utm_source=chatgpt.com
- [27] Hydro-Québec, "Option de gestion de la demande de puissance"
Disponible : <https://www.hydroquebec.com/affaires/espace-clients/tarifs/option-gestion-demande-puissance-admissibilite.html>
- [28] La Presse, "Gérer la demande de pointe autrement"
Disponible : <https://www.lapresse.ca/affaires/2023-11-01/consommation-d-electricite-et-decarbonation/gerer-la-demande-de-la-pointe-autrement.php>
- [29] Gouvernement du Québec, "Raccordement d'une puissance de 5 MW et plus - Onze projets porteurs sélectionnés pour la transition énergétique et le développement économique du Québec Gouvernement du Québec"
Disponible : <https://www.quebec.ca/nouvelles/actualites/details/raccordement-dune-puissance-de-5-mw-et-plus-onze-projets-porteurs-selectionnes-pour-la-transition-energetique-et-le-developpement-economique-du-quebec-56469>)
- [30] Ministère de l'Économie, de l'Innovation et de l'Énergie, "Procédure pour obtenir une autorisation pour le raccordement d'un projet d'une puissance de 5 MW et plus"
Disponible : <https://www.economie.gouv.qc.ca/bibliotheques/conformite/autorisation-projet-electrique>
- [31] Gouvernement du Québec, "Programme d'aide financière ÉcoPerformance pour des projets de transition énergétique"
Disponible : <https://www.quebec.ca/agriculture-environnement-et-ressources->

[naturelles/energie/reussir-ses-projets-transition-energetique/aide-financiere/programme-ecoperformance](#)

[32] Nano One, "What is the 'one pot' battery process? "

Disponible : <https://www.thearmchairtrader.com/nano-one-progress-battery-technology-lfp/>

[33] H. Heimes, A. Kampker, C. Lienemann, M. Locke, and C. Offermanns, *Lithium-ion Battery Cell Production Process*. 2019.

Annexe 1 : Valorisation des MCS au Québec : Gîtes, projets de mise en valeur et mines [12]

MCS	Ressources minérale		Projets de mise en valeur ou de construction et rodage		Mines	
	Lieu	Entreprise	Lieu	Entreprise	Lieu	Entreprise
Lithium	-	-	Whabouchi	Nemaska Lithium	Lithium Amérique du Nord	Sayona Québec
	-	-	Moblan	Soyana Nord/SOQUEM		
	-	-	Rose	Corporation Lithium		
	-	-	Éléments Critiques	-		
	-	-	Baie James Lithium	Allkem		
Graphite	Miller	Canada Carbon	-	-	-	-
	Lac Télépisca	-	-	-	-	-
	Lac Knife	Focus Graphite inc.	-	-	-	-
	Lac Guéret	Mason Graphite	-	-	-	-
	Mousseau West	Nothern Graphite Corp.	La Loutre	Lomiko Metals inc.	Lac-des-îles	Nothern Graphite inc.
	Lac Rainy Nord	Metals Australia Ltd	-	-	-	-
	Berkwood Graphite	Green Battery Metals inc.	-	-	-	-
Bell Graphite	Volt Carbon Technologies	-	-	-	-	
Titane ou vanadium	Vanadium-Lac Doré	Vanadiumcorp Resource inc	BlackRock	Métaux BlackRock inc.	Lac Tio	Rio Tinto et Titane
	Magpie	The Magpie Mines inc.	-	-	-	-
	Iron-T	Vanadiumcorp Resource inc	Mont Sorcier	Voyager Metals inc.	Niobec	Magris Resources inc.
-	Lac la Blache	Splendor Titane inc.	-	-	-	-
Niobium	Crevier	Les métaux Crevier inc.	-	-	-	-
Zinc et cuivre	-	-	Abcourt-Barvue	Mines Abcourt inc.	Bracemac-McLeod	Grlecore Canada Corporation
	-	-	Lac Scott	Les Ressources Yorbeau inc.	Langlois (Grevet)	Ressources Breakwater

MCS	Ressources minérale		Projets de mise en valeur ou de construction et rodage		Mines	
	Lieu	Entreprise	Lieu	Entreprise	Lieu	Entreprise
Nickel, cuivre, cobalt et éléments du groupe du platine	Lac Rocher	Victory Nickel inc.				
	Nisk-1	Power Nickel				
	Grasset	Wallbridge Mining Company	Dumont Nickel	Magneto Investments Limited Partnership	Raglan	Glencore Canada Corporation
	Bravo	Exploitation minière Jien Nunavik Itée				
	Hawk Ridge	Nickel North Exploitation Corp				
Éléments de terres rares	Crater Lake	Imperial Mining Group Ltd	Kwyjibo	SOQUEM	-	-
	Kipawa (zeus)	Vital Metals Ltd				
	Niobec - REE Zone	Magris Resources	Strange Lake – Zone B	Métaux Torngat Itée	-	-
	Carbonatite de Montviel	Ressources Géoméga inc.				
	Eldor (Ashram)	Commerce Resources Corporation				

Annexe 2 : Coût, débit et consommation d'énergie des procédés de fabrication d'une cellule Lithium-ion

Procédés de production	Coût par an/USD ³ Nelson et al., 2019 [14]	Taux %	Durée Heimes et al., 2019a [33]	Procédés de production	Consommation énergétique Par cellule/kWh	Taux %
Mélange de la préparation du lisier	7 396 000	7,91%	30 min – 5 h	Mélange de la préparation du lisier	0,11	0,83%
Revêtement / séchage	13 984 000	14,96%	35 – 80m/min	Revêtement	0,18	1,36%
Récupération des solvants	4 296 000	4,6%	NA	Séchage et récupération des solvants	6,22	46,84%
Calandrage	4 849 000	5,19%	60 – 100 m/min	Calandrage	0,38	2,86%
Découpage des feuilles	2 891 000	3,09%	80 – 150m/min	Découpage des feuilles	0,71	5,35%
Séchage sous vide	2 990 000	3,2%	12 – 13h	Empilage	0,77	5,8%
Empilage	8 086 000	8,65%	NA	Soudure	0,25	1,88%
Soudure	6 864 000	7,34%	NA	Enrobage	0,69	5,2%
Enrobage	11 636 000	12,45%	Dépend du design de la cellule	Mise en forme	0,07	0,53%
Mise en forme	30 482 750	32,61%	Jusqu'à 1,5 – 3 semaines	Salle de séchage	3,9	29,37%

³Le coût de fabrication comprend la dépréciation de l'équipement, le coût de la main-d'œuvre et le coût de l'espace au sol de l'usine.