

Matériaux de la transition énergétique : **État de la situation et pistes de solution**



Étude réalisée par Stantec Experts-conseils ltée à la demande de RECYC-QUÉBEC
10 novembre 2022

Registre d'approbation

Les conclusions du Rapport, intitulé *Étude sur les matériaux de la transition énergétique* reflètent l'opinion professionnelle de Stantec au moment de la rédaction du Rapport et concernent la portée du mandat décrite dans le Rapport. Les opinions contenues dans ce document sont basées sur les conditions et les informations existantes au moment de la publication du document et ne tiennent compte d'aucune modification ultérieure. Le Rapport ne concerne que le projet pour lequel les services de Stantec ont été retenus et l'objectif énoncé pour lequel le Rapport a été préparé. Le Rapport ne doit pas être utilisé afin de modifier ou de prolonger le projet, ou à tout autre fin ou projet, et toute utilisation non autorisée par quiconque est aux risques de ce dernier.

Stantec a présumé que toutes les informations reçues de RECYC-QUÉBEC (le « Client ») et de tierces parties pour la préparation du Rapport sont exactes. Bien que Stantec ait exercé un jugement et une diligence raisonnable dans l'utilisation de ces informations, Stantec n'assume aucune responsabilité quant aux conséquences découlant d'omissions ou d'erreurs qui pourraient être incluses dans lesdites informations.

Ce Rapport est destiné à l'usage exclusif du Client, en conformité avec le contrat conclu entre Stantec et le Client. Bien que le Rapport puisse être remis aux autorités compétentes applicables et autres parties envers lesquelles le Client est responsable, Stantec ne garantit les services à aucune tierce partie. Aucune autre partie ne pourra avoir recours au rapport sans le consentement exprès de Stantec, lequel sera accordé à l'entière discrétion de Stantec.

Préparé par _____
(signature)

Alexane Satgé

Préparé par _____
(signature)

Marie Sublet

Préparé par _____
(signature)

Hugo Jabbour

Vérifié par _____
(signature)

Julien Rosset

Approuvé par _____
(signature)

Valérie Lavoie

Révision	Description	Auteurs	Vérification qualité	Revue indépendante
A	Rapport préliminaire	A. Satgé, M. Sublet, H. Jabbour	J. Rosset	Valérie Lavoie
0	Rapport final	A. Satgé, M. Sublet, H. Jabbour	J. Rosset	Valérie Lavoie
1	Rapport final modifié	A. Satgé, M. Sublet, H. Jabbour	J. Rosset	Valérie Lavoie
2	Rapport final modifié	A. Satgé, M. Sublet	J. Rosset	Valérie Lavoie



Table des matières

1.0	MISE EN CONTEXTE	1
2.0	MÉTHODOLOGIE	3
2.1	PRODUITS VISÉS PAR L'ÉTUDE	3
2.1.1	Démarche	3
2.1.2	Modalités de sélection	3
2.1.3	Sélection des produits	3
2.1.4	Liste des produits et composants retenus pour l'étude	5
2.2	QUANTITÉS MISES EN MARCHÉ ET EN FIN DE VIE	5
2.2.1	Approche et limites	5
2.3	STRATÉGIES D'ÉCONOMIE CIRCULAIRE	6
3.0	ÉNERGIE ÉOLIENNE	9
3.1	DESCRIPTION	9
3.2	QUANTITÉS MISES EN MARCHÉ ET EN FIN DE VIE	11
3.2.1	Approche méthodologique	11
3.2.2	Résultats	12
3.3	PROCESSUS ACTUELS DE CONCEPTION ET GESTION EN FIN DE VIE	13
3.3.1	Conception	13
3.3.2	Gestion en fin de vie	14
3.4	BONNES PRATIQUES, FREINS ET ENJEUX	16
3.4.1	Stratégie 1 : écoconception	16
3.4.2	Stratégie 2 : consommation et approvisionnement responsables	17
3.4.3	Stratégie 3 : optimisation des opérations	17
3.4.4	Stratégie 4 : économie collaborative	18
3.4.5	Stratégie 5 : location	18
3.4.6	Stratégie 6 : entretien et réparation	18
3.4.7	Stratégie 7 : don et revente	19
3.4.8	Stratégie 8 : reconditionnement	21
3.4.9	Stratégie 9 : économie de fonctionnalité	21
3.4.10	Stratégie 10 : écologie industrielle	21
3.4.11	Stratégie 11 : recyclage et compostage	21
3.4.12	Stratégie 12 : valorisation	22
4.0	ÉNERGIE SOLAIRE	24
4.1	DESCRIPTION	24
4.2	QUANTITÉS MISES EN MARCHÉ ET EN FIN DE VIE	25
4.2.1	Approche méthodologique	25
4.2.2	Résultats	27
4.3	PROCESSUS ACTUELS DE CONCEPTION ET GESTION EN FIN DE VIE	29
4.3.1	Conception	29
4.3.2	Gestion en fin de vie	32
4.4	BONNES PRATIQUES, FREINS ET ENJEUX	33
4.4.1	Stratégie 1 : écoconception	33
4.4.2	Stratégie 2 : consommation et approvisionnement responsables	36
4.4.3	Stratégie 3 : optimisation des opérations	36



4.4.4	Stratégie 4 : économie collaborative.....	36
4.4.5	Stratégie 5 : location	36
4.4.6	Stratégie 6 : entretien et réparation	36
4.4.7	Stratégie 7 : don et revente	38
4.4.8	Stratégie 8 : reconditionnement.....	39
4.4.9	Stratégie 9 : économie de fonctionnalité.....	39
4.4.10	Stratégie 10 : écologie industrielle.....	39
4.4.11	Stratégie 11 : recyclage et compostage	40
4.4.12	Stratégie 12 : valorisation	41
5.0	TRANSPORT ÉLECTRIQUE	42
5.1	QUANTITÉS MISES EN MARCHÉ ET EN FIN DE VIE	42
5.1.1	Description	42
5.1.2	Approche méthodologique	46
5.1.3	Résultats	52
5.2	PROCESSUS ACTUELS DE CONCEPTION ET GESTION EN FIN DE VIE.....	54
5.2.1	Conception.....	54
5.2.2	Gestion en fin de vie	56
5.2.3	Bonnes pratiques, freins et enjeux	59
6.0	PRODUCTION D'HYDROGÈNE PAR ÉLECTROLYSE.....	70
6.1	QUANTITÉS MISES EN MARCHÉ ET EN FIN DE VIE	70
6.1.1	Description	70
6.1.2	Approche méthodologique	72
6.1.3	Résultats	74
6.2	PROCESSUS ACTUELS DE CONCEPTION ET GESTION EN FIN DE VIE.....	75
6.2.1	Conception.....	75
6.2.2	Gestion en fin de vie	76
6.2.3	Bonnes pratiques, freins et enjeux	76
7.0	CONCLUSION	78
7.1	SYNTHÈSE DES QUANTITÉS.....	78
7.1.1	Quantités en 2021	78
7.1.2	Quantités en 2030.....	80
7.1.3	Quantités en 2050.....	82
7.2	RECOMMANDATIONS	84
7.2.1	Énergie éolienne	84
7.2.2	Énergie solaire	84
7.2.3	Transport électrique	85
7.2.4	Production d'hydrogène par électrolyse	86
8.0	RÉFÉRENCES.....	87



LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Liste des minéraux critiques et stratégiques du Québec	1
Tableau 2	Sélection des produits.....	4
Tableau 3	Liste des produits et composantes retenus	5
Tableau 4	Liste et définition des 12 stratégies d'économie circulaire (source : Québec Circulaire).....	6
Tableau 5	Parcs éoliens au Québec.....	9
Tableau 6	Matériaux utilisés selon les composantes – énergie éolienne	10
Tableau 7	Approche méthodologique – énergie éolienne	11
Tableau 8	Quantités estimées de matériaux utilisés – énergie éolienne (t/an).....	12
Tableau 9	Quantités estimées de matériaux générés – énergie éolienne (t/an).....	13
Tableau 10	Liste des manufacturiers des éoliennes installées dans les parcs éoliens Québécois.....	14
Tableau 11	Pratiques actuelles de gestion en fin de vie des éoliennes au Québec et à l'international.....	15
Tableau 12	Liste des récupérateurs, conditionneurs et recycleurs actuels des composantes des parcs éoliens au Québec et à l'international	16
Tableau 13	Proportion des différents types de panneaux solaires installés (AIE, 2020).....	25
Tableau 14	Matériaux utilisés selon les composantes – énergie solaire	25
Tableau 15	Approche méthodologique – énergie solaire	26
Tableau 16	Quantités estimées de matériaux utilisés – énergie solaire (t/an).....	27
Tableau 17	Quantités estimées de matériaux générés – énergie solaire (t/an).....	28
Tableau 18	Classement des 10 premiers manufacturiers de panneaux solaires dans le monde.....	30
Tableau 19	Principaux manufacturiers nord-américains	31
Tableau 20	Répartition des manufacturiers de panneaux solaires dans les parcs solaires du Québec	31
Tableau 21	Principaux manufacturiers d'ondulateur pour parc solaire (en chiffres d'affaires) (Source : IHS PV Inverter Market tracker Q3, 2019).....	31
Tableau 22	Causes de défaillances qui affectent les panneaux solaires (source : Md Shahariar Chowdhury et al., janvier 2022)	37
Tableau 23	Matériaux utilisés selon les composantes – véhicules électriques.....	44
Tableau 24	Différents types de batterie	44
Tableau 25	Type de borne de recharge	44
Tableau 26	Approche méthodologique – véhicules électriques légers	47
Tableau 27	Approche méthodologique – véhicules électriques lourds	48
Tableau 28	Approche méthodologique – bornes de recharge.....	50
Tableau 29	Quantités estimées de matériaux utilisés par le transport électrique – VE légers, lourds et bornes de recharge (t/an).....	52
Tableau 30	Quantités estimées de matériaux générés par le transport électrique – VE légers, lourds et bornes de recharge (t/an).....	53
Tableau 31	Liste des manufacturiers de VEÉ, VHR et VÉPC légers québécois et internationaux	54
Tableau 32	Liste des manufacturiers de VEÉ, VHR et VÉPC lourds québécois et internationaux	55
Tableau 33	Principaux manufacturiers de bornes de recharge pour VEÉ et VHR au Québec et à l'international	55
Tableau 34	Pratiques actuelles de gestion en fin de vie des VÉ légers et lourds.....	56



Tableau 35	Liste des récupérateurs, conditionneurs et recycleurs actuels des composantes de VÉ légers et lourds au Québec et à l'international	57
Tableau 36	Pratiques actuelles de gestion en fin de vie des bornes de recharge au Québec	58
Tableau 37	Projets d'électrolyseurs au Québec	71
Tableau 38	Matériaux utilisés selon les composantes – hydrogène par électrolyse	72
Tableau 39	Approche méthodologique – hydrogène par électrolyse	73
Tableau 40	Quantités estimées de matériaux utilisés – hydrogène (t/an)	74
Tableau 41	Quantités estimées de matériaux générés – hydrogène (t/an)	74
Tableau 42	Liste des manufacturiers d'électrolyseurs alcalins ou MEP au Québec et à l'international	75
Tableau 43	Possibilité de recyclage des matériaux utilisés dans la production d'hydrogène	77
Tableau 44	Quantités estimées de matériaux utilisés en 2021 (t)	78
Tableau 45	Quantités estimées de matériaux générés en 2021 (t)	79
Tableau 46	Quantités estimées de matériaux utilisés en 2030 (t)	80
Tableau 47	Quantités estimées de matériaux générés en 2030 (t)	81
Tableau 48	Quantités estimées de matériaux utilisés en 2050 (t)	82
Tableau 49	Quantités estimées de matériaux générés en 2050 (t)	83
Tableau 50	Recommandations - énergie éolienne	84
Tableau 51	Recommandations - énergie solaire	84
Tableau 52	Recommandations – transport électrique	85
Tableau 53	Ratios de composition des parcs éoliens (kg/MW)	Annexe B
Tableau 54	Ratios de composition des parcs solaires (kg/MW)	Annexe C
Tableau 55	Ratios de composition des batteries LFP	Annexe D
Tableau 56	Ratios de composition des batteries NCA+	Annexe D
Tableau 57	Ratios de composition des batteries NMC622	Annexe D
Tableau 58	Ratios de composition des moteurs électriques	Annexe D
Tableau 59	Ratios de composition des piles à combustible	Annexe D
Tableau 60	Ratios de composition des bornes de recharge résidentielles et publiques de niveau 2	Annexe D
Tableau 61	Ratios de composition des bornes de recharge BRCC publiques et véhicules électriques lourds	Annexe D
Tableau 62	Quantités estimées de matériaux utilisés – VEÉ légers (t/an)	Annexe E
Tableau 63	Quantités estimées de matériaux générés – VEÉ légers (t/an)	Annexe E
Tableau 64	Quantités estimées de matériaux utilisés – VHR légers (t/an)	Annexe E
Tableau 65	Quantités estimées de matériaux générés – VHR légers (t/an)	Annexe E
Tableau 66	Quantités estimées de matériaux utilisés – VÉPC légers (t/an)	Annexe E
Tableau 67	Quantités estimées de matériaux générés – VÉPC légers (t/an)	Annexe E
Tableau 68	Quantités estimées de matériaux utilisés – VEÉ lourds (t/an)	Annexe E
Tableau 69	Quantités estimées de matériaux générés – VEÉ lourds (t/an)	Annexe E
Tableau 70	Quantités estimées de matériaux utilisés – VHR lourds (t/an)	Annexe E
Tableau 71	Quantités estimées de matériaux générés – VHR lourds (t/an)	Annexe E
Tableau 72	Quantités estimées de matériaux utilisés – VÉPC lourds (t/an)	Annexe E
Tableau 73	Quantités estimées de matériaux générés – VÉPC lourds (t/an)	Annexe E
Tableau 74	Quantités estimées de matériaux utilisés – bornes de recharge (t/an) ...	Annexe E
Tableau 75	Quantités estimées de matériaux générés – bornes de recharge (t/an) .	Annexe E
Tableau 76	Ratios de composition des électrolyseurs alcalins	Annexe F
Tableau 77	Ratios de composition des électrolyseurs MEP	Annexe F



LISTE DES FIGURES

Figure 1	Composition d'une éolienne (source : Canadian Wind Energy Association)	10
Figure 2	Pâle d'éolienne transformée en abri vélo à Aalborg au Danemark (source : www.renouvelle.be).....	19
Figure 3	Pâle d'éolienne transformée en bancs publics à Rotterdam aux Pays-Bas (source : www.renouvelle.be).....	20
Figure 4	Pâle d'éolienne transformée en plaine de jeux à Rotterdam aux Pays-Bas (source : www.renouvelle.be).....	20
Figure 5	Transformation de la fibre de verre des pales éoliennes en différents matériaux (source : www.globalfiberglassinc.com/).....	22
Figure 6	Composition d'une installation solaire (source : Hydro-Québec)	24
Figure 7	Composition d'un panneau solaire (source : Jade Technologie)	29
Figure 8	Coupe transversale d'une cellule de panneau solaire (source : NERGICA)	30
Figure 9	Installation de modules sans cadre au Mall Mass Transit Center à Lauderhill (Floride) (source : lumossolar.com)	34
Figure 10	Installation de modules sans cadre à l'Université de Californie à Irvine (Californie) (source : lumossolar.com).....	34
Figure 11	Procédé de recyclage d'une cellule de panneau solaire (Source : Association canadienne de l'énergie renouvelable).....	40
Figure 12	Composition d'un VEÉ (source : U.S. Department of Energy).....	42
Figure 13	Composition d'un VHR (source : U.S. Department of Energy).....	43
Figure 14	Composition d'un VÉPC (source : U.S. Department of Energy)	43
Figure 15	Borne de recharge résidentielle de niveau 2 (source : Bosch EV Solution)	45
Figure 16	Borne de recharge publique de niveau 2 (source : Circuit électrique).....	45
Figure 17	Borne de recharge BRCC publique (source : Circuit électrique).....	46
Figure 18	Borne de recharge BRCC pour véhicules électriques lourds (source : Heliox)	46
Figure 19	Centre d'entretien des batteries du groupe Volkswagen	61
Figure 20	Réutilisation de batteries de VÉ usagées dans des tracteurs de remorquage	62
Figure 21	Stockage d'énergie stationnaire par d'anciennes batteries de VÉ (source : Groupe Renault)	63
Figure 22	Ceinture de protection en métal pour bornes de recharge (source : bollardstreet.com)	67
Figure 23	Poteaux de protection pour les équipements gaziers (source : energir.com).....	67
Figure 24	Station d'hydrogène HTEC à Québec (source : Stantec)	71
Figure 25	Centrale à hydrogène par électrolyseur MEP (source : NEL Hydrogen Electrolysers)	72



LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A	LISTE DES PRODUITS DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE
ANNEXE B	RATIOS DE COMPOSITION DES PARCS ÉOLIENS
ANNEXE C	RATIOS DE COMPOSITION DES PARCS SOLAIRES
ANNEXE D	RATIOS DE COMPOSITION DES VÉHICULES ÉLECTRIQUES
ANNEXE E	TABLEAUX DÉTAILLÉS DES QUANTITÉS UTILISÉES ET GÉNÉRÉES DU SECTEUR DU TRANSPORT ÉLECTRIQUE
ANNEXE F	RATIOS DE COMPOSITION DES ÉLECTROLYSEURS



Abréviations

ADEME	Agence de la transition écologique (France)
AIE	Agence internationale de l'énergie
AVEQ	Association des véhicules électriques du Québec
BRCC	Borne de recharge à courant continu
CSR	Combustible solide de récupération
CTTÉI	Centre de transfert et de technologie en écologie industrielle
DEEE	Déchets des équipements électriques et électroniques
ETR	Éléments des terres rares
ÉVA	Éthylène-acétate de vinyle
IRENA	International Renewable Energy Agency
LFP	Lithium, fer, phosphate
MCS	Minéraux critiques et stratégiques
MELCC	Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
MEP	Membrane échangeuse de protons
MERN	Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles
MGP	Métaux du groupe du platine
MW	Mégawatt
NCA	Nickel, cobalt, aluminium
NMC	Nickel, manganèse, cobalt
NREL	National Renewable Energy Laboratory
SAAQ	Société de l'assurance automobile du Québec
SEIA	Solar Energy Industry Association
VEÉ	Véhicule entièrement électrique
VHR	Véhicule hybride rechargeable
VÉPC	Véhicule électrique à pile à combustible



1.0 MISE EN CONTEXTE

Selon le ministère des Ressources naturelles et des Forêts, la transition énergétique correspond à l'abandon progressif de l'énergie produite à partir de combustibles fossiles en faveur des diverses formes d'énergie renouvelable. Elle correspond également à des changements dans les comportements afin d'éliminer la surconsommation et le gaspillage d'énergie, tout en favorisant l'émergence d'une culture d'efficacité énergétique dans tous les secteurs. Les secteurs de l'électrification des transports et des énergies renouvelables font partie de la transition énergétique, et, favorisés par la *Politique de mobilité durable 2030* et le *Plan pour une économie verte 2030* au niveau provincial et par l'interdiction de la vente de véhicules à combustion interne à partir de 2035 au niveau fédéral, ils sont en pleine croissance et vont se développer largement dans les prochaines décennies.

Ce contexte va entraîner des changements majeurs dans les infrastructures, les équipements et matériaux en lien avec la production, le stockage, la transmission, la distribution et la consommation de l'énergie. Des systèmes de production d'énergie renouvelable déjà présents, comme les éoliennes et les panneaux solaires, vont continuer à largement se développer dans les prochaines décennies, tandis que d'autres équipements ou produits actuellement peu répandus ou encore au stade de la recherche et du développement vont voir leur production et leur consommation croître de façon très importante notamment les batteries de véhicules électriques, les bornes de recharge, les piles à combustible, la production d'hydrogène vert et les dispositifs de stockage. La fabrication de ces équipements nécessite l'utilisation de minéraux critiques et stratégiques (MCS), tels que le lithium pour les batteries des véhicules électriques, mais également le nickel, le graphite et le cobalt entre autres. Les minéraux critiques et stratégiques identifiés dans le *Plan québécois pour la valorisation des minéraux critiques et stratégiques 2020-2025* sont présentés dans le tableau 1.

Tableau 1 Liste des minéraux critiques et stratégiques du Québec

Minéraux critiques	Minéraux stratégiques	
Minéraux qui revêtent aujourd'hui une importance économique pour des secteurs clés de l'économie québécoise, qui présentent un risque élevé en matière d'approvisionnement et qui n'ont pas de substituts offerts commercialement.	Substances minérales nécessaires à la mise en œuvre de différentes politiques du Québec.	Substances minérales ayant un potentiel de mise en valeur au Québec.
Antimoine - Sb Bismuth - Bi Cadmium - Cd Césium - Cs Cuivre - Cu Étain - Sn Gallium - Ga Indium - In Tellure - Te Zinc - Zn	Cobalt - Co Élément des terres rares – ETR Métaux du groupe du platine – MGP Graphite (carbone) - C Lithium - Li Nickel - Ni	Magnésium - Mg Niobium - Nb Scandium - Sc Tantale - Ta Titane - Ti Vanadium - V



La demande pour ces minéraux est de plus en plus forte et leur approvisionnement est devenu un enjeu stratégique mondial. Actuellement, certains équipements atteignent déjà la fin de leur cycle de vie qui peut varier entre 12 et 30 ans et doivent être gérés. Leur nombre va largement augmenter dans les prochaines décennies et leur gestion va devenir un enjeu important si elle n'a pas été pensée et planifiée en amont.

Ainsi, cette étude vise à obtenir une vue d'ensemble au Québec du secteur des produits issus de la transition énergétique spécifiquement dans les secteurs de l'électrification des transports et des énergies renouvelables dans une perspective de conservation et de préservation des ressources naturelles.

Plus spécifiquement, l'étude traite des produits utilisés dans le secteur de l'électrification des transports et des énergies renouvelables, leur composition en minéraux critiques et stratégiques, ainsi que les quantités actuelles et futures mises en marché et générées en fin de vie. L'étude couvre également les processus de conception et de gestion en fin de vie, les principaux débouchés pour ces produits au Québec, au Canada et à l'international, les bonnes pratiques permettant une meilleure gestion des ressources, ainsi que les freins et enjeux actuels et potentiels. Les modes de récupération et les acteurs impliqués dans la gestion en fin de vie sont aussi abordés. Finalement, des recommandations et pistes d'action par produit sont formulées pour les douze stratégies d'économie circulaire.



2.0 MÉTHODOLOGIE

2.1 PRODUITS VISÉS PAR L'ÉTUDE

La première étape de l'étude était d'établir la liste des produits visés en fonction des secteurs des énergies renouvelables et aussi pour le volet de l'électrification des transports.

2.1.1 Démarche

Dans un premier temps, les secteurs et sous-secteurs d'activité ont été identifiés :

- Énergies renouvelables : énergie solaire, énergie éolienne, bioénergies, énergie hydraulique, hydrogène vert;
- Transport électrique : Deux-roues, véhicules de loisir, véhicules légers, véhicules lourds, équipements lourds, trains et tramways, bateaux, aéronefs/drones, bâtiments et transports urbains par câble.

Par la suite, les produits ont été listés par secteur et sous-secteur. L'établissement des critères de sélection a permis d'établir une première liste qui a été soumise à RECYC-QUÉBEC pour discussion et commentaires. Certains sous-secteurs ont été écartés de l'étude. Les raisons sont détaillées à la section 2.2. Enfin, pour chaque produit sélectionné, une liste des composantes a été établie.

La liste détaillée des produits et composantes est présentée à l'annexe A.

2.1.2 Modalités de sélection

Les critères ayant permis la sélection des produits retenus pour l'étude sont les suivants :

1. Perspective de développement importante;
2. Large diffusion;
3. Présence de minéraux critiques et stratégiques.

L'étude vise en effet les produits qui vont se développer de façon exponentielle dans les années et décennies à venir, créant des enjeux au niveau des ressources requises à leur fabrication. Elle se concentre également sur les produits qui sont ou seront largement diffusés dans la société, créant un potentiel enjeu de récupération. Enfin l'étude vise plus spécifiquement des produits contenant des minéraux critiques et stratégiques.

2.1.3 Sélection des produits

Les sous-secteurs et produits ont été analysés, puis certains ont été sélectionnés en discussion avec RECYC-QUÉBEC. Les autres ont été écartés parce qu'ils ne répondaient pas à l'ensemble des critères identifiés. Le tableau 2 présente la démarche.



Tableau 2 Sélection des produits

Sous-secteur d'activité	Produit	Analyse	Sélection
Énergie éolienne	Éolienne	Perspective de développement importante Présence de minéraux critiques et stratégiques	Oui
Énergie solaire	Panneau solaire thermique	Perspective de développement moyenne Présence limitée de minéraux critiques et stratégiques	Non
Énergie solaire	Panneau solaire photovoltaïque	Perspective de développement importante Présence de minéraux critiques et stratégiques	Oui
Énergie solaire	Centrale thermique à concentration	Perspective de développement très limitée au Québec Diffusion limitée (installations centralisées) Présence limitée de minéraux critiques et stratégiques	Non
Bioénergies	Système de chauffage à la biomasse Centrale électrique à la biomasse	Perspective de développement moyenne Diffusion limitée (installations centralisées) Présence limitée de minéraux critiques et stratégiques	Non
	Usine de gazéification – pyrolyse Usine de biométhanisation	Perspective de développement moyenne Diffusion limitée (installations centralisées) Présence limitée de minéraux critiques et stratégiques	Non
Énergie hydraulique	Centrale hydroélectrique Hydrolienne Usine marémotrice Usine houlomotrice	Perspective de développement moyenne Diffusion limitée (installations centralisées) Présence limitée de minéraux critiques et stratégiques	Non
Hydrogène vert	Usine de production d'hydrogène par électrolyse	Perspective de développement possiblement importante Diffusion limitée (installations centralisées) Présence de minéraux critiques et stratégiques	Oui
Hydrogène vert	Usine de production d'hydrogène à partir de biomasse	Diffusion limitée (installations centralisées) Présence limitée de minéraux critiques et stratégiques	Non
Véhicules électriques légers	Automobiles, camions légers	Perspective de développement très importante Large diffusion Présence importante de minéraux critiques et stratégiques	Oui
Véhicules électriques légers	Deux roues Quatre roues hors route	Bien que les perspectives de développement soient importantes et la diffusion large, le nombre et la taille de ces véhicules font en sorte que les quantités de matériaux sont limitées	Non
Véhicules électriques lourds	Camions lourds, bus	Perspective de développement importante Diffusion significative Présence importante de minéraux critiques et stratégiques	Oui
Véhicules électriques lourds	Équipement lourd	Perspective de développement moyenne Diffusion limitée	Non
Autres véhicules électriques	Matériel roulant sur rail Bateau Aéronef	Perspective de développement limitée Diffusion limitée	Non
Transport dans les bâtiments Transport urbain par câble	Ascenseur, escalier mécanique, tapis mécanique Téléphérique, télésiège/télécabine, funiculaire	Perspective de développement limitée Diffusion limitée Présence limitée de minéraux critiques et stratégiques	Non

2.1.4 Liste des produits et composants retenus pour l'étude

Le tableau 3 présente la liste des produits et composants retenus pour l'étude.

Tableau 3 Liste des produits et composants retenus

Sous-secteur d'activité	Produit	Composantes
Énergie éolienne	Éolienne	Rotor (Pales, moyeu, nez et contrôleur d'inclinaison des pâles) Nacelle et transformateur Mât Fondation Câblage
Énergie solaire	Parc solaire Installation solaire sur bâtiment	Panneaux solaires et câblage Transformateur Condensateur Support et fondations
Hydrogène vert	Usine de production d'hydrogène par électrolyse	Compresseur Sécheur Séparateurs de O ₂ et H ₂ Électrolyseur
Véhicules électriques	Véhicules électriques légers (automobiles, camions légers)	Batterie Moteur électrique
	Véhicules électriques lourds (camions lourds, bus)	Batterie Moteur électrique
	Bornes de recharge	Borne de recharge Câblage
	Véhicules légers* et lourds à hydrogène	Pile à combustible Moteur électrique

* bien que les véhicules légers à hydrogène ne fassent pas partie des secteurs à privilégier dans la Stratégie québécoise sur l'hydrogène vert et les bioénergies, ils existent dans le parc automobile et devront être gérés en fin de vie. Ils ont donc été retenus pour l'étude.

2.2 QUANTITÉS MISES EN MARCHÉ ET EN FIN DE VIE

2.2.1 Approche et limites

Dans les sections suivantes, les quantités de produits et matériaux utilisés et générés ont été estimées pour les années 2021, 2030 et 2050 lors de la mise en place, de l'opération et de la fin de vie des infrastructures et équipements requis pour la transition énergétique.

Les quantités utilisées incluent les quantités liées aux infrastructures et équipements additionnels mis en place et ceux devant être remplacés pour cause de bris, perte ou fin de vie.

Les quantités générées regroupent les infrastructures et équipements devant être remplacés aux différentes étapes du cycle de vie (transport, installation, opération, fin de vie), mais la production est exclue.



Les hypothèses générales suivantes ont été utilisées :

- Dans le cadre de la croissance importante des infrastructures et équipements requis pour la transition énergétique, il a été considéré que ceux en fin de vie sont remplacés par des nouveaux;
- Les projections utilisées reflètent l'atteinte en 2030 et 2050 des objectifs gouvernementaux visant la neutralité carbone. Ces objectifs pourraient cependant ne pas être atteints, révélant ainsi un développement moins important des secteurs considérés;
- Les quantités ont été estimées à partir de ratios (kg/kW ou kg/kWh) et des durées de vie des technologies actuelles. Néanmoins, le rapport poids / puissance ou poids / capacité va certainement diminuer à l'avenir, comme cela s'est observé durant la dernière décennie. Certains matériaux pourraient être réduits et les durées de vie pourraient augmenter;
- Les comportements des consommateurs ont été considérés comme stables dans le temps, sans que des modifications substantielles du contexte fiscal, économique, réglementaire ou technologique puissent les modifier, tant en matière d'achat de véhicules électriques que de besoins énergétiques;
- Des technologies émergentes ou non encore connues vont très probablement apparaître au cours des prochaines décennies et cela pourrait avoir des impacts sur la nature et les quantités des matériaux utilisés et générés.

Il résulte de ces hypothèses que les quantités utilisées et générées estimées pour 2030 et 2050 dans cette étude sont probablement un maximum.

2.3 STRATÉGIES D'ÉCONOMIE CIRCULAIRE

L'analyse des bonnes pratiques et les recommandations proposées vont être détaillées selon les 12 stratégies d'économie circulaire, décrites au tableau 4.

Tableau 4 Liste et définition des 12 stratégies d'économie circulaire (source : Québec Circulaire)

Stratégie	Définition	Parties prenantes impliquées
1. Écoconception	Stratégie visant, dès la phase de conception, à prendre en compte les impacts environnementaux potentiels des produits en cherchant à les minimiser. L'étape de conception est déterminante pour réduire la quantité de ressources vierges requise dans la fabrication des produits, pour améliorer leur fiabilité et allonger leur durée de vie et enfin favoriser leur récupération, leur réemploi et leur recyclage.	Fabricants de produits
2. Consommation et approvisionnement responsables	Stratégie visant à enrichir les démarches de consommation et d'approvisionnement responsables par le modèle de l'économie circulaire en proposant de nouveaux critères de consommation et d'achat centrés sur l'usage optimal de nos ressources.	Fournisseurs de matériaux Fabricants de produits Exploitants, utilisateurs



Stratégie	Définition	Parties prenantes impliquées
3. Optimisation des opérations	Stratégie proposant un virage en matière de réduction de consommation de ressources, au sein des opérations d'une entreprise, en ciblant plus efficacement les ressources prioritaires à économiser et en trouvant plus facilement des débouchés pour les rejets ou les sous-produits.	Fabricants de produits Exploitants, utilisateurs
4. Économie collaborative	Stratégie visant à maximiser l'usage des biens et produits en circulation dans le marché en mettant en place des modèles d'échange.	Exploitants, utilisateurs
5. Location	Stratégie visant l'intensification de l'usage d'un bien en évitant aux clients d'avoir à acheter un bien dont ils ne se servent qu'occasionnellement.	Loueurs d'équipements Exploitants, utilisateurs
6. Entretien et réparation	Stratégie visant à prolonger la durée de vie des produits et pouvant être réalisée par le consommateur lui-même, un organisme spécialisé, le distributeur ou le fabricant.	Fabricants, distributeurs Installateurs, réparateurs Exploitants, utilisateurs
7. Don et revente	Stratégie visant à remettre en circulation les produits qui ne sont plus utilisés par un utilisateur, mais qui sont encore en bon état et utilisables par d'autres.	Fabricants, distributeurs Installateurs Exploitants, utilisateurs Récupérateurs
8. Reconditionnement	Stratégie visant la remise à neuf d'un produit ou d'un composant avec une garantie équivalente ou proche de celle du neuf.	Fabricants, distributeurs Installateurs Exploitants, utilisateurs Récupérateurs
9. Économie de fonctionnalité	Stratégie visant à promouvoir la vente d'une performance d'usage des produits et non les produits eux-mêmes.	Fabricants, distributeurs Exploitants, utilisateurs
10. Écologie industrielle	Stratégie visant à optimiser l'utilisation des ressources par les entreprises industrielles d'un territoire, en mettant en place des échanges (synergies) de flux de matières, d'énergie ou de ressources entre deux ou plusieurs entités. La mise en valeur d'un sous-produit, d'un résidu, ou de l'énergie disponible permettant ainsi un gain environnemental tout en présentant de nouvelles occasions d'affaires pour les entreprises symbiotiques.	Fournisseurs de matériaux Fabricants de produits Recycleurs
11. Recyclage et compostage	Le recyclage est l'utilisation, dans un procédé manufacturier, d'une matière récupérée en remplacement d'une matière vierge. L'économie circulaire permet de mettre en place les boucles de recyclage les plus courtes possibles et ainsi, de privilégier les marchés locaux de recyclage plutôt que les marchés d'exportation. Le compostage est un traitement aérobie (en présence d'oxygène) des matières organiques, qui crée un produit solide mature : le compost. Le compost est un produit stable, riche en composés humiques, qui permet aux matières	Exploitants, utilisateurs Récupérateurs, recycleurs



Stratégie	Définition	Parties prenantes impliquées
	organiques de retourner au sol pour l'enrichir en tant qu'amendement.	
12. Valorisation	Stratégie visant à éviter l'élimination et qui regroupe toute opération permettant d'obtenir des produits utiles ou de l'énergie à partir des matières résiduelles.	Exploitants, utilisateurs Récupérateurs, valorisateurs

3.0 ÉNERGIE ÉOLIENNE

3.1 DESCRIPTION

Les éoliennes sont principalement installées dans des parcs éoliens. Au total, selon le ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN, 2022), ce sont 1 985 éoliennes qui ont été installées au Québec entre 1999 et 2021, principalement dans la région de la Gaspésie-îles-de-le-Madeleine. Le tableau 5 détaille les puissances moyennes par éolienne en fonction de l'année de mise en service, ainsi que le nombre d'éoliennes installées.

Tableau 5 Parcs éoliens au Québec

Années de mise en service	Puissance moyenne par éolienne (MW)	Nombre d'éoliennes installées
1999	0,8	132
2004	1,8	30
2005	1,8	30
2006	1,5	73
2007	1,5	67
2008	1,5	73
2009	1,6	85
2010	2,1	2
2011	1,5	106
2012	2,4	211
2013	2,1	505
2014	2,5	174
2015	2,3	273
2016	2,5	93
2018	3,3	111
2020	3,2	2
2021	2,4	18



Le premier parc éolien, le Nordais, a été mis en service en 1999 avec un total de 132 éoliennes de moins d'un mégawatt (MW). Les premiers parcs éoliens, mis en service entre 1999 et 2009, sont composés d'éoliennes ayant une puissance comprise entre 0,8 et 1,8 MW. Depuis 2012, des éoliennes d'une puissance de 2 à 3 MW sont utilisées.

Les éléments qui constituent une éolienne sont illustrés à la figure 1 et détaillés au tableau 6 en fonction des matériaux et composantes.

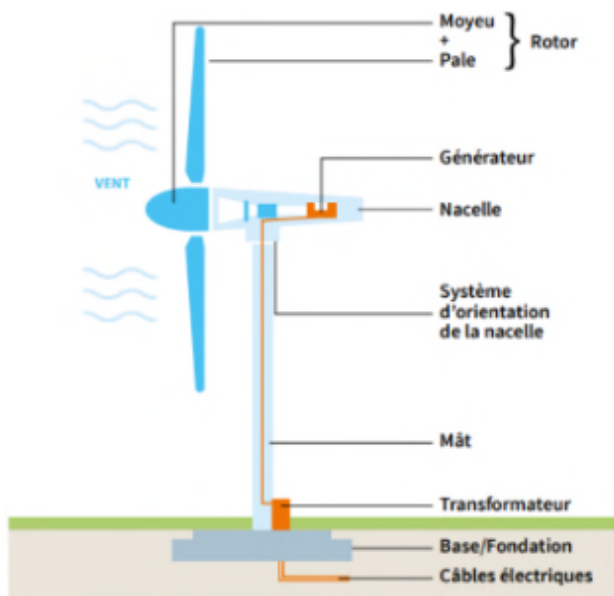


Figure 1 Composition d'une éolienne (source : Canadian Wind Energy Association)

Tableau 6 Matériaux utilisés selon les composantes – énergie éolienne

Composante	Éléments constitutifs	Matériaux utilisés
Rotor	Pales, moyeu, nez et contrôleur d'inclinaison des pales	Aluminium, acier, cuivre, fonte, fibre de verre et époxy
Nacelle et transformateur	Système mécanique (arbre, roulement principal, frein mécanique, multiplicateur et générateur), transformateur, système d'orientation de la nacelle, grue, système hydraulique, armoire électrique, convertisseur, châssis et cadre	Acier, cuivre, fibre de verre, aluminium, MCS
Mât	Mât	Acier, peinture, cuivre, plastique et aluminium
Fondation	Fondation de l'éolienne	Acier et béton
Câblage	Câblage de raccordement au réseau électrique	Aluminium, thermoplastique et cuivre

Les matériaux dont l'importance relative est élevée pour le développement de l'énergie éolienne sont le cuivre, les éléments des terres rares (ETR), le zinc et dans une moindre mesure le nickel, le chrome et l'aluminium.

3.2 QUANTITÉS MISES EN MARCHÉ ET EN FIN DE VIE

3.2.1 Approche méthodologique

L'approche repose sur la quantification et la projection de la puissance des éoliennes installées et remplacées en MW, sur lesquelles sont appliqués des ratios de composition par MW. Ces ratios sont présentés à l'annexe B. Le tableau 7 présente les différentes étapes menant à l'estimation des quantités, les sources utilisées et les différentes hypothèses.

Tableau 7 Approche méthodologique – énergie éolienne

Étape	Source des données utilisées	Hypothèse
Quantifier la puissance installée jusqu'en 2021.	Liste des parcs éoliens provenant du ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, qui regroupe la date d'installation et la puissance installée. Le plus ancien parc éolien a été installé en 1999.	Les puissances installées par année de 1999 à 2021 sont irrégulières et afin de simplifier les projections, elles ont été linéarisées durant cette période.
Estimer la puissance installée entre 2021 et 2050.	<i>Trajectoires de réduction d'émissions de GES du Québec – Horizons 2030 et 2050 (Mise à jour 2021)</i> (Dunsky, 2021 pour le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC). Cette étude a identifié et comparé quatre trajectoires de réduction de GES.	La moyenne des puissances cumulées installées estimées en 2030 et 2050 pour les quatre trajectoires a été utilisée. Par la suite, afin de simplifier les projections, il a été considéré que l'ajout de puissance de 2021 à 2030, puis de 2030 à 2050, se faisait linéairement. Enfin, une puissance installée par année a été calculée à partir des puissances installées cumulées.
Estimer la puissance remplacée entre 2021 et 2050.	<i>Analyse du Cycle de Vie de la production d'électricité d'origine éolienne en France</i> (Cycleco, 2015 pour l'Agence de la transition écologique (ADEME).	La durée de vie moyenne des éoliennes est estimée à 25 ans dans cette étude. Des opérateurs ont confirmé cette valeur. Les éoliennes en fin de vie ont été considérées comme étant remplacées, indépendamment du terme des contrats en cours. Afin d'estimer les quantités utilisées et générées lors de la durée de vie de l'éolienne, il a été considéré que 15 % du poids de la nacelle et une pale sont remplacés sur la durée de vie de l'éolienne, incluant le transport et l'installation. Ces valeurs ont été confirmées par des opérateurs au Québec, néanmoins, les quantités pourraient être supérieures compte tenu des conditions climatiques extrêmes au Québec.
Estimer la quantité de matériaux utilisés et générés	<i>Analyse du Cycle de Vie de la production d'électricité d'origine éolienne en France</i> (Cycleco, 2015 pour l'ADEME). <i>The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions</i> (AIE, version révisée de mars 2022).	Des ratios de composition en kg/MW ont été calculés à partir de la composition de trois éoliennes types, d'une puissance respective de 1,65 MW, 2,3 MW et 3 MW. Pour les minéraux critiques et stratégiques, ce sont les ratios de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) qui ont été utilisés. Ces ratios ont ensuite été appliqués à la puissance annuelle installée et remplacée.

3.2.2 Résultats

Les tableaux 8 et 9 présentent respectivement les quantités estimées de matériaux utilisés et générés par le secteur de l'énergie éolienne pour les années 2021, 2030 et 2050. La capacité installée ou remplacée annuellement correspond à la capacité ajoutée par les nouvelles éoliennes installées ou à la capacité des éoliennes remplacées pour une année donnée. La capacité totale en fonctionnement correspond à la capacité cumulée des éoliennes installées au cours des années et encore en fonctionnement.

Tableau 8 Quantités estimées de matériaux utilisés – énergie éolienne (t/an)

	2021	2030	2050
Capacité installée ou remplacée annuellement (MW)	183	436	1 627
Capacité totale en fonctionnement (MW)	4 128	6 403	33 882
Quantité totale de matériaux utilisés	93 379	220 182	827 821
• Aluminium	725	1 711	6 430
• Béton	69 587	165 662	618 181
• Chrome	174	346	1 491
• Époxy	637	1 395	5 564
• Fibre de verre	956	2 092	8 342
• Manganèse	272	540	2 326
• Métaux ferreux	17 332	40 844	153 630
• Plastique	49	111	427
• Autres	584	1 391	5 191
• Minéraux critiques et stratégiques	3 063	6 090	26 239
Cuivre	1 010	2 007	8 648
Nickel	104	208	895
ETR	34	69	295
Zinc	1 915	3 806	16 401



Tableau 9 Quantités estimées de matériaux générés – énergie éolienne (t/an)

	2021	2030	2050
Capacité remplacée annuellement (MW)	0	183	253
Capacité totale en fonctionnement (MW)	4 128	6 403	33 882
Quantité totale de matériaux générés	2 562	124 202	146 410
• Aluminium	19	939	1 132
• Béton	0	89 342	96 075
• Chrome	83	220	804
• Époxy	147	1 347	1 886
• Fibre de verre	221	2 220	2 828
• Manganèse	129	343	1 254
• Métaux ferreux	504	24 654	27 368
• Plastique	6	342	106
• Autres	0	930	807
• Minéraux critiques et stratégiques	1 453	3 865	14 150
Cuivre	479	1 274	4 664
Nickel	50	132	482
ETR	16	43	159
Zinc	908	2 416	8 845

3.3 PROCESSUS ACTUELS DE CONCEPTION ET GESTION EN FIN DE VIE

3.3.1 Conception

Les systèmes ou composantes physiques et électroniques d'éoliennes, identifiées à la figure 1, proviennent principalement de manufacturiers internationaux. La liste des manufacturiers dont les éoliennes ont été installées dans les parcs éoliens du Québec est détaillée dans le tableau 10. L'approvisionnement en matières premières se fait à partir des marchés internationaux.



Tableau 10 Liste des manufacturiers des éoliennes installées dans les parcs éoliens Québécois

Manufacturier	Répartition en fonction du nombre d'éoliennes installées au Québec
GE Wind (États-Unis)	52 %
REpower Systems (Allemagne)	19 %
Enercon (Allemagne)	16 %
NEG Micon (Danemark)	9 %
Vestas Wind Systems (Danemark)	4 %

En 2004, le manufacturier danois NEG Micon a fusionné avec le fabricant Vestas. REpower Systems a fait faillite en 2019.

Plusieurs usines localisées au Québec fabriquent des composantes d'éoliennes :

- Le manufacturier GE Wind possède une filiale de fabrication de pales d'éoliennes, nommée LM Wind Power, dont l'usine est située en Gaspésie;
- L'entreprise Marmen, dont les usines sont situées à Trois-Rivières et à Matane, fabrique des mâts d'éolienne en acier;
- Composite VCI, situé à Matane, fabrique des nacelles d'éoliennes, qui abritent alternateur, boîte d'engrenage et arbres.

3.3.2 Gestion en fin de vie

Les premiers parcs éoliens développés au Québec ont été équipés d'éoliennes provenant de l'extérieur du Québec. Certaines pales pouvaient être endommagées lors du transport (par bateaux et camions). Par ailleurs, elles n'avaient pas encore bénéficié des retours d'expérience de fonctionnement en conditions climatiques québécoises, occasionnant parfois des bris précoces et nécessitant des réparations ou des remplacements.

En considérant une durée de vie moyenne de 20-25 ans et moins, les éoliennes installées dans les premiers parcs éoliens au début des années 2000 pourraient arriver en fin de vie dans les prochaines années.

Notons que certaines composantes des éoliennes peuvent être remplacées prématurément en raison des avancées technologiques, de l'usure et des variations climatiques extrêmes (éléments rotatifs et composants électroniques).



Lorsqu'une composante de l'éolienne est en fin de vie, celle-ci est démontée de la structure de l'éolienne pour ensuite être prise en charge par un fournisseur de services en gestion des matières résiduelles. D'autres approches sont présentées dans la section suivante sur les bonnes pratiques, freins et enjeux. Dans le cas des pales, celles-ci sont démontées et puis elles sont découpées sur place à l'aide d'une pelle mécanique équipée d'une cisaille, puis transportées à l'aide d'un camion porte-conteneur (dit *roll-off*), soit transporté par un transport hors dimension avec excédent arrière.

Notons qu'actuellement aucun système de responsabilité élargie des producteurs (REP) n'est applicable aux composantes d'une éolienne au Québec ni dans les autres provinces canadiennes.

Les pratiques de gestion en fin de vie actuelles des composantes d'éoliennes au Québec et à l'international sont détaillées dans le tableau 11.

Tableau 11 Pratiques actuelles de gestion en fin de vie des éoliennes au Québec et à l'international

Composantes	Traitement ou valorisation actuels
Rotor • Moyeu, nez et contrôleur d'inclinaison • Pales	L'aluminium et l'acier provenant du moyeu et du nez sont redirigés vers la filière de récupération des métaux. Le contrôleur d'inclinaison quant à lui est démantelé et redirigé vers la filière de traitement des produits électroniques. Les pales d'éoliennes sont envoyées au lieu d'enfouissement technique (LET) le plus proche. À l'international, les pales peuvent être valorisées en cimenterie. Cela permet une valorisation des cendres et une valorisation de l'énergie contenue dans la matière organique présente dans les pales (entre 25 % et 30 % ou plus pour les pales d'éoliennes contenant une part plus importante de fibre de carbone).
Nacelle et transformateur	Recyclé – géré par la filière de récupération des métaux et des produits électroniques
Mât	Recyclé – géré par la filière de récupération des métaux
Fondation	Recyclé – Le béton armé des fondations est trié, concassé et déferpillé. Il est ensuite géré par la filière de recyclage du béton et peut être réutilisé sous la forme de granulats dans le secteur de la construction.
Câblage	Recyclé – géré par la filière de traitement des produits électroniques

La valorisation des pales d'éoliennes fait l'objet d'un projet de recherche de Synergie Matanie¹ visant à intégrer des résidus de pales sous forme de fibres et de poudre, constitués à 75 % de fibre de verre, dans un mélange de béton.

La liste des récupérateurs, conditionneurs et recycleurs est détaillée dans le tableau 12.

¹ Les partenaires du projet sont Béton Provincial, Matrec, Ville de Matane, MRC de La Matanie, MRC de la Haute Gaspésie, SADC de la région de Matane et l'Université de Sherbrooke. Ce projet a obtenu un appui financier du Fonds municipal vert, mis en œuvre par la Fédération canadienne des municipalités et financé par le gouvernement du Canada.



Tableau 12 Liste des récupérateurs, conditionneurs et recycleurs actuels des composantes des parcs éoliens au Québec et à l'international

Nom	Type	Composantes visées	Matériaux visés
Plusieurs récupérateurs de métal au Québec	Conditionneur et recycleur	Moyeu, nez, nacelle et mât	Métaux ferreux et non ferreux
Usine de Véolia à Saint-Louis, Missouri, États-Unis	Conditionneur et recycleur Valorisation des pales en cimenterie	Pales	Fibre de verre et fibre de carbone
Cimenterie d'Holcim à Lägerdorf en Allemagne	Conditionneur et recycleur Valorisation des pales en cimenterie	Pales	Fibre de verre et fibre de carbone
Zagons Logistik en Allemagne	Conditionneur Broyage et conditionnement de la fibre de verre provenant des pales, pour ensuite être envoyée en cimenterie et utilisée comme substitut de carburant pour remplacer la cendre de charbon.	Pales	Fibre de verre et fibre de carbone
American Fiber Green Products, États-Unis	Recycleur Transforme la fibre de verre en substitut du bois pour la fabrication de planches qui servent à la production de tables de pique-nique, clôtures, etc.	Pales	Fibre de verre
Global Fiberglass Solutions au Danemark	Recycleur Recyclage de composites en fibre de verre	Pales	Fibre de verre

Les parties métalliques comme le mât et le rotor constituent plus de 90 % du poids des éoliennes et sont recyclées dans le cadre des filières existantes.

3.4 BONNES PRATIQUES, FREINS ET ENJEUX

3.4.1 Stratégie 1 : écoconception

Au cours des dernières décennies, les avancées technologiques dans le domaine ont permis de rendre les éoliennes plus efficaces et ainsi de faire diminuer le poids moyen d'une éolienne par rapport à sa puissance.

Concernant les fondations, les constructeurs pourraient envisager d'employer du béton recyclé sous réserve d'une garantie de tenue mécanique. Également, des résines thermoplastiques peuvent être utilisées pour les pâles, facilitant le recyclage des différents matériaux. Par ailleurs, en Suède, le projet Dreamwind de Vestas a pour objectif de mettre au point des matériaux composites recyclables pour les pales.

Aussi, en 2021, Siemens Gamesa a lancé la première pale entièrement recyclable dans une usine au Danemark, à base de résine thermoplastique Elium qui est composée de 27 % de résine, 60 % de fibres de verre, 4 % de fibres de carbone). Une solution acide douce permet la séparation de la résine, de la fibre de verre et du bois, les rendant entièrement disponibles pour être intégrés dans de nouveaux



produits. L'intention de Siemens Gamesca est de rendre toutes ses pales d'éolienne vendues entièrement recyclables d'ici 2030.

Aux États-Unis, l'entreprise Plasti-Fab Washington est un fabricant de matériaux composites à base de fibre de verre. Elle a lancé l'intégration de fibres recyclées à ses opérations à grande échelle, réduisant ainsi ses émissions négatives et l'utilisation de matériaux non renouvelables.

À noter également que l'Allemagne a émis une interdiction d'enfouir les matériaux composites.

Certains fabricants proposent des génératrices n'utilisant pas d'aimant permanent, donc sans terres rares. Elles sont nommées génératrices asynchrones ou génératrices synchrones sans aimant permanent. Le fabricant Enercon utilise une autre technologie qui ne requiert pas de néodyme pour ses aimants permanents dans ses génératrices de 800 kW à 4,2 MW.

Les principaux freins et enjeux pour l'écoconception des éoliennes touchent principalement les pales et le béton. Actuellement, il n'existe pas d'alternative aux matériaux composites utilisés pour la fabrication des pales. De plus, il n'existe pas d'incitatifs pour les fabricants ou d'obligation de recyclabilité poussant les fabricants à écoconcevoir les composantes d'éolienne. Concernant le béton, ce sont les normes et les contraintes de l'ingénierie qui limitent les opportunités. Les ingénieurs ne sont pas incités à prévoir du béton recyclé pour des fondations, particulièrement dans ces situations avec des contraintes mécaniques fortes.

3.4.2 Stratégie 2 : consommation et approvisionnement responsables

La mise en place d'un label de durabilité pour la filière éolienne permettrait de certifier la durabilité des composantes d'éoliennes. Les critères d'obtention pourraient prendre notamment en compte la conception, la réduction des ressources utilisées, l'approvisionnement responsable. En exemple, le label indépendant français LONGTIME a été mis en place pour établir une liste de produits durables, réparables et en rupture avec l'obsolescence. Quarante et un critères sont dénombrés, pour une approche globale de la durabilité : conception robuste, réparabilité, garantie et service après-vente.

Par ailleurs, il est possible d'introduire des critères de choix, relevant de l'économie circulaire, pour les appels d'offres lancés sur les installations éoliennes soumises à autorisation et une obligation d'analyse de cycle de vie. Les critères pourraient intégrer l'efficacité massique de l'éolienne en t/MW hors fondation afin de susciter l'écoconception ou introduire un bonus de notation fondé sur la recyclabilité des matières utilisées pour les pales.

Ces bonnes pratiques sont des exemples de recommandations proposées par l'ADEME, elles ne sont toutefois pas encore en application dans le secteur.

3.4.3 Stratégie 3 : optimisation des opérations

Peu d'informations étaient disponibles concernant l'optimisation des opérations par les fabricants d'éoliennes et de leurs composants.



Des conditions climatiques extrêmes peuvent pousser les exploitants des parcs éoliens à mettre en pause leur production d'énergie. Lors de vents allant à plus de 90 km/h, le rotor se bloque et empêche les pales de tourner, protégeant ainsi le système. La plupart des éoliennes dans les parcs actuels atteignent leur pic de puissance à partir de 40 à 50 km/h.

L'installation de mâts de mesure dans les parcs éoliens favorise l'acquisition de données qui permettent par exemple de réaliser des prévisions plus précises de la production d'énergie et de vérifier que l'alignement des éoliennes est optimal par rapport à la direction réelle du vent.

L'utilisation et l'analyse des données d'opération par intelligence artificielle peuvent permettre de mieux gérer les actifs. Le fabricant Vestas Wind Systems propose une optimisation des paramètres opérationnels spécifiques au site et la mise en place de logiciels intelligents pour le suivi et le contrôle des performances (vitesse du vent, direction du vent et alignement du lacet permettent à la turbine d'agir plus intelligemment et de devenir ainsi plus efficace). Des modules aérodynamiques complémentaires permettent également d'améliorer la performance des éoliennes. Par exemple, la mise en place de générateurs vortex aide à la création de forces de levage autour des pales, les rendant plus efficaces à charge partielle.

3.4.4 Stratégie 4 : économie collaborative

Stratégie non applicable pour l'énergie éolienne.

3.4.5 Stratégie 5 : location

Stratégie non applicable pour l'énergie éolienne.

3.4.6 Stratégie 6 : entretien et réparation

Dans le but d'allonger la durée de vie des éoliennes et maintenir un bon taux de disponibilité, plusieurs mesures sont appliquées dans les parcs éoliens au Québec : entretien prédictif, entretien préventif, inspections techniques, entretiens curatifs sur site et réparation en atelier au besoin.

Afin de minimiser les risques d'interruption de service et garantir la sécurité du personnel intervenant, il est obligatoire de réaliser des vérifications périodiques des installations électriques, des équipements de protection individuelle, des lignes de vie et des équipements de levage, préalablement aux opérations d'entretien.

Les pales d'éoliennes sont exposées à des conditions rigoureuses et leur dégradation peut être un enjeu. Lors de fissures mineures, elles peuvent être réparées grâce à une injection de matériau de remplissage époxyde. Dans certains cas, ce sont des plaques de fibre de verre et de résine d'époxy qui sont posées sur la pale défectueuse.

Cependant, l'amélioration du rendement des nouvelles éoliennes peut inciter les exploitants de parcs éoliens à procéder à leur remplacement avant la fin de leur durée de vie utile. De plus, deux approches s'opposent en termes d'entretien et de réparation et ont un impact différent sur la durée de vie. La



première est de pousser l'équipement à son maximum, de faire du correctif et de remplacer les éoliennes ou certains composants plus rapidement. La seconde cible un entretien préventif de manière à prolonger la durée de vie. C'est la rentabilité économique qui dicte par la suite le choix aux opérateurs.

3.4.7 Stratégie 7 : don et revente

Le démantèlement des éoliennes en fin de vie génère des quantités importantes de matériaux et de composants, dont une partie est encore apte au réemploi (« seconde vie »). En les identifiant et les gérant de façon spécifique, ils pourraient être revendus et réutilisés comme pièces détachées pour des parcs éoliens utilisant les mêmes éoliennes. En France, la mise en place de la plate-forme AD3R (Association Démantèlement, Recyclage, Reconditionnement et Revente) a permis de structurer une nouvelle filière de gestion des éoliennes en fin de vie, permettant notamment la récupération et la revente de différentes composantes d'éolienne.

Aux Pays-Bas et au Danemark, certaines pales d'éoliennes ont une seconde vie en guise d'abris vélo, banc public ou encore aire de jeux. Ces initiatives ne permettent cependant pas d'intégrer la totalité des pales d'éolienne en fin de vie.



Figure 2 Pâle d'éolienne transformée en abri vélo à Aalborg au Danemark (source : www.renouvelle.be)



Figure 3 Pâle d'éolienne transformée en bancs publics à Rotterdam aux Pays-Bas
(source : www.renouvelle.be)



Figure 4 Pâle d'éolienne transformée en plaine de jeux à Rotterdam aux Pays-Bas
(source : www.renouvelle.be)

3.4.8 Stratégie 8 : reconditionnement

Les pales endommagées ou en fin de vie peuvent être remises à neuf pour ensuite retourner sur le marché. C'est ce que proposent certaines compagnies européennes telles que Blue Planet Wind, Enerpower et Repowering Solutions qui vendent des pales remises à neuf (France et Allemagne).

Cette technique de remise à neuf est plus abordable pour les pales de petite taille en raison des défis de transport qui s'imposent aux plus grands modèles.

3.4.9 Stratégie 9 : économie de fonctionnalité

L'économie de fonctionnalité pourrait théoriquement être applicable aux éoliennes. Dans cette optique, le consommateur achèterait uniquement le service lié aux éoliennes, à savoir la production d'énergie, tandis que l'équipement demeurerait la propriété du producteur ou de l'installateur. Ce dernier serait alors responsable de l'entretien et des réparations éventuelles, prolongeant ainsi la durée de vie de l'équipement. Ce modèle s'applique bien aux petits producteurs au niveau commercial ou résidentiel, car ceux-ci n'ont pas de savoir-faire développé dans la mise en place et l'opération d'éoliennes. Cependant, le développement du secteur éolien au Québec se fait par la mise en place de parcs éoliens et non de projets à petite échelle. Dans les faits, cette stratégie est peu applicable pour l'énergie éolienne.

3.4.10 Stratégie 10 : écologie industrielle

Les parcs éoliens peuvent être situés à des endroits où se trouvent plusieurs acteurs industriels complémentaires du cycle de vie des éoliennes. C'est le cas notamment en Gaspésie, qui accueille sur son territoire des manufacturiers de composantes d'éoliennes, des producteurs de béton et une cimenterie. À cet égard, il existe des opportunités pour boucler des flux localement.

3.4.11 Stratégie 11 : recyclage et compostage

Une bonne pratique visant à augmenter le recyclage des composantes d'éolienne est la mise en place d'une réglementation visant à cibler des taux minimums de recyclage pour les éoliennes. En France, depuis le 1^{er} juillet 2022, la législation impose un recyclage obligatoire d'au moins 90 % de la masse totale de chaque éolienne démantelée ainsi qu'un minimum de 35 % pour les rotors (dont les pales font partie). En 2024, le pourcentage passera à 95 % pour les éoliennes globalement, et en 2025, à 55 % pour les rotors.

La mise en place d'une filière de démantèlement des éoliennes favorise la récupération des matériaux. Comme mentionnée à la stratégie 7 – don et revente, l'AD3R en France a ainsi permis de structurer la filière et favoriser le recyclage des matériaux, en particulier les pales et les métaux.

Il est possible de recycler la fibre de verre contenue dans les pales. Au Danemark, l'entreprise Global Fiberglass Solutions a transformé la fibre de verre en matière première, afin de créer des produits polyvalents tels que des panneaux composites, des traverses de chemin de fer et autres plastiques composites, comme montrés à la figure 5.





Figure 5 Transformation de la fibre de verre des pales éoliennes en différents matériaux (source : www.globalfiberglassinc.com/)

Les principaux freins et enjeux pour le recyclage des éoliennes sont reliés aux pales. Celles-ci sont composées de matériaux composites plus difficilement recyclables. Par ailleurs, la taille importante des pales nécessite de les découper avant de les transporter ou bien de recourir à un transport spécial. Cela augmente significativement les coûts associés à leur logistique, limitant ainsi les possibilités d'atteindre des sites ayant la capacité de les recycler. Enfin, certains éléments, tels la peinture, le système de protection des bords d'attaque des pales de l'éolienne, composé de polyuréthane, les renforts en composite ou certains plastiques restent encore difficiles à traiter. Ils représentent cependant une faible proportion du poids d'une pale.

3.4.12 Stratégie 12 : valorisation

La valorisation est une stratégie applicable à différentes composantes des éoliennes. Tout d'abord, le béton des fondations peut être concassé afin d'obtenir des matériaux granulaires recyclés pouvant être utilisés dans des remblais, des fondations, ou du béton, dépendamment de leurs caractéristiques géotechniques et environnementales. En France, le Projet Recycbéton est un projet regroupant des acteurs industriels et scientifiques de la filière et visant à réutiliser les granulats issus du concassage du béton de déconstruction pour fabriquer à nouveau du béton présentant des performances techniques, économiques et environnementales satisfaisantes. Plusieurs opérations pilotes ont été menées avec succès, y compris sur des chantiers importants, comme cela a été le cas lors des travaux de la voie de contournement Nîmes-Montpellier en France. Le béton concassé a été utilisé comme composante dans le béton de certaines parties d'ouvrages d'art. En Allemagne, le béton broyé provenant du démantèlement des parcs éoliens peut être utilisé comme remblai ou sous-fondation lors de la construction de routes.

Les pales font également l'objet de valorisation en tant que combustible solide de récupération (CSR) en cimenteries. La combustion de la partie organique des pales permet de remplacer l'énergie fossile habituellement utilisée (mazout, gaz, charbon), mais la fibre de verre non combustible peut également

être valorisée. Un projet de recherche porté par Synergie Matanie, en association avec le Groupe Bouffard et l'Université de Sherbrooke au Québec, porte sur la faisabilité de la valorisation de la fibre de verre des pales d'éoliennes en remplacement du ciment. La production du ciment étant fortement émettrice de CO₂ dans l'atmosphère, cela aurait également pour effet de réduire les émissions de gaz à effet de serre de la cimenterie. De la même manière, aux États-Unis, dans le cadre d'une entente à long terme, Véolia North America récupère des pales d'éoliennes du groupe GE Renewable Energy pour les transformer en matières premières et les intégrer dans un processus de fabrication de ciment. En Europe, l'entreprise Lafarge Holcim utilise un matériau issu de pales démantelées pour fabriquer du ciment. Cette pratique existe en France et est très répandue en Allemagne où l'enfouissement des pâles est interdit.

Un des freins à la mise en place de la stratégie de valorisation est le montant des investissements requis pour adapter le fonctionnement d'une installation de combustion à ce type de combustible. Cela nécessite des quantités suffisantes et une régularité afin d'assurer la rentabilité. De plus, des opérations de tri et de préparation peuvent être requises en amont, notamment pour retirer le plastique des pales.

Lorsque les pales arrivent en fin de vie, ce sont de grandes quantités qui sont générées en peu de temps, engorgeant potentiellement les filières de traitement. Un entreposage et une préparation sont requis, et les coûts de transport peuvent également être un frein.

Enfin, pour les fondations en béton, les quantités à traiter localement sont importantes, mais les besoins sont limités. Il peut donc être nécessaire de transporter les granulats à une distance importante, rendant l'opération peu rentable.



4.0 ÉNERGIE SOLAIRE

4.1 DESCRIPTION

Jusqu'à récemment, les panneaux solaires installés étaient principalement le fait d'autoproduiteurs et leur diffusion restait limitée. La puissance installée au Québec en 2015 était 0,679 MW (Ressources Naturelles Canada, 2015), tandis qu'elle s'élevait à 6,25 MW en 2019 (NERGICA, 2021). Cependant, en 2021, Hydro-Québec a mis en service deux parcs solaires sur la Rive-Sud de Montréal en Montérégie (Varennnes et La Prairie) pour une puissance totale de 9,5 MW, pavant la voie à un développement plus important à long terme.

Que les panneaux solaires soient installés sur des bâtiments ou dans des parcs solaires, les équipements requis et leur composition sont similaires. La figure 6 présente les différentes composantes.

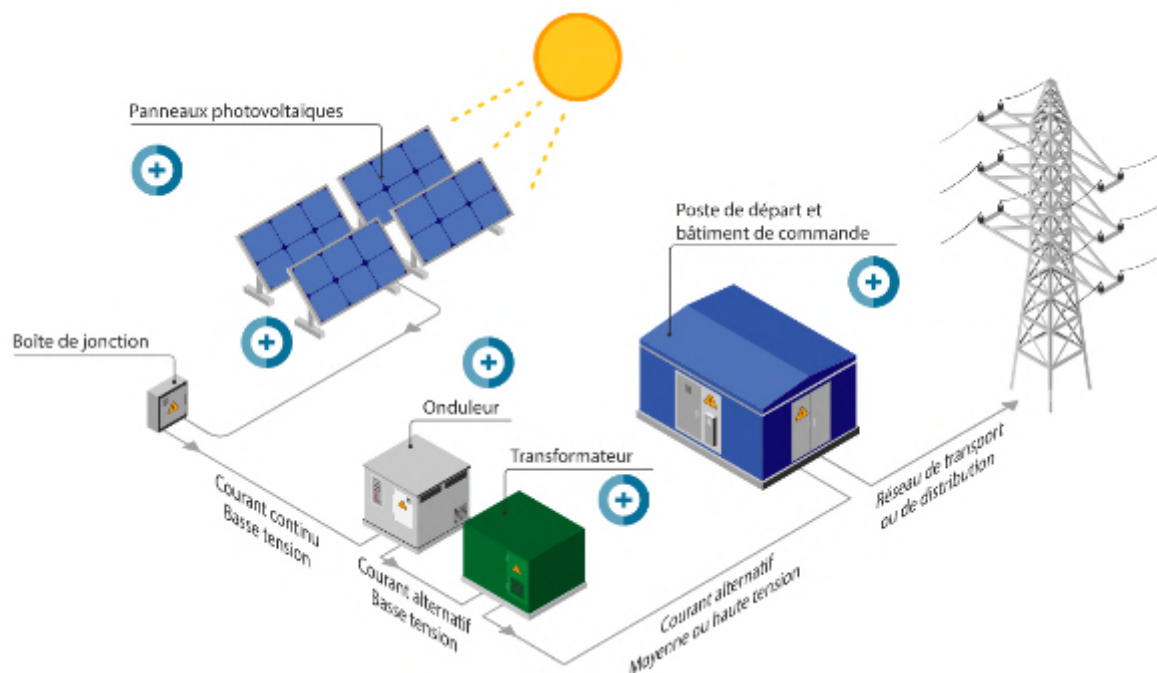


Figure 6 Composition d'une installation solaire (source : Hydro-Québec)

Il existe différents types de panneaux solaires dans l'industrie. Comme montré au tableau 13, à l'échelle mondiale, plus de 95 % de la production de panneaux solaires est faite à partir de la technologie des cellules en silicium cristallin (NERGICA). L'abondance de ce matériau et l'efficacité énergétique des panneaux solaires expliquent leur domination dans le marché de l'énergie solaire.

Tableau 13 Proportion des différents types de panneaux solaires installés (AIE, 2020)

Type de panneau solaire	Type de cellule photovoltaïque	Distribution à l'échelle mondiale
Silicium	Mono et polycristallin (c-Si)	95 %
	Silicium amorphe (a-Si)	
Couche mince de semi-conducteurs	CIGS (cuivre, indium, gallium et sélénium)	1%
	CdTe (tellure de cadmium)	4 %

Au Canada, ce sont les panneaux bi-faciaux qui sont installés le plus couramment dans les projets de parcs solaires. Ce type de panneaux permet de faire de l'électricité avec la réverbération des rayons solaires sur le sol. La présence de neige permet une meilleure réflexion des rayons, rendant ce type de panneaux plus efficace.

Le tableau 14 liste les matériaux utilisés selon les composantes.

Tableau 14 Matériaux utilisés selon les composantes – énergie solaire

Composante	Éléments constitutifs	Matériaux utilisés
Panneau solaire	Panneau photovoltaïque et câblage de raccordement	Cuivre, silicium, zinc, nickel, aluminium, verre, argent, polymère, autres MCS
Batterie	Batterie de type Lithium Fer Phosphate (LFP)	Métaux ferreux, lithium, phosphate, graphite, cuivre, aluminium, plastique, autres MCS
Transformateur	Transformateur	Époxy, cuivre, aluminium et métaux ferreux, autres MCS
Onduleur	Onduleur	Aluminium, cuivre, métaux ferreux, plastiques, autres MCS
Fondation / base	Structure de maintien des panneaux solaires	Béton et métaux ferreux

Les minéraux dont l'importance relative est élevée pour le développement de l'énergie solaire sont le cuivre et l'aluminium.

4.2 QUANTITÉS MISES EN MARCHÉ ET EN FIN DE VIE

4.2.1 Approche méthodologique

L'approche repose sur la quantification et la projection de la puissance des panneaux solaires installés et remplacés en MW, sur lesquelles sont appliqués des ratios de composition par MW selon les composantes. Ces ratios sont présentés à l'annexe C.

Le tableau 15 présente les différentes étapes menant à l'estimation des quantités, les sources utilisées et les différentes hypothèses.



Tableau 15 Approche méthodologique – énergie solaire

Étape	Source des données utilisées	Hypothèse
Quantifier la puissance installée jusqu'en 2021	<i>Situation présente et évolution du photovoltaïque – Rapport annuel canadien 2015</i> (Ressources Naturelles Canada, 2015) <i>Énergie solaire photovoltaïque dans le mix énergétique québécois - Analyse et perspectives</i> (NERGICA, 2021) Données sur les centrales solaires à La Prairie et à Varennes (Hydro-Québec, 2020)	Puissance cumulée installée en 2010 : considérée nulle Afin de simplifier les projections, il a été considéré que l'ajout de puissance de 2010 à 2015, puis de 2015 à 2021 se faisait linéairement.
Estimer la puissance installée entre 2021 et 2050	<i>État d'avancement 2020 du plan d'approvisionnement 2020-2029</i> (Hydro-Québec, 2020). <i>Trajectoires de réduction d'émissions de GES du Québec – Horizons 2030 et 2050 (Mise à jour 2021)</i> (Dunsky, 2021 pour le MELCC).	La production d'électricité d'origine solaire prévue par Hydro-Québec en 2029 est 0,4 TWh, convertie ensuite en puissance cumulée installée en utilisant le facteur de 1 183 kWh/kW (NERGICA, 2021), soit 338,1 MW. La moyenne des puissances cumulées installées estimées en 2050 pour les quatre trajectoires de réduction de GES de l'étude Dunsky 2021 a été utilisée, soit 18 303,9 MW. Par la suite, afin de simplifier les projections, il a été considéré que l'ajout de puissance de 2021 à 2030, puis de 2030 à 2050, se faisait linéairement. Enfin, une puissance installée par année a été calculée à partir des puissances installées cumulées.
Estimer la puissance remplacée entre 2021 et 2050 par composante	<i>End-of-life management, Solar Photovoltaic Panels</i> (IRENA, 2019) pour la durée de vie des panneaux solaires et la maintenance. Données transmises par ELVO (batteries LFP). Données de fournisseurs (onduleur et transformateur).	Les installations solaires en fin de vie ont été considérées comme étant remplacées, indépendamment du terme des contrats en cours. La puissance remplacée inclut les composants défectueux remplacés tout au long de l'exploitation et à la fin de vie. La durée de vie moyenne des panneaux solaires est estimée à 30 ans dans cette étude. Des opérateurs ont confirmé cette valeur. Concernant le remplacement de certains composants tout au long de la durée de vie, les valeurs suivantes ont été utilisées : 7 % des panneaux solaires, 50 % des batteries et 200 % des onduleurs. Ces valeurs ont ensuite été divisées par la durée de vie (30 ans) pour obtenir un pourcentage annuel des composants remplacés.
Estimer la quantité de matériaux utilisés et générés	<i>The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions</i> (AIE, version révisée, mars 2022) et <i>End-of-life management, Solar Photovoltaic Panels</i> (IRENA, 2019) pour les panneaux solaires. Données transmises par ELVO (batteries). Données de parcs solaires en Europe et de fournisseurs (onduleur et transformateur). Données de parcs solaires en Ontario (fondation et structure).	Des ratios de composition en kg/MW ont été calculés pour chaque composante à partir de leur composition et des quantités de composantes par MW installé. Ces ratios ont ensuite été appliqués à la puissance annuelle installée et remplacée chaque année pour chaque composante.



4.2.2 Résultats

Les tableaux 16 et 17 présentent respectivement les quantités estimées de matériaux utilisés et générés par le secteur de l'énergie solaire pour les années 2021, 2030 et 2050.

Tableau 16 Quantités estimées de matériaux utilisés – énergie solaire (t/an)

	2021	2030	2050
Capacité installée ou remplacée annuellement (MW)	11	856	900
Capacité totale en fonctionnement (MW)	19	1 194	18 304
Quantité totale de matériaux utilisés	1 721	134 998	143 729
• Aluminium	80	6 272	6 808
• Argent	0,9	68	71
• Béton	0,0	0,0	0,0
• Époxy	0,7	53	53
• Métaux ferreux	731	57 368	58 901
• Phosphate	22	1 691	2 245
• Plastique	5,1	401	561
• Polymère	86	6 778	7 104
• Silicium	43	3 389	3 552
• Verre	656	51 510	53 990
• Autres	32	2 450	4 439
• Minéraux critiques et stratégiques	64	5 019	6 005
Autres MCS	0,3	27	29
Cuivre	41	3 200	3 606
Graphite	21	1 618	2 147
Lithium	1,9	147	195
Nickel	0,0	1,1	1,2
Zinc	0,3	26	27



Tableau 17 Quantités estimées de matériaux générés – énergie solaire (t/an)

	2021	2030	2050
Capacité remplacée annuellement (MW)	0	3	44
Capacité totale en fonctionnement (MW)	19	1 194	18 304
Quantité totale de matériaux générés	9,2	594	9 325
• Aluminium	0,6	37	573
• Argent	0,0	0,2	3,5
• Béton	0,0	0,0	0,0
• Époxy	0,0	0,0	0,1
• Métaux ferreux	1,6	100	1 633
• Phosphate	0,6	38	592
• Plastique	0,2	11	172
• Polymère	0,3	22	348
• Silicium	0,2	11	174
• Verre	2,6	167	2 647
• Autres	2,2	138	2 128
• Minéraux critiques et stratégiques	1,1	68	1 055
Autres MCS	0,0	0,1	1,4
Cuivre	0,4	28	434
Graphite	0,6	37	566
Lithium	0,1	3,3	51
Nickel	0,0	0,0	0,1
Zinc	0,0	0,1	1,3

4.3 PROCESSUS ACTUELS DE CONCEPTION ET GESTION EN FIN DE VIE

4.3.1 Conception

Comme cela est montré à la figure 7, les panneaux solaires sont composés de :

- Une couche de cellules à base de silicium qui est traversée par des fils métalliques afin de convertir la lumière en électricité et de l'emmener vers les bornes du panneau;
- Deux couches de polymères, par exemple en éthylène-acétate de vinyle (ÉVA), qui encapsulent les cellules;
- Une couche de verre pour protéger les cellules. Cette couche est enduite d'un revêtement antireflet pour augmenter la performance des panneaux;
- Une protection arrière pour empêcher l'humidité de pénétrer;
- Un cadre en aluminium et un boîtier de jonction.

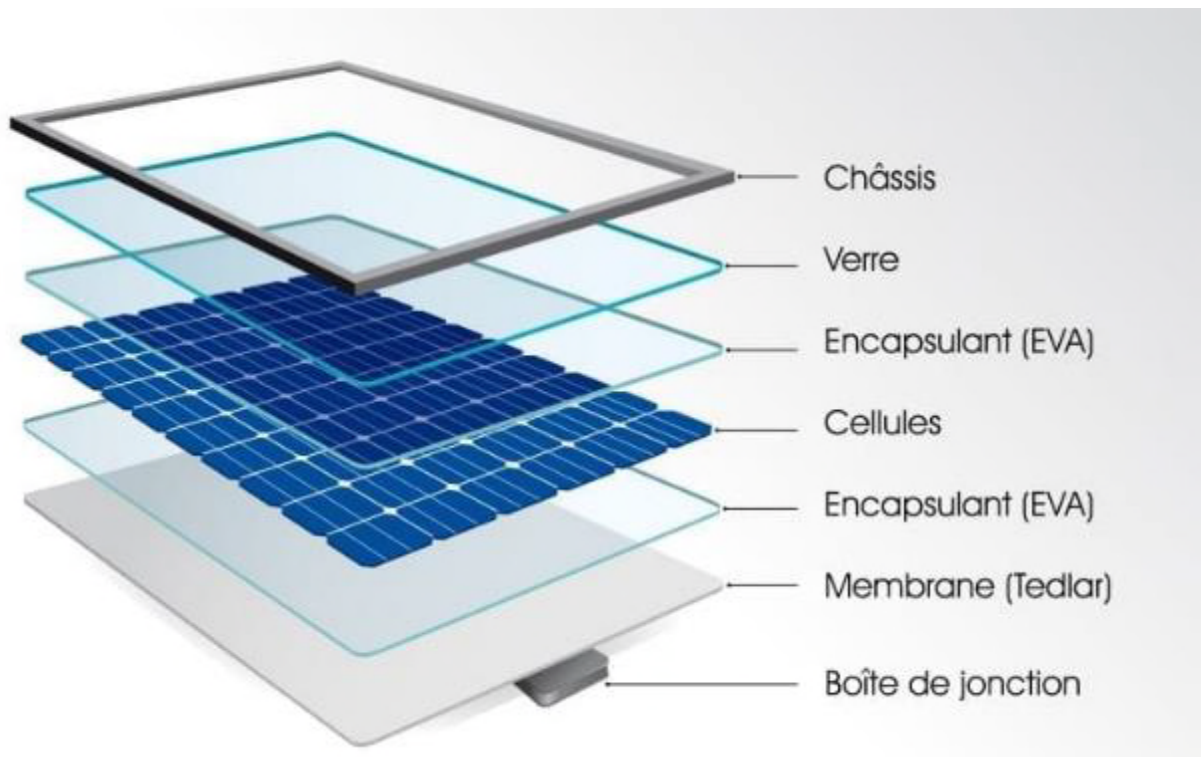


Figure 7 Composition d'un panneau solaire (source : Jade Technologie)

La figure 8 détaille une coupe transversale d'une cellule de panneau solaire.

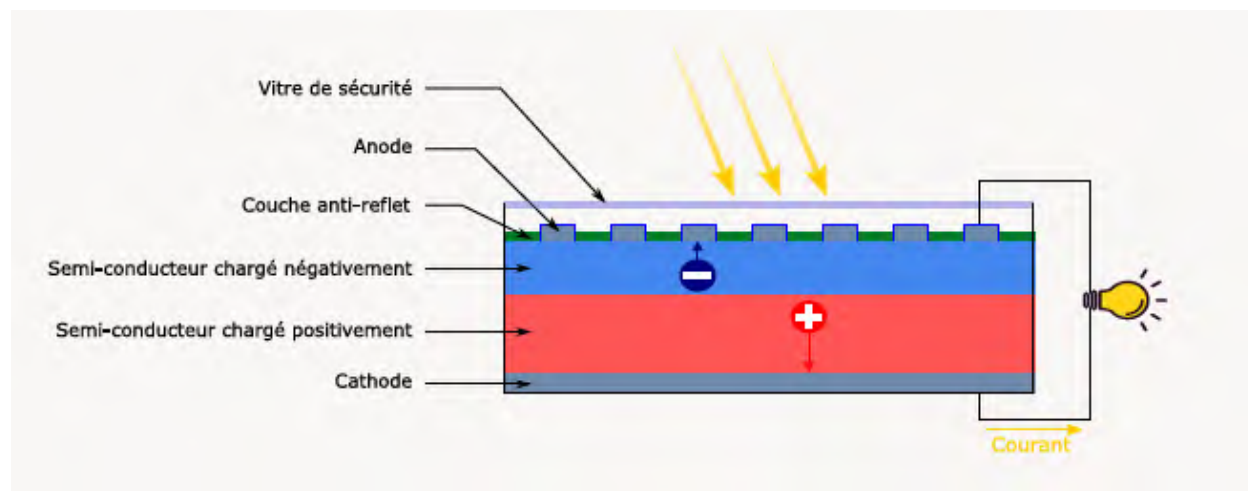


Figure 8 Coupe transversale d'une cellule de panneau solaire (source : NERGICA)

La Chine produit 70 % des panneaux solaires dans le monde. Les tableaux 18 et 19 montrent respectivement le classement des dix plus gros fabricants de panneaux solaires dans le monde et les principaux fabricants nord-américains.

Tableau 18 Classement des 10 premiers fabricants de panneaux solaires dans le monde

Manufacturier	Lieu principal de production
LONGi Solar	Chine
Tongwei Solar	Chine
JA Solar	Chine
Aiko Solar	Chine
Trina Solar	Chine
Jinko Solar	Chine
Canadian Solar	Chine
Zhongli	Chine
SunTech	Chine
First Solar	États-Unis, Vietnam et Malaisie

Tableau 19 Principaux manufacturiers nord-américains

Manufacturiers	Lieu principal de production
GMA Solar	Canada (Québec)
Stace	Canada (Québec)
Heliene	Canada (Ontario) et États-Unis
Silfab	Canada (Ontario)
Mitrex	Canada (Ontario)
GO Power	Canada – spécialisé dans les panneaux solaires pour véhicules récréatifs

Le tableau 20 permet de voir les manufacturiers des panneaux solaires qui ont été sélectionnés par Hydro-Québec pour la mise en place des parcs solaires de Varennes et La Prairie.

Tableau 20 Répartition des manufacturiers de panneaux solaires dans les parcs solaires du Québec

Manufacturier	Répartition en fonction du nombre de panneaux solaires installés dans les parcs solaires
Jinko Solar Holding	84 % (21 800 panneaux sur les 26 000)
Stace	16 % (4 200 panneaux sur 26 000 panneaux installés)

Les panneaux solaires qui sont dans des parcs sont fixés sur des supports métalliques, eux-mêmes installés sur une base en béton ou directement plantés dans le sol, dépendamment de la géologie du site choisi.

Au niveau de la fabrication des onduleurs, les principaux manufacturiers sont regroupés dans le tableau 21.

Tableau 21 Principaux manufacturiers d'onduleur pour parc solaire (en chiffres d'affaires) (Source : IHS PV Inverter Market tracker Q3, 2019)

Manufacturier	Pays d'origine
Solar Edge Technologies	Israël
SMA	France
Huawei	Chine
Sungrow Power Supply	Chine
Power Electronics	États-Unis



Les batteries installées sur les deux parcs solaires du Québec sont des batteries EVLO d'Hydro-Québec, conçues sans terre rare et recyclables à 99 %.

4.3.2 Gestion en fin de vie

La production solaire étant très peu développée au Québec, il n'existe actuellement aucune filière de gestion des panneaux solaires en fin de vie. Malgré un développement plus ancien et important, la filière reste limitée ailleurs au Canada, puisqu'aucune réglementation n'impose le recyclage des panneaux solaires, plus coûteux que leur élimination. D'après le *National Renewable Energy Laboratory*, il coûterait 20 à 30 \$ de recycler un panneau solaire contre 1 à 2 \$ pour le mettre à l'enfouissement.

Actuellement, la majorité des matières résiduelles provenant du secteur de l'énergie solaire provient des défauts de fabrication ou des bris lors du transport ou de l'installation. Cependant, avec les premiers parcs solaires arrivant en fin de vie dans les prochaines années, la quantité d'équipements en fin de vie à gérer va augmenter de façon importante. Quelques initiatives voient ainsi le jour, comme celle de Solar X, un installateur de panneaux solaires au Canada, qui a lancé un programme de réemploi et recyclage de panneaux solaires en septembre 2020.

Aux États-Unis, il n'y a actuellement aucune réglementation fédérale entourant spécifiquement la fin de vie des panneaux solaires. Certains États comme la Californie et Hawaii catégorisent les panneaux solaires comme étant des matières dangereuses devant être traitées et disposées comme telles. Parallèlement, l'état de Washington est le premier État qui a mis en place une réglementation de type responsabilité élargie des producteurs en 2017, imposant aux manufacturiers de financer et gérer un programme de récupération et recyclage des panneaux solaires. Par ailleurs, les membres de l'Association des industries de l'énergie solaire (SEIA – Solar Energy Industry Association) s'engagent à être proactifs dans la gestion en fin de vie des panneaux solaires, notamment en développement des méthodes de collectes et de recyclage. À ce jour, six recycleurs sont devenus partenaires de l'association pour prendre en charge les panneaux solaires en fin de vie de leurs membres (Casade Eco Minerals, CleanLites Recycling, Dynamic Lifecycle Innovations, Echo Environmental, First Solar et Green Century Recycling). Certaines entreprises canadiennes enverraient leurs déchets à ces entreprises.

L'association européenne PV Cycle regroupe 30 manufacturiers et importateurs de panneaux solaires en Europe, représentant près de 70 % du marché. Cette association a mis en place un système de collecte et de recyclage des panneaux solaires en fin de vie. En février 2020, PV Cycle a annoncé que près de 95 % des panneaux qui ont été ramassés ont été recyclés. Un des recycleurs est l'entreprise française Veolia qui a développé une technologie permettant la séparation et le recyclage des différents composants des panneaux solaires. Le verre est envoyé dans le secteur verrier, l'aluminium dans les affineries, le plastique est valorisé en tant que combustible et le silicium réintègre les filières de métaux précieux.

Depuis 2005, First Solar a mis en place un programme de recyclage des panneaux solaires. Grâce à ses usines de recyclage situées en France, aux États-Unis et en Malaisie, First Solar indique recycler plus de 90 % des semi-conducteurs et environ 90 % du verre contenu dans les panneaux solaires.



De la même manière, le fabricant Antec Solar accepte les panneaux solaires en fin de vie et indique qu'au moyen d'un procédé breveté, la majorité des matières issues du recyclage peuvent être utilisées dans la fabrication de nouveaux modules.

4.4 BONNES PRATIQUES, FREINS ET ENJEUX

4.4.1 Stratégie 1 : écoconception

La recherche et le développement sur les panneaux solaires ont permis d'améliorer grandement leur durabilité et leur rendement. Ainsi, l'efficacité des modules est passée de 12,5 % en 1995 à 20 % en 2020 et les projections montrent qu'elle pourrait atteindre 25 % en 2050 (Ovaite et al., iScience 25, 2021).

Une étude réalisée en 2012 par le National Renewable Energy Laboratory (NREL) a révélé qu'en moyenne, la production de panneaux solaires chute de 0,8 % chaque année. Les taux de dégradation des panneaux solaires diminuent constamment à mesure que la technologie des panneaux solaires s'améliore au fil des ans, et des taux de dégradation inférieurs à 1 % sont courants dans toute l'industrie. Dans les années qui ont suivi la réalisation de cette étude de 2012, des technologies plus efficaces ont été développées et de nombreux panneaux plus récents n'ont qu'une baisse annuelle de 0,5 % de la production d'énergie.

De la même manière, l'utilisation d'argent dans la conception des modules a été réduite, mais peu a été fait en écoconception pour réduire l'utilisation d'autres matériaux ou surtout faciliter leur recyclabilité.

L'Agence internationale de l'énergie a publié un guide en 2021 intitulé *PV Module Design for Recycling Guidelines*. Ce guide donne des lignes directrices pour favoriser le recyclage des panneaux solaires lorsqu'ils arrivent en fin de vie. Dans ce document, plusieurs pistes sont identifiées :

- Mettre de l'avant la recyclabilité des produits, leur niveau de performance et leur coût;
- Privilégier des matériaux recyclables et faciles à séparer;
- Supprimer la présence de matériaux dangereux pour diminuer les coûts de traitements;
- Minimiser l'utilisation de produits qui ne permettent pas la séparation facile des matières (adhésif ou autre liant qui ne s'enlève pas « *non-reversible adhesives* »);
- Écoconcevoir les panneaux pour faciliter leur démontage.

La fabrication de modules sans cadre permet de réduire la quantité d'aluminium utilisée, de limiter les impacts liés au transport et de faciliter le recyclage. En plus d'être moins coûteux, ces modules offrent une meilleure résistance à la corrosion et à l'accumulation de débris. Si ce type de modules est actuellement commercialisé pour un usage résidentiel ou industriel, on lui préfère une installation dans le cadre de projets d'envergure, car ces modules nécessitent d'être installés sur des supports spécifiques relativement coûteux pour de petits projets. Aux États-Unis, l'entreprise Lumos Solar propose le LSX Frameless Solar Module. Ce modèle a été mis en application dans plusieurs projets comme illustrés aux figures 9 et 10.





Figure 9 Installation de modules sans cadre au Mall Mass Transit Center à Lauderdale (Floride) (source : lumossolar.com)



Figure 10 Installation de modules sans cadre à l'Université de Californie à Irvine (Californie) (source : lumossolar.com)

La substitution de matières est une autre stratégie d'écoconception pour les panneaux solaires. Des matériaux non dangereux, mais rares pourraient être remplacés par d'autres plus abondants, réduisant ainsi le coût de production. Par exemple, la quantité d'argent sur les cellules pourrait être réduite en remplaçant une partie par un alliage de cuivre, nickel et aluminium. Le projet de recherche CU-PV, financé par l'Union européenne, vise à développer un procédé de métallisation en utilisant du nickel et du cuivre, réduisant de 99 % la quantité d'argent utilisée.

D'autres substitutions sont à l'étude, comme l'utilisation d'un design sans couche de laminé (*laminated-free*) ou le remplacement des couches d'ÉVA. Le laboratoire de recherche français CEA, a entamé un projet de recherche en 2021 sur les meilleures méthodes pour séparer et récupérer les composants d'un panneau solaire, notamment le silicium, le cuivre et l'argent. Également, le projet Photorama, financé par l'Union européenne, a pour mandat d'améliorer le recyclage des panneaux solaires et la récupération des matériaux. Regroupant un consortium de 13 partenaires répartis dans toute l'Europe et œuvrant dans la gestion en fin de vie des panneaux solaires, les objectifs de l'initiative sont de trouver la meilleure structure industrielle pour recycler les panneaux solaires, de développer une technologie pour séparer leurs différentes composantes (verre, cadre, plastique, cellule, etc.), de trouver une méthode pour permettre de récupérer les différents matériaux qui composent les cellules (argent, cuivre, silicium, etc.) et de réintroduire ces matériaux (réutilisés ou recyclés) dans les procédés de fabrication de nouveaux panneaux solaires ou dans de nouveaux produits. Les recherches entourant la substitution de matières visent aussi à remplacer les matières dangereuses comme la fluorine afin de réduire les risques pour la santé et de faciliter les procédés de recyclage. Les soudures au plomb pourraient éventuellement être remplacées, évitant ainsi d'émettre des émissions de plomb dans l'air lors du recyclage thermique des panneaux solaires.

Ces substitutions pourraient néanmoins avoir un impact sur l'efficacité des panneaux solaires, les changements doivent ainsi être analysés globalement en tenant compte du cycle de vie complet des panneaux solaires.

Les technologies de cellules photovoltaïques sont encore en développement et des recherches visent à améliorer leur efficacité. Les cellules composées du tandem pérovskite/silicium permettraient d'atteindre un rendement supérieur à celles C-Si, mais font face à des défis physiques. On estime que les cellules pérovskite/silicium représenteront 9,3 % du marché en 2030 tandis que les cellules C-Si maintiendront une constante de 85 % (IRENA, 2016).

Enfin, l'efficacité et la durabilité des panneaux solaires sont des critères majeurs des exploitants de parcs solaires, ce qui explique les progrès qui ont été réalisés. Inversement, il y a peu d'exigences sur la recyclabilité des panneaux solaires, limitant ainsi les initiatives en ce sens. Des discussions autour de normes d'écoconception et de label d'efficacité énergétique commencent à émerger, notamment dans l'Union européenne. Des exigences pourraient être imposées aux fabricants afin d'assurer une meilleure gestion en fin de vie des composants et un label d'efficacité énergétique permettrait au consommateur de mieux évaluer l'efficacité de l'équipement.

La directive européenne 2012/19/UE relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) comporte des aspects concerne l'écoconception, en exigeant des États membres qu'ils mettent en place des mesures afin d'éviter que les producteurs créent des équipements avec une conception ou



une méthode de production particulière qui empêcherait leur recyclage, sauf si ces dernières permettent de diminuer l'impact sur l'environnement et/ou sur la sécurité.

4.4.2 Stratégie 2 : consommation et approvisionnement responsables

Lors de la mise en place de parcs solaires, des critères de choix des panneaux solaires pourraient être imposés :

- Efficacité minimale;
- Garantie de performance sur une durée donnée;
- Utilisation de matériaux issus du recyclage de panneaux solaires;
- Recyclabilité.

Ces initiatives peuvent cependant être limitées par le surcoût entraîné par ces critères et également l'évolution technologique rapide des panneaux qui peut inciter les exploitants à minimiser l'investissement initial afin de les changer plus rapidement pour des panneaux plus efficaces.

4.4.3 Stratégie 3 : optimisation des opérations

Peu d'informations étaient disponibles concernant l'optimisation des opérations par les fabricants de panneaux solaires et de leurs composants.

La plupart des panneaux solaires sont fiables et durables. Ils n'ont généralement pas de pièces mobiles et ne nécessitent que peu ou pas d'entretien. En effet, la plupart des fabricants testent leurs panneaux pour confirmer qu'ils peuvent résister à des vents violents et à de fortes charges de neige, et de nombreux panneaux solaires sont spécifiquement testés pour s'assurer qu'ils peuvent résister à la chute de grêle. Des inspections et des nettoyages réguliers peuvent contribuer à prolonger la durée de vie des panneaux solaires et maintenir leur efficacité.

L'utilisation et l'analyse des données d'opération par intelligence artificielle peuvent permettre de mieux gérer les actifs.

4.4.4 Stratégie 4 : économie collaborative

Stratégie non applicable pour l'énergie solaire.

4.4.5 Stratégie 5 : location

Stratégie non applicable pour l'énergie solaire.

4.4.6 Stratégie 6 : entretien et réparation

Dans le but d'allonger la durée de vie des parcs solaires et maintenir un bon taux de disponibilité, plusieurs mesures sont appliquées : entretien prédictif, entretien préventif, inspections techniques, entretiens curatifs sur site et réparation en atelier au besoin.



Des causes extérieures peuvent entraîner des dégradations aux panneaux solaires : transport, installation, foudre, connecteurs électriques reliant les panneaux entre eux. La formation des installateurs permet de réduire ces risques.

Les causes les plus communes de défaillance des panneaux solaires eux-mêmes sont présentées au tableau 22.

Tableau 22 Causes de défaillances qui affectent les panneaux solaires (source : Md Shahariar Chowdhury et al., janvier 2022)

Causes de défaillance	Proportion
Défaillance optique	20 %
Perte de puissance	19 %
Boîte de raccordement et câbles	19 %
Défaut d'interconnexion de cellules	10 %
Décollement	10 %
Défaut de cadre	6 %
Défaillance inconnue	6 %
Bris du verre	5 %
Dommages dus au transport	5 %

Ces défaillances peuvent entraîner des risques pour la sécurité (feux, chocs électriques, dangers physiques), des pertes de puissance, et impacter la durée de vie des panneaux solaires.

Dans le cadre de son programme *Performance and Reliability of Photovoltaic Systems*, l'AIE a coordonné des projets de recherche et émis un rapport en 2014 sur les causes des défaillances et les actions correctives et préventives permettant d'y remédier ou de réduire les risques. Les recommandations s'adressent aux fabricants de panneaux solaires, mais aussi aux installateurs et aux exploitants. Plusieurs méthodes d'identification des altérations ou des défauts des différentes composantes sont développées dans le rapport :

- Les inspections visuelles sont la méthode la plus rapide et efficace à mettre en œuvre. Fait de façon systématique pour chaque composant, elles permettent d'identifier des défauts, tels la délamination, l'oxydation des contacts électriques, les marques de brûlage, le bris du verre, le bris de cellule ou des problèmes d'ajustement des cadres. Une liste de vérification de l'état des panneaux solaires est proposée à la fin du rapport;
- Les mesures de la courbe intensité-tension permettent de déterminer la tension à vide, le courant court-circuit et le point de puissance maximale, qui sont caractéristique de chaque cellule. Des tests permettent de réaliser ces mesures sur des panneaux en opération et ainsi de caractériser des



défaillances spécifiques, notamment des courts-circuits, des pertes de transparence, de la délamination, des bris de cellule.

- Les mesures de thermographie montrent les différences de température induites par un courant externe ou par l'application de lumière sur le module photovoltaïque et permettent d'identifier des dysfonctionnements. La thermographie dans des conditions stables permet l'analyse des modules sur le terrain en condition réelle, tandis que la thermographie à impulsions et la thermographie de verrouillage permettent d'obtenir une vue plus détaillée du module, mais doivent être réalisées en laboratoire;
- Lors des tests par électroluminescence, le module est alimenté par un courant continu pour stimuler la recombinaison radiative dans les cellules solaires et génère une émission d'électroluminescence est détectée par une caméra spécifique. Ces tests permettent notamment de détecter les fissures des cellules dans les modules photovoltaïques;
- La fluorescence UV de l'EVA est utilisée pour analyser la décoloration des modules photovoltaïques;
- Le dispositif de transmission de signaux est utilisé pour la maintenance dans le domaine de l'électricité. Son application à un système photovoltaïque permet de détecter la déconnexion locale des rubans d'interconnexion des modules et la défaillance en circuit ouvert des diodes de dérivation.

Des opérations d'entretien ou de réparation peuvent suivre les inspections afin de remédier aux problèmes et allonger la durée de vie des composantes.

4.4.7 Stratégie 7 : don et revente

La fin de vie d'un panneau solaire est à l'appréciation du producteur d'électricité : en fonction du niveau minimum de production requis et des contraintes économiques, celui-ci peut juger nécessaire de remplacer les anciens panneaux par des nouveaux plus performants. Dans ce cas, mais également lors du démantèlement des parcs solaires, les panneaux peuvent être triés en fonction de leur état. Les panneaux fonctionnels peuvent alors être réutilisés ailleurs et avoir ainsi une seconde vie sur d'autres installations pour lesquelles les contraintes de rendement sont moins fortes.

Bien qu'existant, le marché des panneaux solaires d'occasion demeure modeste. Des sites comme secondsol.de et pvxchange.com servent par ailleurs de plateforme de vente et d'achat de panneaux solaires de seconde main. Les panneaux usagés peuvent également être donnés à des entreprises ou des organismes qui les reconditionnent et les mettent à disposition d'habitations moins énergivores, par exemple en Amérique centrale et en France. Enfin, les panneaux usagés peuvent également servir localement à fournir de l'énergie à des espaces plus petits comme un garage, une remise ou encore un chalet. Également, des entreprises comme Fabtech (fabtech.net) achètent des panneaux solaires usagés auprès d'entreprises afin de les mettre à disposition de personnes dans le besoin.



Plusieurs aspects limitent les possibilités de don et revente. Il est ainsi fréquent que les panneaux encore fonctionnels soient brisés lors de leur démantèlement. De plus, les coûts liés à l'entreposage, à la vente, au transport et à la garantie peuvent rendre les panneaux solaires usagers non compétitifs.

4.4.8 Stratégie 8 : reconditionnement

Les panneaux solaires peuvent être reconditionnés, retrouvant ainsi leurs capacités de fonctionnement originales. Néanmoins, il est à noter que les panneaux solaires reconditionnés ont une durée de vie moindre que les nouveaux et qu'il n'existe pour le moment pas de certification assurant la qualité et l'efficacité des panneaux reconditionnés. Des entreprises, comme Solar Steals (solarsteals.com), proposent à la vente des panneaux solaires reconditionnés à destination des particuliers et des entreprises.

Les panneaux solaires reconditionnés pourraient à l'avenir être vendus avec une garantie de l'entreprise de reconditionnement ou du distributeur afin de favoriser leur achat.

4.4.9 Stratégie 9 : économie de fonctionnalité

L'économie de fonctionnalité est possiblement applicable aux panneaux solaires. Dans cette optique, le consommateur achèterait uniquement le service lié aux panneaux solaires, à savoir la production d'énergie, tandis que l'équipement demeurerait la propriété du producteur ou de l'installateur. Ce dernier serait alors responsable de l'entretien et des réparations éventuelles, prolongeant ainsi la durée de vie de l'équipement.

4.4.10 Stratégie 10 : écologie industrielle

Les matériaux issus du recyclage des panneaux solaires pourraient entrer dans la fabrication d'autres produits comme les batteries lithium-ion, la production d'hydrogène ou encore la manufacture de produits nécessitant du verre. Néanmoins, le recyclage des panneaux solaires n'est pas encore assez mature au Québec pour que des exemples de synergies industrielles aient pu passer du stade théorique à la mise en pratique.

Parmi les exemples concrets d'écologie industrielle en dehors du Québec, on peut noter l'entreprise Owens Illinois qui utilise du verre issu du recyclage des panneaux solaires pour la production de ses bouteilles. Par ailleurs, les exemples de First Solar et Antec Solar montrent que les manufacturiers commencent à mettre en place des unités de recyclage sur leurs propres usines afin de favoriser le retour des matériaux dans le secteur.



4.4.11 Stratégie 11 : recyclage et compostage

Le parlement européen a, en 2012, modifié sa législation sur la gestion des DEEE pour y inclure les panneaux solaires obligeant les entreprises du secteur à collecter et recycler leurs produits en fin de vie. Les pays membres de l'Union européenne s'engagent également à favoriser la coopération entre les producteurs et les recycleurs notamment pour promouvoir la conception et la production de manière à faciliter le réemploi, la déconstruction, mais également la récupération des DEEE. L'Union européenne demande également aux États membres de financer la recherche et le développement pour améliorer la prise en charge de ces panneaux lorsqu'ils doivent être recyclés. Cette directive fixe des objectifs : 85 % des panneaux solaires en fin de vie doivent être collectés et 80 % du matériel doit être recyclé. Ce cadre réglementaire a permis le développement de procédés et de filières de recyclage permettant le recyclage de plus de 90 % des matériaux.

La figure 11 présente les différentes étapes du recyclage des panneaux solaires en silicium cristallin, représentant plus de 90 % des panneaux installés. Le recyclage des panneaux solaires fait appel à plusieurs processus mécaniques, thermiques et chimiques. Ainsi, le métal et le verre sont séparés après une phase de démantèlement physique, tandis que les modules sont recyclés à la suite d'un processus thermique. Le silicium quant à lui peut être réutilisé après avoir subi un traitement chimique et thermique. D'autres composés métalliques et faits de verre requièrent un autre type de séparation mécanique, chimique et physique pour pouvoir être réutilisés.

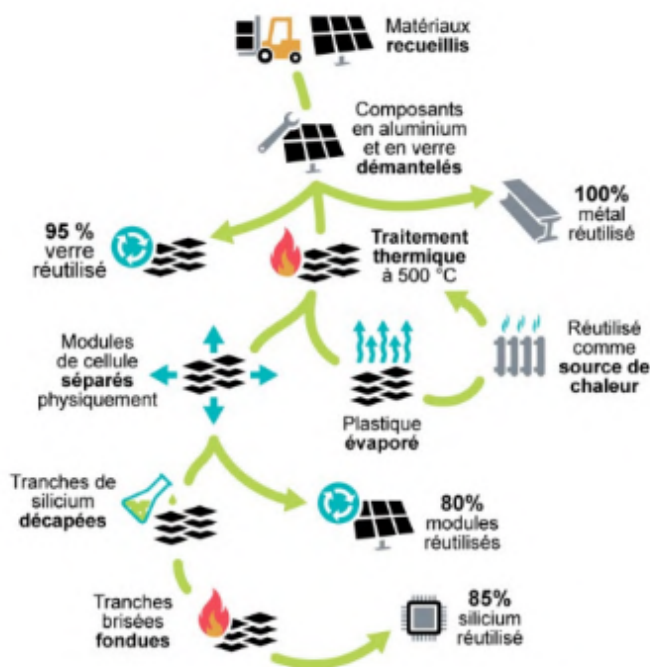


Figure 11 Procédé de recyclage d'une cellule de panneau solaire (Source : Association canadienne de l'énergie renouvelable)

Le démontage étant l'étape centrale pour le recyclage, la société japonaise NPC a créé une machine de démontage du panneau solaire, permettant de récupérer certains matériaux avant de broyer les pièces.

Au Québec, le Centre de transfert et de technologie en écologie industrielle (CTTÉI) situé à Sorel-Tracy mène des recherches sur la technologie des fluides supercritiques qui semble être prometteuse pour séparer les différents matériaux qui se trouvent dans les panneaux solaires.

Plusieurs facteurs limitent pour le moment le recyclage des panneaux solaires au Québec, notamment la complexité du recyclage des composants, les coûts associés et la faible quantité de matière disponible.

4.4.12 Stratégie 12 : valorisation

Outre la production de nouveaux panneaux solaires, les matières issues de la récupération des panneaux solaires peuvent alimenter les filières traditionnelles des matières premières secondaires comme le verre, l'aluminium et les autres métaux, mais certains matériaux peuvent faire l'objet d'une valorisation alternative. Ainsi, même s'il contient une fraction de polymère, de silice ou de métaux, le verre récupéré peut être mélangé avec d'autres verres recyclés (à hauteur de 15 à 20 %) et utilisé dans l'industrie de la fibre de verre. Par ailleurs, les polymères représentent 10 % de la composition des panneaux solaires à base de silicium cristallin. Une fois séparés, ils sont transformés en CSR et peuvent ainsi être utilisés comme source d'énergie, notamment pour les fours de cimenterie.



5.0 TRANSPORT ÉLECTRIQUE

5.1 QUANTITÉS MISES EN MARCHÉ ET EN FIN DE VIE

5.1.1 Description

5.1.1.1 Véhicules électriques

Les véhicules électriques (légers et lourds) regroupent les véhicules entièrement électriques (VEÉ), les véhicules hybrides rechargeables (VHR) et les véhicules électriques à pile à combustible (VÉPC). Selon les données de la Société de l'assurance automobile du Québec (SAAQ), plus de 72 000 VEÉ et 55 000 VHR légers étaient en circulation au Québec en 2021, alors qu'ils étaient presque inexistants il y a 10 ans.

Les figures 12, 13 et 14 présentent les différentes composantes.

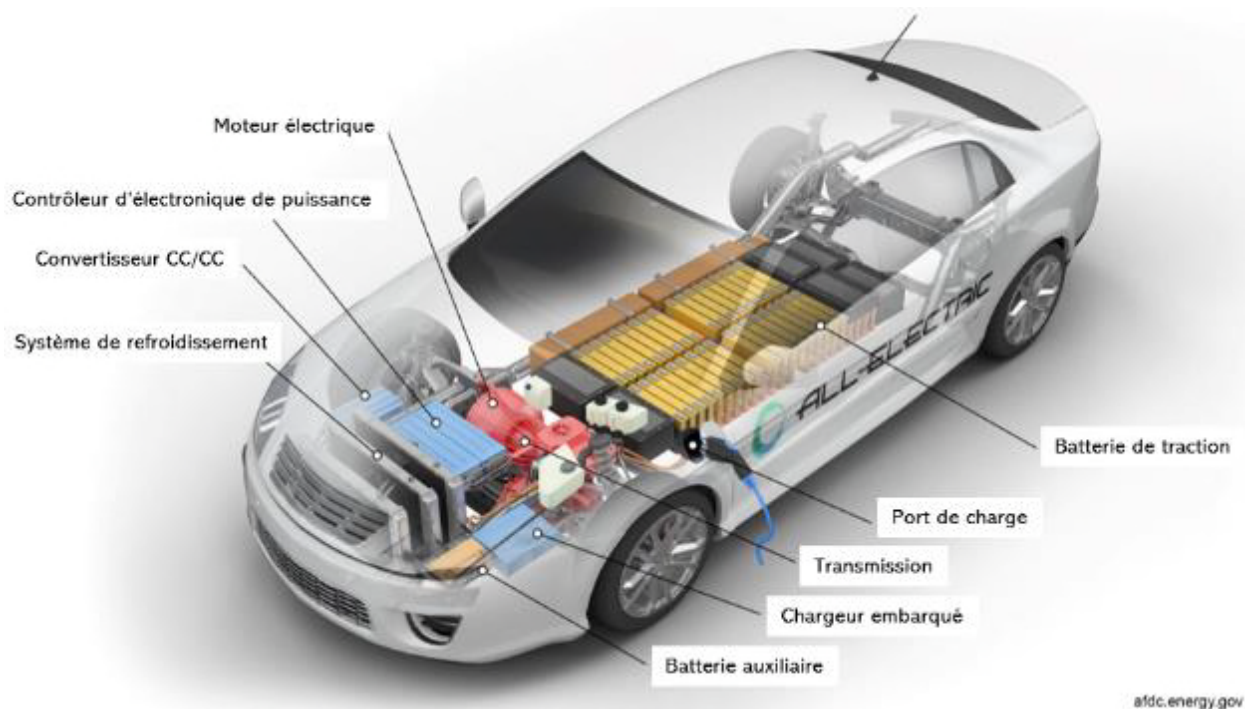


Figure 12 Composition d'un VEÉ (source : U.S. Department of Energy)

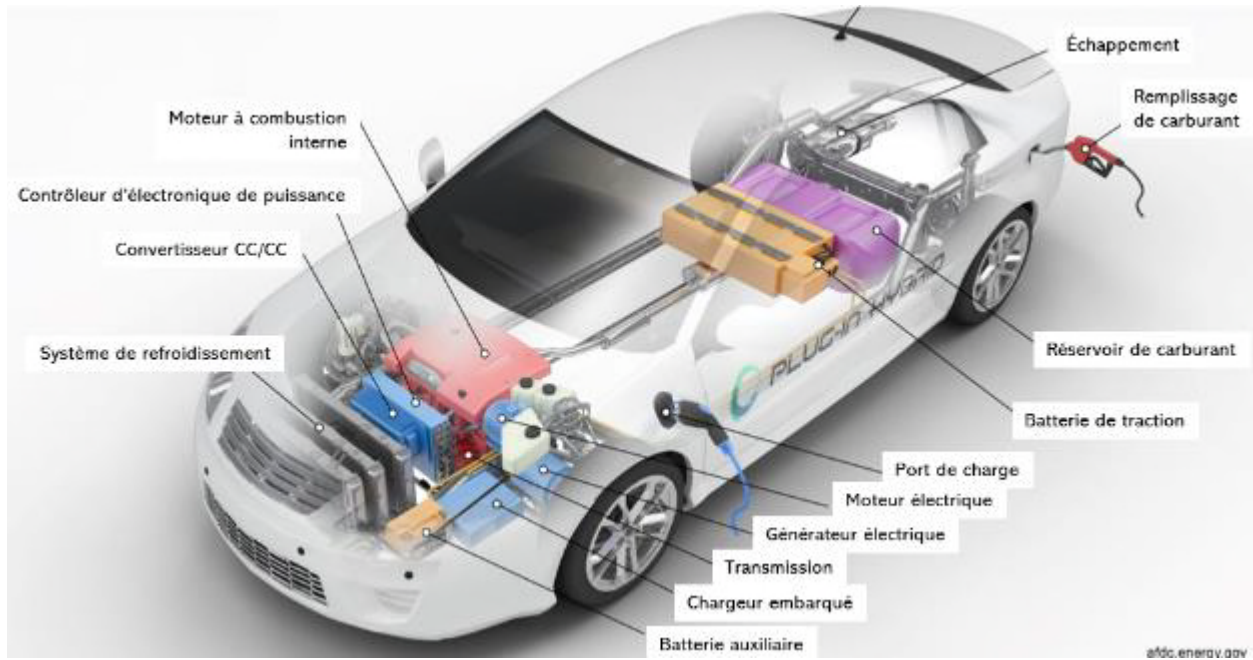


Figure 13 Composition d'un VHR (source : U.S. Department of Energy)

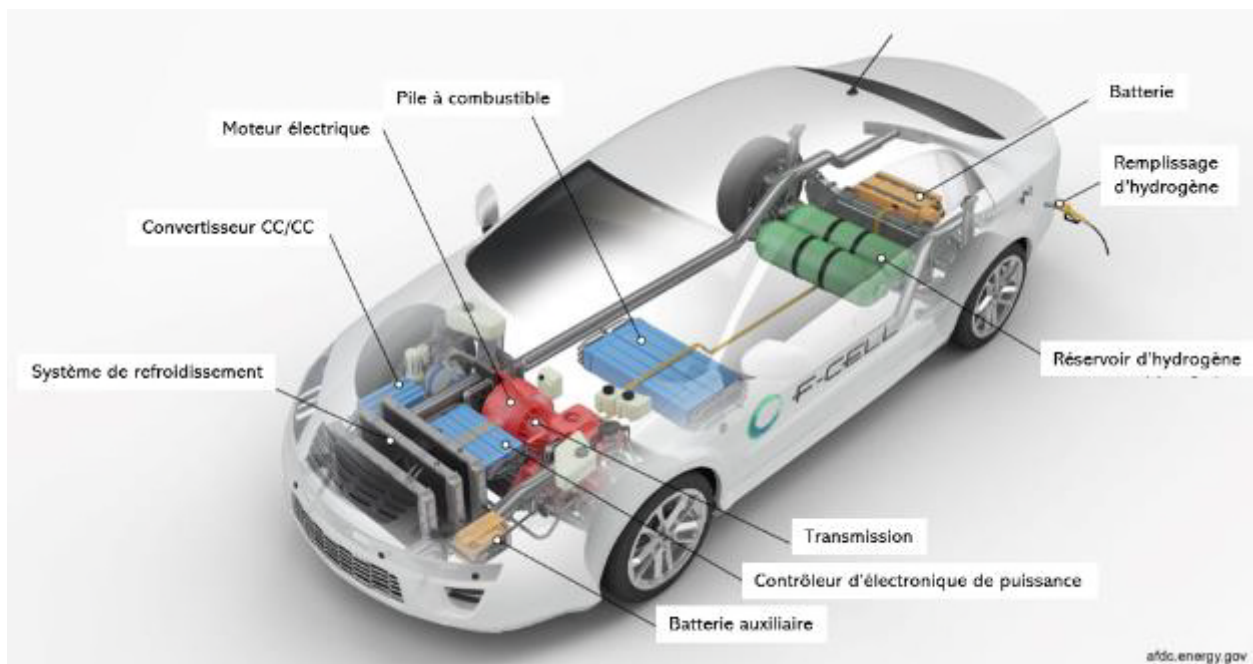


Figure 14 Composition d'un VÉPC (source : U.S. Department of Energy)

Le tableau 23 détaille les matériaux utilisés pour les composantes les plus importantes retenues pour l'étude.

Tableau 23 Matériaux utilisés selon les composantes – véhicules électriques

Composante	Éléments constitutifs	Matériaux utilisés
Batterie	Cathode, anode, électrolyte, séparateur	Métaux ferreux, lithium, phosphate, graphite, cuivre, aluminium, plastique, manganèse, cobalt, nickel
Moteur électrique	Stator, rotor, réducteur, carter, composants électroniques	Terres rares, cuivre, métaux ferreux, bore, aluminium, plastique
Pile à combustible (VÉPC uniquement)	Plaque terminale, anode, cathode, électrolyte, plaque bipolaire séparatrice	Fibre de carbone, métaux ferreux, plastiques, fibre de verre, silicium

Les matériaux dont l'importance relative est élevée pour les véhicules électriques sont le cuivre, le cobalt, le nickel, le lithium, les terres rares et l'aluminium.

Il existe différents types de batteries. Le tableau 24 détaille les types de batteries utilisées et leurs caractéristiques.

Tableau 24 Différents types de batterie

Type de batteries	Caractéristiques	Usages
Batterie de type lithium-nickel-manganèse-cobalt (NMC)	Rapport poids/énergie très intéressant, les plus répandues	Véhicules légers principalement
Batterie de type lithium-nickel-cobalt-aluminium (NCA)	Rapport poids/énergie intéressant et coût inférieur	Véhicules légers principalement
Batterie de type Lithium-fer-phosphate (LFP)	Durée de vie intéressante, bonne stabilité, limite le recours à certains MCS, coût intéressant, mais rapport poids/énergie plus faible	Applications stationnaires, véhicules lourds, mais également véhicules légers

5.1.1.2 Bornes de recharge

Les bornes de recharge regroupent les bornes résidentielles, les bornes publiques et celles des institutions, commerces et industries (ICI) pour les véhicules lourds. Trois types de bornes de recharge existent sur le marché : les bornes de niveau 1, celles de niveau 2 et les bornes de recharge à courant continu (BRCC) ou bornes de recharge rapide. Le tableau 25 décrit ces types en fonction de leur utilisation.

Tableau 25 Type de borne de recharge

Type de borne de recharge	Tension	Puissance utile	Domaine d'application
Niveau 1	120 V	1,4 kW	Résidentiel
Niveau 2	208 ou 240 V	7,2 kW	Résidentiel, public, ICI
BRCC	De 200 à 450 V	50 kW et plus	Public, ICI



Les figures 15, 16, 17 et 18 illustrent, respectivement, les bornes de recharge résidentielles de niveau 2, publiques de niveau 2, bornes BRCC publiques et les bornes BRCC pour les véhicules lourds.



Figure 15 Borne de recharge résidentielle de niveau 2 (source : Bosch EV Solution)



Figure 16 Borne de recharge publique de niveau 2 (source : Circuit électrique)



Figure 17 Borne de recharge BRCC publique (source : Circuit électrique)



Figure 18 Borne de recharge BRCC pour véhicules électriques lourds (source : Heliox)

Les bornes de niveau 1 sont très simples et n'ont pas été considérées dans les projections.

Selon l'Association des véhicules électriques du Québec (AVEQ), en décembre 2021, le nombre de bornes de recharge publiques, tous réseaux confondus, était de 6 288 bornes de niveau 2, 748 BRCC et 192 superchargeurs de Tesla.

5.1.2 Approche méthodologique

L'approche repose sur la quantification et la projection du nombre de véhicules électriques nouvellement mis en marché et remplacés, sur lesquels sont appliqués des ratios de composition par véhicule selon les composantes. Ces ratios sont présentés à l'annexe D.

5.1.2.1 Véhicules électriques légers

Le tableau 26 présente les différentes étapes menant à l'estimation des quantités, les sources utilisées et les différentes hypothèses.

Tableau 26 Approche méthodologique – véhicules électriques légers

Étape	Source des données utilisées	Hypothèse
Quantifier le nombre de véhicules électriques légers mis en circulation jusqu'en 2021	Données de la SAAQ pour les années 2012 à 2021 sur le nombre total d'automobiles et de camions légers en circulation et sur le nombre d'automobiles et de camions légers électriques, hybrides rechargeables et à hydrogène.	La SAAQ n'a commencé à colliger de façon distincte les VHR qu'en 2017. Il n'y a donc pas de VHR comptabilisé pour les années antérieures. En 2012, il y avait un total de 4 882 531 véhicules légers en circulation, dont 959 VEÉ et un nombre indéterminé de VHR et de VÉPC. En 2021, il y avait un total de 5 497 583 véhicules légers en circulation, dont 72 200 VEÉ, 55 484 VHR et 72 VÉPC.
Estimer le nombre de véhicules électriques légers additionnels mis en circulation entre 2021 et 2050	<i>Horizon 2050 et besoins en main-d'œuvre et formation du secteur des transports électriques et intelligents au Québec</i> (Propulsion Québec, 2020). <i>Trajectoires de réduction d'émissions de GES du Québec – Horizons 2030 et 2050 (Mise à jour 2021)</i> (Dunsky, 2021 pour le MELCC).	L'étude Propulsion 2020 présente deux scénarios de projections du parc de véhicules en Amérique du Nord pour 2030, 2040 et 2050 selon des facteurs classiques pour l'un et l'intégration des nouvelles tendances pour l'autre. C'est ce scénario de baisse du nombre de véhicules légers qui a été retenu pour l'étude. Le nombre de véhicules en Amérique du Nord a été adapté au Québec au prorata selon les données de l'année de référence 2019. L'étude Propulsion 2020 présente également le pourcentage de VEÉ dans le parc nord-américain en 2030, 2040 et 2050 selon un scénario pessimiste, un scénario réaliste et un scénario optimiste. Le scénario réaliste a été retenu pour 2030 (30 % de VEÉ) et le scénario optimiste a été appliqué pour 2050 (90 % de VEÉ). La moyenne des pourcentages de kilomètres passagers réalisés par des VHR estimées en 2030 et 2050 pour les quatre trajectoires de réduction de GES dans l'étude Dunsky 2021 a été utilisée, soit 5,15 % et 7,49 %. Pour le pourcentage de VÉPC en 2050, il a été considéré qu'il correspondait au pourcentage manquant pour atteindre 100 % une fois les VEÉ (90 %) et les VÉPC (7,49 %), soit 2,51 %. Par la suite, afin de simplifier les projections, il a été considéré que l'évolution du pourcentage de VEÉ, VHR et VÉPC de 2021 à 2030, puis de 2030 à 2050, se faisait linéairement. Enfin, un nombre de VEÉ, VHR et VÉPC additionnels par année a été calculé à partir du nombre de VEÉ, VHR et VÉPC en circulation chaque année.
Estimer le nombre de véhicules électriques légers remplacés entre 2021 et 2050	<i>Étude sur l'application d'un mécanisme de responsabilité élargie des producteurs pour les batteries au lithium-ion des véhicules électriques au Québec</i> (Propulsion Québec, 2020). Données de la SAAQ sur les accidents graves et mortels de 2014 à 2019. Gas vs. Electric Car Fires [2022 Findings] (AutoinsuranceEZ, 2022)	Les véhicules électriques légers remplacés sont la somme des véhicules arrivés en fin de vie qui ont été considérés comme étant remplacés, des véhicules accidentés et des véhicules faisant défaut. La durée de vie moyenne des batteries des véhicules électriques légers est estimée à 10 ans selon l'étude de Propulsion Québec 2020. Selon les données de la SAAQ, le taux d'accidents graves et mortels est de 0,06 % des véhicules en circulation. Il est

Étape	Source des données utilisées	Hypothèse
		estimé que ces accidents nécessitent le remplacement du véhicule. Les taux de défaut sont pour toute la durée de vie des véhicules. Ils ont ensuite été divisés par la durée de vie pour obtenir le taux annuel de défaut pour les différentes motorisations. On obtient 0,003 % pour les VEÉ et 0,194 % pour les VHR et pour les VÉPC, en l'absence de données, un taux de 0,1 % a été utilisé.
Estimer la quantité de matériaux utilisés et générés	<i>The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions</i> (AIE, version révisée, mars 2022) <i>Battery Raw Materials</i> (Argonne National Lab, 2021) Données de constructeurs sur la capacité des batteries en kilowattheure et la puissance des moteurs électriques en kilowatt	Des ratios de composition en kg/véhicules ont été calculés pour chaque composante et chaque type de véhicules à partir de leur composition et des quantités de composantes par véhicules. Ces ratios ont ensuite été appliqués au nombre de véhicules ajoutés et remplacés chaque année. Capacité moyenne des batteries : VEÉ 75 kWh, VHR 15 kWh et VÉPC 2 kWh. Puissance moyenne des moteurs électriques : VEÉ 200 kW, VHR 100 kW et VÉPC 125 kW. Puissance moyenne des piles à combustible (VÉPC uniquement) : 38 kW

5.1.2.2 Véhicules électriques lourds

Les véhicules électriques lourds incluent les camions, les bus et les véhicules outils. Le tableau 27 présente les différentes étapes menant à l'estimation des quantités, les sources utilisées et les différentes hypothèses.

Tableau 27 Approche méthodologique – véhicules électriques lourds

Étape	Source des données utilisées	Hypothèse
Quantifier le nombre de véhicules électriques lourds mis en circulation jusqu'en 2021	Données de la SAAQ pour les années 2012 à 2021 sur le nombre total de véhicules lourds en circulation et sur le nombre de véhicules lourds électriques, hybrides rechargeables et à hydrogène.	La SAAQ n'a commencé à colliger de façon distincte les VHR qu'en 2017. Il n'y a donc pas de VHR comptabilisé pour les années antérieures. En 2012, il y avait un total de 413 192 véhicules lourds en circulation, dont 393 VEÉ et un nombre indéterminé de VHR et de VÉPC. En 2021, il y avait un total de 612 184 véhicules lourds en circulation, dont 1 000 VEÉ, 5 VHR et 3 VÉPC.
Estimer le nombre de véhicules électriques lourds additionnels mis en circulation	<i>Horizon 2050 et besoins en main-d'œuvre et formation du secteur des transports électriques et intelligents au Québec</i> (Propulsion Québec, 2020). <i>Trajectoires de réduction d'émissions de GES du Québec – Horizons 2030</i>	L'étude Propulsion 2020 présente deux scénarios de projections du parc de véhicules en Amérique du Nord pour 2030, 2040 et 2050 selon des facteurs classiques pour l'un et l'intégration des nouvelles tendances pour l'autre. C'est ce scénario de baisse du nombre de véhicules légers qui a été retenu pour l'étude. Le nombre de véhicules en



Étape	Source des données utilisées	Hypothèse
entre 2021 et 2050	<i>et 2050 (Mise à jour 2021)</i> (Dunsky, 2021 pour le MELCC).	Amérique du Nord a été adapté au Québec au prorata selon les données de l'année de référence 2019. L'étude Propulsion 2020 présente également le pourcentage de VEÉ lourds dans le parc nord-américain en 2030, 2040 et 2050 selon un scénario pessimiste, un scénario réaliste et un scénario optimiste. Le scénario réaliste a été retenu pour 2030 (15 % de VEÉ lourds) et le scénario optimiste a été appliqué pour 2050 (50 % de VEÉ). La moyenne des pourcentages de kilomètres passagers réalisés par des VHR estimées en 2030 et 2050 pour les quatre trajectoires de réduction de GES dans l'étude Dunsky 2021 a été utilisée, soit 3,47 % et 2,21 %. Pour le pourcentage de VÉPC en 2030 et 2050, il a été considéré qu'il correspondait au pourcentage manquant pour atteindre 100 % une fois les VEÉ et les VHR déterminés, et en considérant une partie des véhicules lourds conventionnels (moyenne des scénarios de l'étude de Dunsky, soit 78,7 % en 2030 et 4,5 % en 2050), ce qui donne 2,85 % en 2030 et 43,3 % en 2050. Par la suite, afin de simplifier les projections, il a été considéré que l'évolution du pourcentage de VEÉ, VHR et VÉPC de 2021 à 2030, puis de 2030 à 2050, se faisait linéairement. Enfin, un nombre de VEÉ, VHR et VÉPC additionnels par année a été calculé à partir du nombre de VEÉ, VHR et VÉPC en circulation chaque année.
Estimer le nombre de véhicules électriques lourds remplacés entre 2021 et 2050	<i>Étude sur l'application d'un mécanisme de responsabilité élargie des producteurs pour les batteries au lithium-ion des véhicules électriques au Québec</i> (Propulsion Québec, 2020). Données de la SAAQ sur les accidents graves et mortels de 2014 à 2019. Gas vs. Electric Car Fires [2022 Findings] (AutoinsuranceEZ, 2022)	Les véhicules électriques lourds remplacés sont la somme des véhicules arrivés en fin de vie qui ont été considérés comme étant remplacés, des véhicules accidentés et des véhicules faisant défaut. La durée de vie moyenne des véhicules électriques lourds est estimée à 10 ans selon l'étude de Propulsion Québec 2020. Selon les données de la SAAQ, le taux d'accidents graves et mortels est de 0,06 % des véhicules en circulation. Il est estimé que ces accidents nécessitent le remplacement du véhicule. Les taux de défaut sont pour toute la durée de vie des véhicules. Ils ont ensuite été divisés par la durée de vie pour obtenir le taux annuel de défaut pour les différentes motorisations. On obtient 0,003 % pour les VEÉ et 0,194 % pour les VHR et pour les VÉPC, en l'absence de données, un taux de 0,1 % a été utilisé.
Estimer la quantité de matériaux utilisés et générés	<i>The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions</i> (AIE, version révisée, mars 2022)	Des ratios de composition en kg/véhicules ont été calculés pour chaque composante et chaque type de véhicules à partir des ratios en kg/kWh (batteries) ou en kg/kW (moteur électrique, pile à combustible).



Étape	Source des données utilisées	Hypothèse
	<i>Battery Raw Materials</i> (Argonne National Lab, 2021) Données de constructeurs sur la capacité des batteries en kilowattheure et la puissance des moteurs électriques en kilowatt.	Ces ratios ont ensuite été appliqués au nombre de véhicules lourds ajoutés et remplacés chaque année. Capacité moyenne des batteries : VEÉ 221 kWh, VHR 90 kWh et VÉPC 12 kWh. Puissance moyenne des moteurs électriques : VEÉ 274 kW, VHR 230 kW et VÉPC 287 kW. Puissance moyenne des piles à combustible (VÉPC uniquement) : 51 kW

5.1.2.3 Bornes de recharge

Le tableau 28 présente les différentes étapes menant à l'estimation des quantités, les sources utilisées et les différentes hypothèses.

Tableau 28 Approche méthodologique – bornes de recharge

Étape	Source des données utilisées	Hypothèse
Quantifier le nombre de bornes de recharge installées jusqu'en 2021	Données statistiques du gouvernement du Québec sur le nombre de remboursements accordés pour l'installation de bornes de recharge à domicile (2012 à 2021). Données de l'AVEQ sur le nombre de bornes publiques (2021). Données de la SAAQ pour les années 2012 à 2021 sur le nombre total d'automobiles et de camions légers en circulation et sur le nombre d'automobiles et de camions légers électriques, hybrides rechargeables et à hydrogène. Déploiement des bornes de recharge rapide au Québec. État des lieux et enjeux (HEC Montréal, 2021)	Le nombre de bornes ICI a été calculé à partir du nombre de VÉ lourds, en utilisant le ratio d'une borne ICI pour deux VÉ lourds. Le nombre de bornes publiques de niveau 2 a été calculé pour 2012 à 2020 en utilisant un ratio de 5 bornes publiques de niveau 2 pour 100 VÉ légers (constaté en 2021). Le nombre de bornes publiques BRCC provient de l'étude HEC Montréal, 2021.
Estimer le nombre de bornes de recharge additionnelles installées entre 2021 et 2050	Nombre de VÉ en circulation de 2022 à 2050 tel qu'estimé dans les sections précédentes. Hypothèses Stantec.	Des ratios de nombre de bornes par véhicules ont été utilisés : • Une borne résidentielle pour deux véhicules légers (hypothèse); • Une borne ICI pour deux véhicules lourds (hypothèse); • Une borne publique BRCC pour 130 véhicules légers en 2022, modifiée linéairement pour atteindre le ratio d'une borne publique BRCC pour 100 véhicules légers à partir de 2030 (HEC Montréal, 2021). À partir de 2022, il a été considéré que le nombre de nouvelles bornes publiques de niveau 2 installées



Étape	Source des données utilisées	Hypothèse
		correspond à 40 % du nombre des nouvelles bornes publiques BRCC installées chaque année.
Estimer le nombre de bornes de recharge remplacées entre 2021 et 2050	Hypothèses Stantec	Les bornes électriques remplacées sont la somme des bornes arrivées en fin de vie qui ont été considérées comme étant remplacées et des bornes endommagées ou faisant défaut. La durée de vie moyenne des bornes de recharge est estimée à 10 ans pour les bornes résidentielles et à 8 ans pour les bornes ICI et publiques, car soumise à des conditions d'utilisation plus rudes. Il a été considéré que les bornes résidentielles ne nécessitent pas d'être remplacées durant leur durée de vie. Il a été considéré que 0,5 % des bornes publiques et des bornes ICI installées doivent être remplacées chaque année pour cause de bris ou de défaut.
Estimer la quantité de matériaux utilisés et générés	<i>Metal in Electric Vehicle Charging Infrastructure</i>, Grand View Research, 2021. Pour les données concernant le cuivre, l'étude <i>The Road to Sustainable Mobility is Paved with Copper</i> (Copper Development Association Inc., 2017) a été utilisée.	Des ratios de composition en kg/borne ont été calculés pour chaque composante et chaque type de borne à partir de leur composition et des quantités de composantes par kW. Ces ratios ont ensuite été appliqués au nombre de bornes ajoutées et remplacées chaque année. Puissance et poids des différents types de bornes : • Bornes résidentielles : 7,2 kW et 7,6 kg • Bornes publiques niveau 2 : 7,2 kW et 13,7 kg • Bornes publiques BRCC : 61,6 kW et 44,2 kg • Bornes ICI : 397,5 kW et 326 kg



5.1.3 Résultats

Les tableaux 29 et 30 détaillent, respectivement, les quantités estimées de matériaux utilisés pour les VÉ légers, lourds et les bornes de recharge. Les résultats détaillés par type de VÉ sont en annexe E.

Tableau 29 Quantités estimées de matériaux utilisés par le transport électrique – VE légers, lourds et bornes de recharge (t/an)

	2021	2030	2050
Quantité totale de matériaux utilisés	13 104	124 681	277 826
• Aluminium	4 624	43 716	93 850
• Bore	0,6	4,7	8,5
• Fibre de carbone	2,2	780	1 014
• Fibre de verre	0,1	90	592
• Manganèse	224	1 929	2 184
• Métaux ferreux	808	9 760	29 035
• Phosphate	161	1 568	19 751
• Plastique	666	6 185	12 938
• Polymère	9,76	73	59
• Silicium	0,02	20	132
• Autres	2 643	25 414	53 059
• Minéraux critiques et stratégiques	3 965	35 141	65 203
Cobalt	257	2 139	2 418
Cuivre	819	7 999	18 031
Graphite	1 675	15 679	32 787
Lithium	211	1 908	3 556
Nickel	986	7 279	8 166
ETR	17	136	246



Tableau 30 Quantités estimées de matériaux générés par le transport électrique – VE légers, lourds et bornes de recharge (t/an)

	2021	2030	2050
Quantité totale de matériaux utilisés	1 587	16 521	139 104
• Aluminium	618	6 062	48 382
• Bore	0,0	0,5	4,8
• Fibre de carbone	0,0	11	734
• Fibre de verre	0,0	1,2	245
• Manganèse	0,7	191	1 538
• Métaux ferreux	155	1 230	11 350
• Phosphate	0,5	180	8 261
• Plastique	2,1	529	6 909
• Polymère	678	2 718	0,0
• Silicium	0,0	0,3	55
• Autres	120	2 517	25 681
• Minéraux critiques et stratégiques	12	3 081	35 944
Cobalt	0,8	212	1 705
Cuivre	2,5	632	8 864
Graphite	5,1	1 331	17 475
Lithium	0,6	168	1 983
Nickel	3,0	723	5 779
ETR	0,1	13	138

5.2 PROCESSUS ACTUELS DE CONCEPTION ET GESTION EN FIN DE VIE

5.2.1 Conception

5.2.1.1 Véhicules électriques légers

Le tableau 31 détaille la liste des manufacturiers par composantes de VEÉ, VHR et VÉPC. Actuellement, le Québec ne compte aucune usine de fabrication de batterie pour véhicule électrique léger. Cependant des projets d'implantation sont en cours de discussion ou en planification, notamment :

- Martinrea International et NanoXplore Inc. ont ouvert ensemble un laboratoire de batteries pour VÉ en avril 2022. À la suite des résultats de cette phase d'essai, le tandem vise à ouvrir une usine d'une capacité de 10 GWh de cellules de batteries à Montréal;
- Britishvolt (Londres) et StromVolt (Ontario) ambitionnent chacun de construire au Québec une usine de production de batteries Li-ion.

Seuls les moteurs des véhicules légers électriques sont fabriqués au Québec ou en Ontario, le reste des composantes sont fabriquées à l'international.

Tableau 31 Liste des manufacturiers de VEÉ, VHR et VÉPC légers québécois et internationaux

Composante	Manufacturier	Constructeur associé
Batterie	Groupe Bolloré (Boucherville, Québec)	Mercedes-Benz
	Contemporary Amperex Technology Co. Limited	Tesla, Volkswagen, PSA, Toyota, Honda, BMW, Nissan, Hyundai et Daimler
	Panasonic	Toyota, Tesla, Volkswagen et Mercedes-Benz
	Tesla	Tesla
	LG Chem	Ford, Tesla, Hyundai et Chevrolet
	Samsung	Audi, Volkswagen, BMW, Ford et Fiat
	Customcells	Porsche
	Automotive Energy Supply Corporation	Nissan et Renault
	BYD Corporation	Tesla
	Mitsubishi / GS Yuasa	Mitsubishi
	SK Innovation	Hyundai, Volkswagen, Kia et Mercedes-Benz
Moteur électrique	Dana TM4 (Boucherville, Québec)	-
	Magna International (Canada, Ontario)	-
Pile à combustible (VÉPC uniquement)	HDF Industry (France)	-
	Toyota	Toyota



5.2.1.2 Véhicules électriques lourds

Contrairement aux véhicules légers, il existe des fabricants québécois de véhicules électriques lourds et de certaines composantes. Le tableau 32 détaille la liste des manufacturiers québécois et internationaux pour les composantes des VEÉ, VHR et VÉPC lourds.

Tableau 32 Liste des manufacturiers de VEÉ, VHR et VÉPC lourds québécois et internationaux

Composante	Manufacturier
Batterie LFP, NCA et NMC	Lion électrique (Québec) Camion, bus et véhicules lourds outils.
	Novabus (Québec) Bus scolaires
	Scania (France) Batteries pour transport routier (camion)
	Effenco (Québec) Batteries pour camion outils principalement, tel que des camions de collecte Derichebourg par exemple.
Moteur électrique	Scania (France)
	Dana TM4 (Boucherville, Québec)
	Magna International (Canada, Ontario)
Pile à combustible (VÉPC uniquement)	HDF Industry (France)
	Toyota

5.2.1.3 Bornes de recharge

Plusieurs entreprises basées au Québec commercialisent des bornes de recharge pour VEÉ et VHR et certaines d'entre elles les fabriquent directement au Québec. Le tableau 33 détaille la liste des entreprises basées au Québec et commercialisant des bornes de recharge sur le territoire de la province.

Tableau 33 Principaux manufacturiers de bornes de recharge pour VEÉ et VHR au Québec et à l'international

Manufacturier	Lieu de manufacture des bornes de recharge
ABB	International, dont une filière au Québec
AddÉnergie Technologies (Flo)	Québec
Bectrol inc.	Québec
Elmec (Evduty)	Québec
Kilowattpack	Québec



Manufacturier	Lieu de manufacture des bornes de recharge
Le Circuit électrique	Québec
Leviton Canada	États-Unis
MCM intégration inc.	Québec
Recharge Véhicule électrique	Québec
Renewz	Québec
TechnoVE	Québec

5.2.2 Gestion en fin de vie

5.2.2.1 Véhicules électriques légers et lourds

Les pratiques de gestion de fin de vie actuelles et la liste des récupérateurs, conditionneurs et recycleurs des VÉ légers et lourds, au Québec et à l'international, sont détaillées, respectivement, aux tableaux 34 et 35.

Tableau 34 Pratiques actuelles de gestion en fin de vie des VÉ légers et lourds

Composantes	Traitement ou valorisation actuels
Batterie LFP, NCA et NMC	Pyrométallurgie : procédé qui consiste à faire fondre les composantes de batteries à haute température à l'intérieur d'une fonderie afin d'en extraire les métaux précieux comme le cobalt. Opération qui consomme beaucoup d'énergie, émet des polluants et ne permet pas la récupération de nombreuses matières, dont le lithium. Recyclage mécanique : démantèlement et séparation des composantes de la batterie afin de recueillir un mélange qui contient les métaux (nickel, lithium, etc.). Création d'une « blackmass », un alliage de métal concentrant les matériaux Ni, Co, Li, Al, Cu, Mn issus du prétraitement. Ils peuvent ensuite être traités par voie hydrométallurgique. Hydrométallurgie : combinée à un prétraitement manuel des batteries, l'hydrométallurgie permet de récupérer la plupart des métaux et composantes non métalliques d'une batterie. Les batteries sont traitées par une solution chimique aqueuse afin de séparer les métaux dissous. Biométallurgie (procédé en développement) : les batteries sont traitées par une solution chimique utilisant des solvants biologiques. En France et au Québec (Umicore et Recyclage Lithion par exemple), les industriels associent un procédé mécanique et hydrométallurgique pour traiter les cellules actives et d'extraire les métaux actifs des batteries de véhicules électriques. Favorise l'extraction et la purification de métaux critiques tels que le cobalt, le nickel et le lithium et de les transformer en matières premières directement utilisables pour produire de nouvelles batteries.
Moteur électrique	Recyclage mécanique : broyage du moteur et séparation mécanique des matériaux.

Composantes	Traitement ou valorisation actuels
Pile à combustible (VÉPC uniquement)	Pyrométallurgie : procédés actuels, cependant ne sont pas adaptés pour le recyclage des piles à combustible puisqu'il produit des composés fluorés hautement toxiques avec les membranes PEM. Actuellement, il n'existe pas de procédés sur mesure de recyclage, dédié aux piles à combustible.

Tableau 35 Liste des récupérateurs, conditionneurs et recycleurs actuels des composantes de VÉ légers et lourds au Québec et à l'international

Nom	Type	Composantes visées
Recyclage Lithion (Québec)	Conditionneur, recycleur Procédés mécaniques et d'hydrométallurgie utilisés	Batterie LFP, NCA et NMC
Glencore (sites au Canada)	Conditionneur, recycleur Pyrométallurgie et hydrométallurgie	Batterie LFP, NCA et NMC
Retriev Technologies (Usines en Ohio, Californie et en Colombie-Britannique)	Conditionneur, recycleur Pyrométallurgie et hydrométallurgie	Batterie LFP, NCA et NMC
Umicore (Belgique)	Conditionneur, recycleur Pyrométallurgie et hydrométallurgie	Batterie LFP, NCA et NMC
Valdi (France)	Conditionneur, recycleur Pyrométallurgie et hydrométallurgie	Batterie LFP, NCA et NMC
Eramet (France)	Recycleur Hydrométallurgie	Batterie LFP, NCA et NMC
SARP Industrie, filiale de Véolia (France)	Conditionneur, recycleur Broyage et hydrométallurgie	Batterie LFP, NCA et NMC
Neometals Ltd et Alphamet (Québec)	Recycleur Procédés mécaniques et d'hydrométallurgie utilisés	Batterie LFP, NCA et NMC
SNAM (France)	Conditionneur, recycleur Broyage, pyrolyse, hydrométallurgie	Batterie LFP, NCA et NMC
Accurec (Allemagne)	Conditionneur, recycleur Broyage et production d'une blackmass	Batterie LFP, NCA et NMC
Redux (Allemagne)	Conditionneur, recycleur Broyage et production d'une blackmass	Batterie LFP, NCA et NMC
NickelHütte (Allemagne)	Recycleur Hydrométallurgie	Batterie LFP, NCA et NMC
Akkuser (Finlande)	Conditionneur, recycleur Broyage et production d'une blackmass	Batterie LFP, NCA et NMC
Dowa Eco-System Co Ltd (Japon)	Conditionneur, recycleur Broyage, pyrolyse, hydrométallurgie	Batterie LFP, NCA et NMC
Nippon Recycle Center Corp (Japon)	Conditionneur, recycleur Broyage, pyrolyse, hydrométallurgie	Batterie LFP, NCA et NMC
Sumitomo Metal Mining (Japon)	Conditionneur, recycleur Broyage, pyrolyse, hydrométallurgie	Batterie LFP, NCA et NMC
SungEel HiTech (Corée du Sud)	Recycleur Hydrométallurgie	Batterie LFP, NCA et NMC
Brunp Recycling Technology (Chine)	Recycleur Hydrométallurgie	Batterie LFP, NCA et NMC



Nom	Type	Composantes visées
New Energy Materials (Chine)	Recycleur Hydrométallurgie	Batterie LFP, NCA et NMC
Soundon New Energy (Chine)	Recycleur Hydrométallurgie	Batterie LFP, NCA et NMC
Green Eco-Manufacture Hi-Tech (Chine)	Recycleur Hydrométallurgie	Batterie LFP, NCA et NMC
Huayou (Chine)	Recycleur Hydrométallurgie	Batterie LFP, NCA et NMC
American Manganese Inc (États-Unis)	Recycleur Hydrométallurgie et formation de précurseurs NMC et NCA de qualité batterie	Batterie NCA et NMC
Li-Cycle Technology (Canada)	Conditionneur, recycleur Broyage, pyrolyse, hydrométallurgie	Batterie LFP, NCA et NMC
Innord (Boucherville, Québec)	Récupérateur, conditionneur et recycleur	Moteur électrique (principalement les aimants permanents pour retirer les ETR)
Bronneberg (France)	Récupérateur, conditionneur et recycleur	Moteur électrique
Interbaro Recycling (Pays-Bas)	Récupérateur, conditionneur et recycleur	Moteur électrique
Recyclage Québec (Québec)	Récupérateur, conditionneur et recycleur	Moteur électrique

5.2.2.2 Bornes de recharge

Au Québec, les bornes de recharge n'étant pas visées par le Règlement sur la récupération et la valorisation de produits par les entreprises, elles ne sont pas soumises à un processus défini de gestion en fin de vie.

Le tableau 36 détaille les pratiques actuelles de gestion en fin de vie pour chaque composante.

Tableau 36 Pratiques actuelles de gestion en fin de vie des bornes de recharge au Québec

Composantes	Traitement ou valorisation actuels
Structure en métal	Recyclé – géré par la filière de récupération des métaux
Câblage et composantes électroniques (écran)	Recyclé – géré par la filière de récupération des produits électroniques

Il n'existe actuellement ni au Québec ni au Canada de recycleur spécialisé dans la récupération et la valorisation des bornes de recharge. Aux États-Unis, l'entreprise Utility Recyclers International propose de recycler ces équipements.



5.2.3 Bonnes pratiques, freins et enjeux

5.2.3.1 Véhicules électriques légers et lourds

Stratégie 1 : écoconception

L'écoconception touche principalement les batteries des VÉ. Au cours des dernières années, les avancées technologiques dans le domaine ont permis de rendre les batteries des VÉ plus efficaces et plus légères et ainsi de faire diminuer les quantités de matériaux nécessaires à leur fabrication.

Les bonnes pratiques en écoconception sont détaillées ci-après pour chaque composante des véhicules électriques.

Une standardisation de la conception des véhicules et de leurs composantes permettrait d'une part de prolonger la durée de vie des véhicules en remplaçant certains éléments critiques comme les batteries, et d'autre part de favoriser le recyclage des différents matériaux. La Commission européenne a proposé dans le cadre d'une directive en 2020 de moderniser la législation existante sur les piles afin de l'élargir aux batteries de VÉ et d'intégrer des exigences telles que l'utilisation de matières issues de sources responsables avec un usage limité de substances dangereuses, la teneur minimale en matières recyclées, l'empreinte carbone, la performance, la durée et le marquage. Dans la même optique, une directive européenne instaure que dès 2025, la déclaration des taux de contenus recyclés sera rendue obligatoire d'après une directive européenne. En 2030, les taux imposés seront de 12 % pour le cobalt, 4 % pour le lithium et 4 % pour le nickel. Ils passeront respectivement à 20 %, 10 % et 12 % en 2035. Ceci permettra de favoriser l'utilisation des matériaux recyclés dans la production de nouvelles batteries.

Enfin, la performance des piles à combustible peut être améliorée. En effet, les piles à combustible conventionnelles, au fil de leur utilisation, perdent de la tension et cessent de fonctionner. Ce problème survient lorsque des molécules d'alcool (méthanol ou éthanol) contenues dans le compartiment anodique de la pile traversent la membrane qui les sépare du compartiment cathodique. Ce dernier contient des molécules d'oxygène, et c'est leur réaction indésirable avec l'alcool qui provoque la chute de tension. Un projet de recherche et développement, mené par l'INRS au Canada, vise au développement d'une pile à combustible sans membrane qui fonctionne avec l'oxygène de l'air et donc empêche cette réaction indésirable.

L'écoconception des batteries fait face à plusieurs freins et enjeux. En particulier, la multiplicité des constructeurs et du design des VÉ peut causer des obstacles à leur démantèlement. De plus, la standardisation pourrait se voir limitée par des enjeux légaux liés aux secrets industriels (protection du savoir-faire, brevet, etc.) ainsi qu'une potentielle résistance des manufacturiers au partage des technologies.

La technologie des piles à combustible étant encore en développement, leur conception évolue rapidement, ce qui limite la prise en compte de l'écoconception.



Stratégie 2 : consommation et approvisionnement responsables

Les véhicules électriques contiennent une quantité importante de matières premières comme des métaux et des minerais notamment issus de l'extraction minière. L'adoption de pratiques d'approvisionnement responsable permettrait de limiter le recours à des matières vierges : ainsi un pourcentage de ces matières pourrait être issu de l'économie circulaire.

En Europe, dès 2025, la déclaration des taux de contenus recyclés sera rendue obligatoire d'après une directive européenne mise à jour en 2020. En 2030, les taux imposés seront de 12 % pour le cobalt, 4 % pour le lithium et 4 % pour le nickel. Ils passeront respectivement à 20 %, 10 % et 12 % en 2035.

Ces exigences induisent des initiatives chez les industriels. Notamment, le fabricant suédois Northvolt a produit sa première batterie NMC issue de matériaux recyclés.

Stratégie 3 : optimisation des opérations

Afin d'optimiser l'utilisation et la durée de vie des batteries des VÉ légers et lourds, il est possible de viser la bonne fenêtre de recharge. La batterie d'un VÉ se détériore prématurément lors des charges complètes et des décharges totales. Pour éviter d'user prématurément celle-ci, il faut à maintenir son niveau de charge entre 20 % et 80 %.

Dans le cas des piles à combustible, les pannes de compresseurs soumis à des conditions transitoires anormales qui ont provoqué une usure plus élevée sont la principale cause de défaillance. Une technologie de suivi, utilisant des algorithmes, permet de déterminer et suivre l'état de dégradation d'une pile à combustible.

Stratégie 4 : économie collaborative

L'économie collaborative existe déjà pour les VÉ légers. Ainsi, les systèmes d'autopartage comme il en existe déjà au Québec, permettent à leurs membres d'utiliser des véhicules moyennant un abonnement et une contrepartie financière en fonction de l'utilisation. De la même manière que pour la stratégie 9 concernant l'économie de fonctionnalité, l'utilisation de services d'autopartage en remplacement d'un véhicule personnel permet de limiter le nombre de VÉ légers en circulation et ainsi le nombre de moteurs électriques et de batteries.

Stratégie 5 : location

L'utilisation d'un véhicule de location en remplacement d'un véhicule personnel permet de limiter le nombre de VÉ légers en circulation et ainsi le nombre de moteurs électriques et de batteries.

La location de véhicules est largement répandue et les entreprises de location commencent à proposer des VÉ. L'offre et la disponibilité des VÉ sont cependant limitées, mais pourraient se développer dans les années à venir.



Stratégie 6 : entretien et réparation

Un entretien de prévention régulier des véhicules et équipements permettra d'allonger leur durée de vie. En Europe, le constructeur allemand Volkswagen s'est associé avec Northvolt dans des projets de recherche sur les batteries des VÉ visant à augmenter leur durée de vie.

En France, le groupe Volkswagen a ouvert huit centres d'entretien des batteries de VÉ de leur marque, ainsi que Audi et Seat (illustré à la figure 19).



Figure 19 Centre d'entretien des batteries du groupe Volkswagen

En France, il existe d'autres sites ayant pour but la réparation des batteries des VÉ. Le groupe Stellantis compte six centres de réparations par exemple.

Stratégie 7 : don et revente

Les batteries de VÉ usagées peuvent être revendues pour être réintégrées dans des véhicules encore en circulation. Au Japon, Nissan propose à ses clients des batteries reconditionnées à un coût environ 40 % inférieur à celui d'une batterie neuve. Compte tenu de la perte en efficacité des batteries usagées, ces dernières ne sont proposées que pour les voitures arrivant en fin de vie. Ce reconditionnement n'est pour le moment pas proposé en Amérique du Nord par la marque.

Stratégie 8 : reconditionnement

Après une certaine durée d'utilisation, les batteries perdent en efficacité, même après un reconditionnement. Elles ne sont alors plus utilisables dans des applications exigeant une forte autonomie comme les VÉ, mais elles peuvent être réutilisées dans des contextes où la demande en énergie est moins grande ou qui ne nécessitent pas une autonomie importante.

Par exemple, dans son usine d'Ingolstadt en Allemagne, le constructeur Audi réutilise les batteries usagées de ses voitures dans des tracteurs de remorquage et des transpalettes (figure 20).



Figure 20 Réutilisation de batteries de VÉ usagées dans des tracteurs de remorquage

Aux États-Unis, l'entreprise Spiers New Technologies (SNT) inc. est spécialisée dans le reconditionnement des batteries et permet ainsi de les redéployer dans des véhicules lorsque possible. L'entreprise procède également au reconditionnement des batteries en vue d'autres utilisations, notamment dans le but de concevoir des systèmes de stockage d'énergie. En effet, le reconditionnement des batteries et leur utilisation pour le stockage d'énergie provenant de sources renouvelables – comme l'énergie solaire ou éolienne – est une opportunité importante pour la réutilisation des batteries en fin de vie. Ces systèmes de stockage d'énergie sont des éléments cruciaux des réseaux électriques, car ils permettent notamment d'éviter les surcharges et de fournir de l'électricité en cas de défaillance du réseau. Actuellement, plus de 80 % du stockage de l'énergie à grande échelle aux États-Unis se fait grâce à des batteries lithium-ion. Ainsi, l'utilisation de batteries provenant des VÉ permettrait de prolonger leur durée de vie de 6 à 15 ans. L'entreprise SNT a par ailleurs mis sur pied une technologie nommée Watt Towers, qui consiste en une tour de stockage d'énergie de grande capacité, fabriquée à partir de batteries de VÉ. Cette technologie permettrait de fournir de l'énergie à des résidences ou des commerces.

D'autres entreprises s'intéressent à la réutilisation des batteries de VÉ, notamment des manufacturiers automobiles eux-mêmes. On peut prendre l'exemple de Tesla avec le Tesla Powerwall : un système de stockage d'énergie produite par des panneaux solaires et permettant de fournir une grande quantité



d'électricité en cas de coupure de courant. À plus petite échelle, Toyota a réutilisé des batteries usagées pour stocker de l'énergie solaire et fournir ainsi de l'énergie à un magasin 7-Eleven aux États-Unis.

De même, les batteries des véhicules électriques de Renault sont reconditionnées pour créer des modules permettant de stocker des énergies renouvelables pour alimenter des bâtiments (illustré à la figure 21).



Figure 21 **Stockage d'énergie stationnaire par d'anciennes batteries de VÉ (source : Groupe Renault)**

Également, à Belle-Île-en-Mer (France), la réutilisation des batteries lithium-ion de Renault Zoe a permis de stocker l'énergie produite en journée par des panneaux solaires installés sur le toit d'une école pour la restituer pendant la nuit. Les batteries lithium-ion voient, quant à elles, leur cycle de vie prolongé au minimum de 5 années supplémentaires.

On peut également noter l'exemple de l'île de Porto Santo (Portugal), qui s'est doté d'un stockage stationnaire grâce à des batteries de VÉ légers de seconde vie, ce qui leur a permis de réduire leur dépendance aux énergies fossiles, tout en favorisant le recours aux énergies renouvelables.

Selon les modèles de batteries, ces dernières peuvent être démantelées afin d'en récupérer et d'en utiliser les cellules. C'est le cas par exemple de IT Asset Partners (ITAP) qui réutilise les cellules dans différentes technologies selon leurs capacités. Ainsi, les cellules peuvent trouver une seconde vie dans des fauteuils roulants électriques, des drones ou encore des systèmes de vidéosurveillance alimentés par de l'énergie solaire.

Néanmoins, un enjeu de sécurité apparaît lorsque les cellules sont utilisées dans des contextes très différents de celui pour lequel elles avaient été conçues et lorsqu'elles sont manipulées par des individus

non professionnels. En effet, les bénéfices pouvant être engendrés par la revente des cellules de batteries poussent des individus à participer à cette économie sans connaissance ou respect des standards de sécurité et de qualité. Cela entraîne des risques d'incendie ou d'explosion, comme cela a pu être observé pour les cigarettes électroniques.

Stratégie 9 : économie de fonctionnalité

L'utilisation du transport en commun en remplacement d'un véhicule personnel serait ici un exemple de la vente de l'usage et non du bien. Cela permettrait de limiter le nombre de VÉ légers en circulation et ainsi le nombre de moteurs électriques et de batteries.

À l'échelle des composants, les batteries de VÉ sont actuellement vendues comme parties intégrantes des véhicules, mais ce modèle peut être repensé. Ainsi, les batteries peuvent demeurer la propriété du fabricant qui est responsable de leur bon fonctionnement. Celui-ci facture alors le service de mise à disposition de systèmes de stockage d'électricité. Ce modèle permettrait d'assurer que les batteries soient reconditionnées ou recyclées en fin de vie, puisqu'elles sont automatiquement remises à leur propriétaire en fin de vie. Ce modèle de location a été appliqué chez Renault pour ses VÉ ainsi que Proterra pour ses autobus électriques.

Il existe cependant des freins à une telle pratique, notamment les craintes des consommateurs d'avoir de la difficulté à revendre leur véhicule et la logistique permettant le démontage et le retour des batteries aux propriétaires.

Stratégie 10 : écologie industrielle

De la même manière que pour les panneaux solaires, les fabricants de moteurs électriques et de batteries et de leurs composantes pourraient intégrer des unités de recyclage à même leurs installations ou à proximité afin de faciliter le retour des matières dans la production de nouveaux éléments.

Le nombre d'usines est cependant limité alors que l'étendue des éléments en fin de vie à récupérer est planétaire. Il n'est donc pas possible d'associer systématiquement une unité de récupération et recyclage à une usine de production de nouvelles batteries ou de nouveaux moteurs électriques.

Stratégie 11 : recyclage et compostage

La stratégie de recyclage cible différentes composantes des véhicules électriques, notamment les batteries. En effet les batteries font l'objet de plusieurs pratiques permettant d'optimiser leur recyclage, à commencer par l'instauration d'un cadre réglementaire sous forme de REP, soit un système où les producteurs de batteries ou les manufacturiers de véhicules seraient responsables de la gestion en fin de vie des batteries. Plusieurs exemples sont présentés ci-dessous :

- Dans son plan REP 2021-2026, face à l'augmentation très importante attendue des batteries de VÉ, le gouvernement de la Colombie-Britannique prévoit la mise en place d'un système de REP pour leur gestion, afin de favoriser le réemploi et le recyclage et d'éviter les risques encourus par les travailleurs lors des collectes, sur les sites de disposition et les recycleurs de métaux.



- En Californie, environ 400 000 VÉ sont en circulation. Une démarche a été entamée dans le cadre d'un projet de loi afin d'encadrer la fin de vie des batteries lithium-ion des VÉ. Ce projet de loi propose la mise en place d'une REP pour les batteries des VÉ.
- En Europe, la Commission européenne a proposé en 2020 de moderniser la législation existante sur les piles afin de l'élargir aux batteries de VÉ et d'intégrer des exigences sur la réalisation des objectifs de collecte et de recyclage.
- En Angleterre, toute entreprise introduisant des batteries de VÉ sur le marché a pour obligation de les récupérer. Nissan a par ailleurs mis en place, pour sa filiale au Royaume-Uni, un système permettant au consommateur de retourner sa batterie de VÉ auprès de n'importe quel concessionnaire de la marque, et ce sans frais pour le consommateur.
- Enfin, en Chine, la mise en place d'une directive exigeant des producteurs de VÉ qu'ils organisent et financent la gestion des batteries en fin de vie.

Les batteries sont également soumises à la mise en place d'un système d'identification et de traçabilité pour une meilleure récupération des batteries. Ce système est déjà en place en Chine où le gouvernement impose un système d'identification et de traçabilité des batteries. De son côté, l'Union européenne est en discussion autour d'un règlement sur les batteries, déposé le 10 décembre 2020 par la Commission européenne. Ce texte a pour objectif la mise en place d'une filière d'économie circulaire en visant toutes les étapes du cycle de vie des batteries, depuis leur conception jusqu'au traitement des résidus ultimes, et la mise en place d'un « passeport batteries ». Ce système d'identification des batteries qui permettrait d'en connaître la composition et d'encadrer de manière plus stricte à l'avenir la fin de vie, mais également l'ensemble de la chaîne de valeur. En Europe toujours, Toyota se positionne également dans la récupération des batteries de ses véhicules. L'entreprise a développé un système de collecte des batteries de VÉ hybrides par son réseau de détaillants. Ainsi, Toyota récupère plus de 90 % de ses batteries en Europe.

Toyota a également mis en place un programme en Australie pour encourager la récupération des batteries de ses VÉ hybrides. Ce programme est constitué d'incitatifs financiers pour le consommateur, avec une remise de 90 \$ pour le retour d'une batterie de VÉ hybride et une réduction de 450 \$ pour le remplacement d'une batterie si l'ancienne est rapportée.

En mai 2022, le Département de l'Énergie des États-Unis a annoncé le financement de 3,1 milliards de dollars visant à augmenter la production nationale de batteries de VÉ. Ce plan a notamment pour objectif d'améliorer la récupération et le recyclage des batteries afin de limiter le recours à de nouvelles exploitations minières et favoriser l'économie circulaire. Redwood Materials a lancé une initiative visant à recycler et fournir aux fabricants des matériaux entrant dans la composition des batteries. Ford, Volvo, Volkswagen et Toyota ont pour le moment rejoint l'initiative.

Enfin, les piles à combustible font l'objet de développements entourant leur recyclage. En Allemagne, le projet BReCycle a été lancé en 2020 dans le but de définir une nouvelle approche au recyclage des piles à combustible. Elle doit satisfaire à trois exigences : parvenir à un haut degré de récupération des matières premières employées dans les piles à combustible, être compatible avec les contraintes



environnementales, et être viable économiquement. En outre, la forme des matériaux issus du recyclage doit être étudiée afin de faciliter leur réemploi et leur commercialisation.

La mise en place d'une REP pour les batteries de VÉ fait face à plusieurs freins. D'une part les manufacturiers peuvent exprimer des craintes concernant la confidentialité de leur technologie. D'autre part l'industrie du recyclage des batteries n'est pas encore assez développée à l'échelle du territoire. En effet, des coûts de logistique seraient à prévoir pour transporter des batteries sur de longues distances afin de les recycler.

Ce dernier point est cependant à nuancer avec l'engouement des constructeurs automobiles eux-mêmes pour le recyclage des batteries. Plusieurs projets de consortium entre entreprises ont pour but de développer des filières de recyclage des batteries. On peut noter celui formé par BMW Group, Northvolt et Umicore ou encore l'association de Toyota et Chubu Electric Power au Japon qui vise à utiliser les batteries usagées pour le stockage de l'électricité. Les batteries seraient ainsi transformées en centrale d'énergie renouvelable. En Europe, le projet ReLieVe (pour *Recycling of Li-ion batteries for Electric Vehicle*) met en synergie quatre partenaires, à savoir Eramet, SUEZ, Chimie ParisTech et la Norwegian University of Science and Technology pour développer une solution industrielle de recyclage des batteries adaptées au marché européen.

D'autres acteurs ont développé des initiatives individuelles. C'est le cas de Tesla au Nevada dont le projet Gigafactory 1 permettrait de recycler les batteries en fin de vie, mais également celles défectueuses lors de la phase de production. Ce projet permettrait de maximiser la récupération des métaux critiques, comme le lithium et le cobalt, et de tous les métaux constituant les cellules (cuivre, aluminium, acier). En volumes suffisants, ces matériaux pourraient être utilisés dans la production de nouvelles batteries.

Stratégie 12 : valorisation

Stratégie non applicable pour les batteries.

5.2.3.2 Bornes de recharge

Stratégie 1 : écoconception

Les bornes de recharge sont généralement constituées d'une structure en métal durable et de composants électriques et électroniques plus fragiles. Ainsi, l'adoption de standards de conception assurerait que les composants électroniques soient aisément accessibles, facilitant ainsi les opérations de maintenance et prolongeant la durée de vie de l'équipement, ainsi que leur démantèlement et recyclage.

Stratégie 2 : consommation et approvisionnement responsables

Les composants électroniques représentent une part significative de la composition des bornes de recharge. Le renforcement des filières de recyclage des produits électroniques devrait ainsi rendre disponibles des matières recyclées pouvant être utilisées dans la fabrication des bornes.



Stratégie 3 : Optimisation des opérations

Stratégie non applicable pour les bornes de recharge.

Stratégie 4 : Entretien et réparation

Malgré le solide boîtier en métal recouvrant les bornes de recharge publiques, ces dernières sont exposées à des risques de dommages physiques, notamment en cas de collision avec un véhicule. Afin de minimiser le risque de chocs physiques, des équipements protection pourraient être installés autour des bornes lorsque possible. Ce type d'équipement permettrait d'accroître la protection physique des bornes tout en les gardant accessibles pour les utilisateurs et pour les opérations de maintenance.

Parmi les équipements de protection, on peut noter des ceintures de protection en métal (figure 22) ou encore des bornes de protection, notamment utilisées pour protéger les équipements gaziers (figure 23).



Figure 22 Ceinture de protection en métal pour bornes de recharge (source : bollardstreet.com)



Figure 23 Poteaux de protection pour les équipements gaziers (source : energir.com)

Stratégie 5 : Don et revente

Stratégie non applicable pour les bornes de recharge.



Stratégie 6 : Reconditionnement

L'installation de bornes de recharge publiques requiert une emprise sur le terrain et des travaux de raccordements électriques. Afin d'éviter une consommation non nécessaire des ressources pour effectuer ces travaux, les bornes qui ne sont plus utilisées peuvent faire l'objet d'un reconditionnement permettant de les mettre aux normes et de les rendre de nouveau utilisables plutôt que de les démonter.

Cela a été le cas en France avec Autolib', une entreprise d'autopartage de voitures électriques, qui a cessé ses activités en 2018, laissant des milliers de bornes de recharge ayant une technologie non compatible avec les VÉ actuels. Plutôt que de démonter l'ensemble du réseau, l'entreprise IZVIA a entrepris le reconditionnement des bornes, notamment pour le compte de municipalités. Le raccordement au réseau électrique, ainsi que la structure des bornes ont été conservés. Seules l'électronique interne et les prises ont été remplacées.

Stratégie 7 : Économie de fonctionnalité

Les bornes de recharge publiques font déjà partie de l'économie de fonctionnalité. En effet, les utilisateurs paient pour la recharge du véhicule et non pour l'équipement, à savoir la borne de recharge elle-même.

Stratégie 8 : Économie collaborative

Stratégie non applicable pour les bornes de recharge.

Stratégie 9 : Location

Stratégie non applicable pour les bornes de recharge.

Stratégie 10 : Écologie industrielle

Stratégie non applicable pour les bornes de recharge.

Stratégie 11 : Recyclage et compostage

Les bornes de recharge sont des produits électroniques et celles en fin de vie peuvent être recyclées dans le cadre des filières de recyclage des produits électroniques existantes.

Dans l'Union européenne (UE), la directive relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques encadre la responsabilité élargie des producteurs pour ces équipements. Cette directive ne couvre pas explicitement les bornes de recharge, cependant plusieurs pays comme l'Allemagne et le Royaume-Uni ont interprété la directive de l'UE en y intégrant les bornes de recharge.

On peut également noter l'initiative volontaire d'entreprises comme Shell qui a établi des partenariats avec des recycleurs de produits électroniques dans les différents pays d'Europe pour le recyclage des bornes installées chez ses clients commerciaux.



Stratégie 12 : Valorisation

Les bornes de recharge sont principalement composées d'une structure en métal ou en plastique rigide. Cette structure est recyclable par les flux de recyclage standards. Les bornes contiennent également des composantes électriques et électroniques. Ces composantes doivent être traitées dans la filière des produits électriques et électroniques et connaissent ainsi différentes fins de vie, essentiellement le recyclage et la valorisation énergétique. La valorisation énergétique de ces composantes est notamment réservée aux éléments les plus petits et les plus difficiles à recycler comme les petits éléments de plastiques.



6.0 PRODUCTION D'HYDROGÈNE PAR ÉLECTROLYSE

6.1 QUANTITÉS MISES EN MARCHÉ ET EN FIN DE VIE

6.1.1 Description

L'hydrogène est actuellement produit principalement à partir d'énergies fossiles pour des applications industrielles. Cependant, l'hydrogène vert, produit à partir d'énergies renouvelables, est identifié par l'AIE et l'IRENA comme une composante essentielle de la transition énergétique.

Le gouvernement du Canada a publié la Stratégie canadienne pour l'hydrogène en 2020 et en mai 2022, le gouvernement du Québec a dévoilé la Stratégie québécoise sur l'hydrogène vert et les bioénergies. Plusieurs modes d'utilisation finale sont identifiés permettant de remplacer des sources d'énergie fossile : carburant pour le transport, chaleur et chauffage, transformation de procédés pour les rendre plus efficaces, matière première pour le secteur industriel et également production d'électricité, mais cette utilisation n'est pas privilégiée dans la stratégie québécoise actuellement. De plus, l'hydrogène vert peut permettre le stockage des énergies renouvelables intermittentes.

L'hydrogène vert peut être produit à partir de biomasse grâce à des procédés de gazéification ou à partir d'électricité renouvelable au moyen d'électrolyseurs. Bien qu'une importante proportion de l'hydrogène vert pourrait être produit à partir de biomasse à l'horizon 2050, cette filière n'a pas été retenue pour l'étude comme cela a été indiqué à la section 2. Cette section cible donc la production d'hydrogène vert par électrolyse.

Plusieurs technologies d'électrolyseur existent et sont présentées ci-dessous avec leurs caractéristiques :

- Électrolyseur alcalin : technologie éprouvée, utilisée depuis près d'un siècle par le secteur industriel;
- Électrolyseur à membrane échangeuse de protons (MEP) : technologie plus récente, ayant des coûts plus élevés, mais qui évolue rapidement, et offrant une plus grande flexibilité opérationnelle que la technologie alcaline;
- Électrolyseur à oxyde solide (ou solid oxide electrolyser cell – SOEC) : technologie en développement sans installation commerciale opérationnelle, seulement des exemples à l'échelle pilote. Cette technologie présente néanmoins des caractéristiques potentiellement intéressantes. Son efficacité est accrue en comparaison aux deux autres technologies, et elle nécessite moins de MCS par rapport à la technologie MEP.

En 2021, Air Liquide a mis en service à Bécancour le plus grand électrolyseur MEP du monde. D'une puissance de 20 MW, il a une capacité de production de 8,2 tonnes d'hydrogène par jour. D'autres projets sont également planifiés, comme détaillés dans le tableau 37. Les projets in



Tableau 37 Projets d'électrolyseurs au Québec

Localisation	Porteurs du projet	Technologie	Échéance
Bécancour	Air Liquide	Électrolyseur MEP 20 MW	Démarré en 2021
Gatineau	Gazifère et Evolugen	Électrolyseur 20 MW	2023-2024
Varenes	Recyclage Carbone Varenes (Énergem, Shell, Suncor et Proman)	Électrolyseur 88 MW	Fin 2023
Bécancour	H2 V Énergie	Gazéification	À confirmer
Saguenay	Rio Tinto	Électrolyseur MEP 20 MW	À confirmer
Contrecoeur	ArcelorMittal	Électrolyseur MEP 20 MW	À confirmer

Par ailleurs, de plus petites unités telles que proposées par les compagnies HTEC et Charbone permettent de produire l'hydrogène par électrolyse à petite échelle directement à la station-service. La puissance électrique requise est inférieure à 1 MW. Une station a été récemment installée à Québec, comme montré à la figure 24. HTEC prévoit d'en ouvrir quatre en 2022 et de développer quatre autres stations dans un futur proche. Charbone installe présentement plusieurs de ces stations au Canada.



Figure 24 Station d'hydrogène HTEC à Québec (source : Stantec)

Les éléments qui constituent un électrolyseur sont illustrés à la figure 25 et détaillés au tableau 38 en fonction des matériaux et composants.

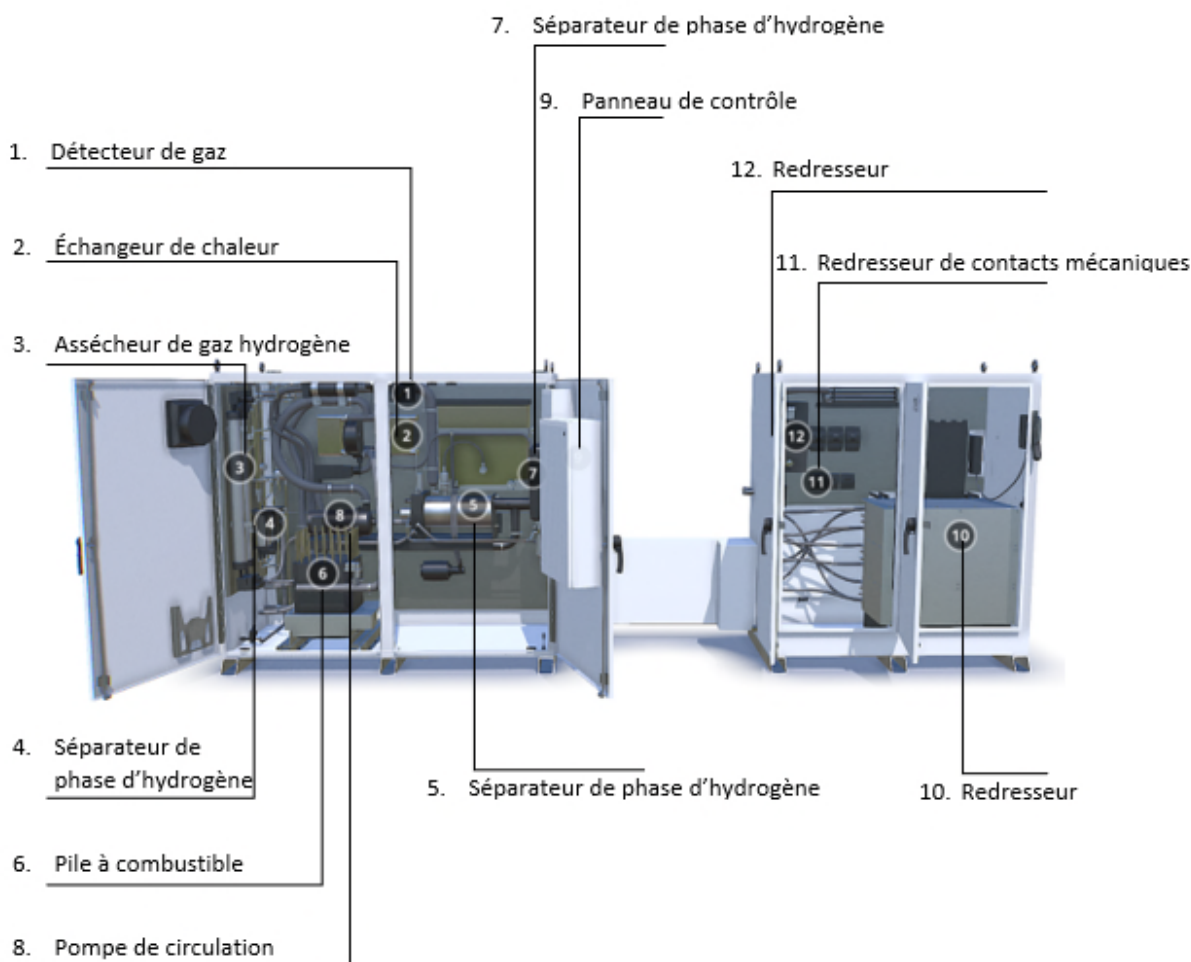


Figure 25 Centrale à hydrogène par électrolyseur MEP (source : NEL Hydrogen Electrolysers)

Tableau 38 Matériaux utilisés selon les composantes – hydrogène par électrolyse

Composante	Éléments constitutifs	Matériaux utilisés
Électrolyseur alcalin	Compresseur, sécheur, séparateur de O ₂ , séparateur de H ₂ , électrolyseur alcalin	Nickel, zirconium, aluminium, acier, cobalt, cuivre
Électrolyseur MEP	Séparateur de O ₂ , séparateur de H ₂ , Électrolyseur MEP	Nickel, zirconium, aluminium, acier, MGP (platine, iridium)

6.1.2 Approche méthodologique

L'approche repose sur la quantification et la projection de la puissance des électrolyseurs installés et remplacés en MW, sur lesquelles sont appliqués des ratios de composition par MW. Ces ratios sont présentés à l'annexe B. Le tableau 39 présente les différentes étapes menant à l'estimation des quantités, les sources utilisées et les différentes hypothèses.

Tableau 39 Approche méthodologique – hydrogène par électrolyse

Étape	Source des données utilisées	Hypothèse
Quantifier la puissance installée jusqu'en 2021.	<i>Filière de l'hydrogène vert : Concertation et projections</i> (InnovÉÉ, 2021) Données de HTEC	Aucune installation n'a été faite avant 2021
Estimer la puissance installée entre 2022 et 2030.	<i>Filière de l'hydrogène vert : Concertation et projections</i> (InnovÉÉ, 2021) Données de HTEC	Il a été considéré que les projets identifiés par InnovÉÉ seraient tous réalisés en 2030, ainsi que les projets annoncés par HTEC. Par la suite, afin de simplifier les projections, il a été considéré que l'ajout de puissance de 2021 à 2030 se faisait linéairement. Enfin, la puissance installée par année a été calculée à partir des puissances installées cumulées.
Estimer la puissance installée entre 2031 et 2050.	<i>Trajectoires de réduction d'émissions de GES du Québec – Horizons 2030 et 2050 (Mise à jour 2021)</i> (Dunsky, 2021 pour le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC)). Cette étude a identifié et comparé quatre trajectoires de réduction de GES.	La moyenne de l'énergie produite sous forme d'hydrogène estimée en 2050 pour les trajectoires A, B et C a été utilisée. Ces trajectoires prévoient la production d'hydrogène par électrolyse. Cette moyenne a ensuite été convertie en puissance installée en utilisant une durée de fonctionnement de 5 000 heures par année (IEA) et une moyenne de 134 T d'hydrogène produit annuellement par MW (InnovÉÉ). Il faut cependant noter que les projections faites par l'AIE à l'échelle mondiale pour le scénario de développement durable prévoient une croissance beaucoup plus importante des capacités installées globales, passant d'environ 150 GW en 2030 à environ 1 400 GW en 2050. Par la suite, afin de simplifier les projections, il a été considéré que l'ajout de puissance de 2021 à 2030, puis de 2030 à 2050, se faisait linéairement. Enfin, une puissance installée par année a été calculée à partir des puissances installées cumulées.
Estimer la puissance remplacée entre 2021 et 2050.	<i>Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition</i> (IRENA, 2019) <i>Étude sur le potentiel technico-économique du développement de la filière de l'hydrogène au Québec et son potentiel pour la transition énergétique</i> (Transition énergétique Québec, 2020) Hypothèse	La durée de vie moyenne des composantes principales d'un électrolyseur alcalin est estimée à 85 000 heures et celle d'un électrolyseur MEP à 45 000 heures. Avec une durée de fonctionnement de 5 000 heures par année, cela donne respectivement une durée de vie de 17 et 9 ans. Les électrolyseurs en fin de vie ont été considérés comme étant remplacés. Afin d'estimer les quantités utilisées et générées lors de la durée de vie d'un électrolyseur, il a été considéré que 0,5 % des électrolyseurs en service sont remplacés chaque année.
Estimer la quantité de matériaux utilisés et générés	<i>The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions</i> (AIE, version révisée de mars 2022).	Des ratios de composition des composantes principales d'un électrolyseur en kg/MW ont été calculés pour les électrolyseurs alcalins et MEP. Ces ratios ont ensuite été appliqués à la puissance annuelle installée et remplacée.

6.1.3 Résultats

Les tableaux 40 et 41 présentent respectivement les quantités estimées de matériaux utilisés et générés par le secteur de l'hydrogène produit par électrolyse pour les années 2021, 2030 et 2050.

Tableau 40 Quantités estimées de matériaux utilisés – hydrogène (t/an)

	2021	2030	2050
Capacité installée ou remplacée annuellement (MW)	21	43	37
Quantité totale de matériaux utilisés	244	493	429
• Aluminium	11	21	18
• Métaux ferreux	210	425	370
• Zirconium	2,1	4,3	3,7
• <i>Minéraux critiques et stratégiques</i>	<i>21</i>	<i>43</i>	<i>37</i>
Cobalt	0,001	0,010	0,017
Cuivre	0,000	0,004	0,007
MGP (platine, iridium)	0,020	0,028	0,013
Nickel	21	43	37

Tableau 41 Quantités estimées de matériaux générés – hydrogène (t/an)

	2021	2030	2050
Capacité remplacée annuellement (MW)	0	21	20
Capacité totale en fonctionnement (MW)	21	214	556
Quantité totale de matériaux générés	0,0	244	231
• Aluminium	0,0	11	9,9
• Métaux ferreux	0,0	211	199
• Zirconium	0,0	2,1	2,0
• <i>Minéraux critiques et stratégiques</i>	<i>0,0</i>	<i>21</i>	<i>20</i>
Cobalt	0,0	0,000	0,009
Cuivre	0,0	0,000	0,004
MGP (platine, iridium)	0,0	0,020	0,007
Nickel	0,0	21	20



6.2 PROCESSUS ACTUELS DE CONCEPTION ET GESTION EN FIN DE VIE

6.2.1 Conception

L'usine de production d'hydrogène à Bécancour au Québec, appartenant à Air Liquide, dispose de quatre électrolyseurs MEP fabriqués en Ontario par l'entreprise Hydrogenics, récemment rachetée par Cummins New Energy. La liste des manufacturiers d'électrolyseurs au Canada et à l'international est détaillée dans le tableau 46.

Tableau 42 Liste des manufacturiers d'électrolyseurs alcalins ou MEP au Québec et à l'international

Manufacturier	Électrolyseur alcalin	Électrolyseur MEP
Cummins New Energy (États-Unis)	x	x
Siemens Energy (Allemagne)	x	x
Nel Hydrogen (Norvège)	x	x
Sunfire (Allemagne)	x	x
AsahiKasei (Japon)	x	x
Proton On Site (États-Unis)		x
Mitsubishi Corp. (Japon)		x
Hydrogenics (Canada) – Racheté par Cummins New Energy en 2019		x
CETH2 (France)		x
HELION Hydrogen Power (France)		x
GINER Electrochemical systems (États-Unis)		x
ITM Power (Royaume-Uni)		x
H-TEC Wasserstoff Energy-System (Allemagne)		x
Elogen (France)		x
ITM Power (Royaume-Uni)		x
John Cockerill (Belgique)	x	
HydrogenPro (Norvège)	x	
Thyssenkrupp (Allemagne)	x	
Stiedsdal (Danemark)	x	

L'approvisionnement en matières premières se fait à partir des marchés internationaux.



6.2.2 Gestion en fin de vie

La plupart des installations de production d'hydrogène au Canada ou à l'international sont récentes. Aucune gestion en fin de vie d'usine de ce type n'est encore documentée.

6.2.3 Bonnes pratiques, freins et enjeux

La technologie est jeune et en évolution. Il y a peu de littérature disponible sur l'intégration de l'économie circulaire dans le secteur de la production d'hydrogène vert par électrolyse.

Stratégie 1 : écoconception

Le secteur étant récent, les perspectives d'évolutions techniques et technologiques laissent à penser que les systèmes seront plus efficaces et moins coûteux d'ici quelques années. Des recherches sont en cours pour optimiser leur fonctionnement, allonger leur fiabilité et leur durée de vie et limiter le recours à certains minéraux.

Stratégie 2 : consommation et approvisionnement responsables

L'utilisation d'une certaine proportion de matériaux recyclés pour la production d'hydrogène permettrait de limiter les besoins en matières premières vierges et de favoriser l'économie circulaire.

Les technologies de production d'hydrogène étant encore récentes, les filières d'approvisionnement en matières recyclées pour la fabrication des électrolyseurs ne sont pas encore établies. Considérant les perspectives de croissance de cette filière, des ententes entre recycleurs et producteurs d'hydrogène pourraient être conclues afin d'assurer une seconde vie à ces matières.

Stratégie 3 : optimisation des opérations

Les acteurs du secteur de la production d'hydrogène par électrolyse vont acquérir des connaissances sur les conditions optimales d'opération des électrolyseurs permettant l'allongement de la durée de vie des différentes composantes. Des projets de recherche sont également menés avec cet objectif.

Stratégie 4 : économie collaborative

Non applicable.

Stratégie 5 : location

Non applicable.

Stratégie 6 : entretien et réparation

Les acteurs du secteur de la production d'hydrogène par électrolyse vont acquérir des connaissances sur le fonctionnement des électrolyseurs et les programmes d'entretien et de réparation permettant l'allongement de la durée de vie des différentes composantes. Des projets de recherche sont également menés avec cet objectif. Notamment, il pourra être envisagé de ne changer que certaines composantes des électrolyseurs et non l'équipement au complet.



Stratégie 7 : don et revente

Non applicable.

Stratégie 8 : reconditionnement

Non applicable.

Stratégie 9 : économie de fonctionnalité

Non applicable.

Stratégie 10 : écologie industrielle

L'approvisionnement en matières recyclées pourrait être favorisé en créant des synergies locales entre entreprises.

Stratégie 11 : recyclage et compostage

Certains des matériaux qui sont utilisés dans les composantes des électrolyseurs ont des potentiels connus de recyclabilité (détaillés au tableau 43).

Tableau 43 Possibilité de recyclage des matériaux utilisés dans la production d'hydrogène

	Technologie alcaline	Technologie MEP
Nickel	Le nickel, comme la majorité des métaux, peut être recyclé à l'infini sans perte de qualité. Glencore au Canada recycle le nickel.	
Zirconium	Recyclage possible et rentable. Le zirconium est très coûteux et énergivore à produire. Très peu d'entreprises au Canada et aux États-Unis recyclent le zirconium.	
Aluminium	Recyclable à l'infini. Plusieurs entreprises récupèrent l'aluminium au Québec.	
Acier	Recyclable à l'infini.	
Cobalt (catalyseur – anode)	Le cobalt est recyclable à l'infini, cependant, il est souvent allié avec d'autres métaux (aluminium et nickel)	
Cuivre (catalyseur – cathode)	Recyclable	
MGP (catalyseur – cathode)		31 % de l'offre mondiale de MGP vient du secteur du recyclage.
Iridium (catalyseur – anode)		L'iridium est plus difficile à recycler que les autres MGP, mais des méthodes innovantes sont actuellement testées dans ce but. Les producteurs japonais sont en particulier à l'origine de ces avancées.

Stratégie 12 : valorisation

Pas de bonnes pratiques identifiées.



7.0 CONCLUSION

7.1 SYNTHÈSE DES QUANTITÉS

7.1.1 Quantités en 2021

Les tableaux 44 et 45 présentent les quantités utilisées et générées par secteur et au total en 2021.

Tableau 44 Quantités estimées de matériaux utilisés en 2021 (t)

	Éolien	Solaire	VÉ	Hydrogène	Total
• Aluminium	725	80	4 624	11	5 440
• Argent	0,0	0,9	0,0	0,0	0,9
• Béton	69 587	0,0	0,0	0,0	69 587
• Bore	0,0	0,0	0,6	0,0	0,6
• Chrome	174	0,0	0,0	0,0	174
• Époxy	637	0,7	0,0	0,0	638
• Fibre de carbone	0,0	0,0	2,2	0,0	2,2
• Fibre de verre	956	0,0	0,1	0,0	956
• Manganèse	272	0,0	224	0,0	496
• Métaux ferreux	17 332	731	808	210	19 081
• Phosphate	0,0	22	161	0,0	182
• Plastique	49	5,13	666	0,0	720
• Polymère	0,0	86	9,76	0,0	96
• Silicium	0,0	43	0,02	0,0	43
• Verre	0,0	656	0,0	0,0	656
• Zirconium	0,0	0,0	0,0	2,1	2,1
• Autres	584	32	2 643	0,0	3 258
• MCS	3 063	64	3 965	21	7 113
Cobalt	0,0	0,0	257	0,0	257
Cuivre	1 010	41	819	0,0	1 870
Graphite	0,0	21	1 675	0,0	1 695
Lithium	0,0	1,9	211	0,0	213
MGP	0,000	0,000	0,000	0,020	0,020
Nickel	104	0,0	986	21	1 111
ETR	34	0,0	17	0,0	51
Autres MCS	0,0	0,3	0,0	0,0	0,3
Zinc	1 915	0,3	0,0	0,0	1 915
TOTAL	93 379	1 784	13 104	244	108 511



Tableau 45 Quantités estimées de matériaux générés en 2021 (t)

	Éolien	Solaire	VÉ	Hydrogène	Total
• Aluminium	19	0,6	618	0,0	638
• Argent	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
• Béton	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
• Bore	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
• Chrome	83	0,0	0,0	0,0	83
• Époxy	147	0,0	0,0	0,0	147
• Fibre de carbone	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
• Fibre de verre	221	0,0	0,0	0,0	221
• Manganèse	129	0,0	0,7	0,0	130
• Métaux ferreux	504	1,6	155	0,0	660
• Phosphate	0,0	0,6	0,5	0,0	1,1
• Plastique	6,0	0,2	2,1	0,0	8,3
• Polymère	0,0	0,3	678	0,0	679
• Silicium	0,0	0,2	0,0	0,0	0,2
• Verre	0,0	2,6	0,0	0,0	2,6
• Zirconium	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
• Autres	0,0	2,2	120	0,0	122
• MCS	1 453	1,1	12	0,0	1 466
Cobalt	0,0	0,0	0,8	0,0	0,8
Cuivre	479	0,4	2,5	0,0	482
Graphite	0,0	0,6	5,1	0,0	5,6
Lithium	0,0	0,1	0,6	0,0	0,7
MGP	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Nickel	50	0,0	3,0	0,0	53
Terres rares	16	0,0	0,1	0,0	16
Autres MCS	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Zinc	908	0,0	0,0	0,0	908
TOTAL	2 562	10,3	1 587	0,0	4 159



7.1.2 Quantités en 2030

Les tableaux 46 et 47 présentent les quantités utilisées et générées par secteur et au total en 2030.

Tableau 46 Quantités estimées de matériaux utilisés en 2030 (t)

	Éolien	Solaire	VÉ	Hydrogène	Total
• Aluminium	1 711	6 272	43 716	21	51 720
• Argent	0,0	68	0,0	0,0	68
• Béton	165 662	0,0	0,0	0,0	165 662
• Bore	0,0	0,0	4,7	0,0	4,7
• Chrome	346	0,0	0,0	0,0	346
• Époxy	1 395	53	0,0	0,0	1 448
• Fibre de carbone	0,0	0,0	780	0,0	780
• Fibre de verre	2 092	0,0	90	0,0	2 182
• Manganèse	540	0,0	1 929	0,0	2 469
• Métaux ferreux	40 844	57 368	9 760	425	108 397
• Phosphate	0,0	1 691	1 568	0,0	3 260
• Plastique	111	401	6 185	0,0	6 696
• Polymère	0,0	6 778	73	0,0	6 851
• Silicium	0,0	3 389	20	0,0	3 409
• Verre	0,0	51 510	0,0	0,0	51 510
• Zirconium	0,0	0,0	0,0	4,3	4,3
• Autres	1 391	2 450	25 414	0,0	29 256
• MCS	6 090	5 019	35 141	43	46 292
Cobalt	0,0	0,0	2 139	0,0	2 139
Cuivre	2 007	3 200	7 999	0,0	13 206
Graphite	0,0	1 618	15 679	0,0	17 297
Lithium	0,0	147	1 908	0,0	2 055
MGP	0,000	0,000	0,000	0,028	0,028
Nickel	208	1,1	7 279	43	7 530
Terres rares	69	0,0	136	0,0	205
Autres MCS	0,0	27	0,0	0,0	27
Zinc	3 806	26	0,0	0,0	3 832
TOTAL	220 182	139 991	124 681	493	485 347



Tableau 47 Quantités estimées de matériaux générés en 2030 (t)

	Éolien	Solaire	VÉ	Hydrogène	Total
• Aluminium	939	37	6 062	244	7 282
• Argent	0,0	0,2	0,0	0,0	0,2
• Béton	89 342	0,0	0,0	0,0	89 342
• Bore	0,0	0,0	0,5	0,0	0,5
• Chrome	220	0,0	0,0	0,0	220
• Époxy	1 347	0,0	0,0	0,0	1 347
• Fibre de carbone	0,0	0,0	11	0,0	11
• Fibre de verre	2 220	0,0	1,2	0,0	2 221
• Manganèse	343	0,0	191	0,0	534
• Métaux ferreux	24 654	100	1 230	11	25 995
• Phosphate	0,0	38	180	0,0	218
• Plastique	342	11	529	0,0	882
• Polymère	0,0	22	2 718	0,0	2 740
• Silicium	0,0	11	0,3	0,0	11,3
• Verre	0,0	167	0,0	0,0	167
• Zirconium	0,0	0,0	0,0	211	211
• Autres	930	138	2 517	0,0	3 586
• MCS	3 865	68	3 081	21	7 035
Cobalt	0,0	0,0	212	21	233
Cuivre	1 274	28	632	0,0	1 934
Graphite	0,0	37	1 331	0,0	1 368
Lithium	0,0	3,3	168	0,0	172
MGP	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Nickel	132	0,0	723	0,0	855
Terres rares	43	0,0	13	0,0	56
Autres MCS	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1
Zinc	2 416	0,1	0,0	0,0	2 416
TOTAL	124 202	662	16 521	487	141 872



7.1.3 Quantités en 2050

Les tableaux 48 et 49 présentent les quantités utilisées et générées par secteur et au total en 2050.

Tableau 48 Quantités estimées de matériaux utilisés en 2050 (t)

	Éolien	Solaire	VÉ	Hydrogène	Total
• Aluminium	6 430	6 808	93 850	18	107 106
• Argent	0,0	71	0,0	0,0	71
• Béton	618 181	0,0	0,0	0,0	618 181
• Bore	0,0	0,0	8,5	0,0	8,5
• Chrome	1 491	0,0	0,0	0,0	1 491
• Époxy	5 564	53	0,0	0,0	5 617
• Fibre de carbone	0,0	0,0	1 014	0,0	1 014
• Fibre de verre	8 342	0,0	592	0,0	8 934
• Manganèse	2 326	0,0	2 184	0,0	4 510
• Métaux ferreux	153 630	58 901	29 035	370	241 936
• Phosphate	0,0	2 245	19 751	0,0	21 996
• Plastique	427	561	12 938	0,0	13 926
• Polymère	0,0	7 104	59	0,0	7 163
• Silicium	0,0	3 552	132	0,0	3 684
• Verre	0,0	53 990	0,0	0,0	53 990
• Zirconium	0,0	0,0	0,0	3,7	3,7
• Autres	5 191	4 439	53 059	0,0	62 689
• MCS	26 239	6 005	65 203	37	97 485
Cobalt	0,0	0,0	2 418	0,0	2 418
Cuivre	8 648	3 606	18 031	0,0	30 285
Graphite	0,0	2 147	32 787	0,0	34 934
Lithium	0,0	195	3 556	0,0	3 751
MGP	0,000	0,000	0,000	0,013	0,013
Nickel	895	1,2	8 166	37	9 099
Terres rares	295	0,0	246	0,0	541
Autres MCS	0,0	29	0,0	0,0	29
Zinc	16 401	27	0,0	0,0	16 428
TOTAL	827 821	149 708	277 826	429	1 255 783



Tableau 49 Quantités estimées de matériaux générés en 2050 (t)

	Éolien	Solaire	VÉ	Hydrogène	Total
• Aluminium	1 132	573	48 382	231	50 318
• Argent	0,0	3,5	0,0	0,0	3,5
• Béton	96 075	0,0	0,0	0,0	96 075
• Bore	0,0	0,0	4,8	0,0	4,8
• Chrome	804	0,0	0,0	0,0	804
• Époxy	1 886	0,1	0,0	0,0	1 886
• Fibre de carbone	0,0	0,0	734	0,0	734
• Fibre de verre	2 828	0,0	245	0,0	3 073
• Manganèse	1 254	0,0	1 538	0,0	2 792
• Métaux ferreux	27 368	1 633	11 350	10	40 361
• Phosphate	0,0	592	8 261	0,0	8 853
• Plastique	106	172	6 909	0,0	7 187
• Polymère	0,0	348	0,0	0,0	348
• Silicium	0,0	174	55	0,0	229
• Verre	0,0	2 647	0,0	0,0	2 647
• Zirconium	0,0	0,0	0,0	199	199
• Autres	807	2 128	25 681	0,0	28 616
• MCS	14 150	1 055	35 944	20	51 169
Cobalt	0,0	0,0	1 705	20	1 724
Cuivre	4 664	434	8 864	0,0	13 962
Graphite	0,0	566	17 475	0,0	18 042
Lithium	0,0	51	1 983	0,0	2 034
MGP	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Nickel	482	0,1	5 779	0,0	6 261
Terres rares	159	0,0	138	0,0	297
Autres MCS	0,0	1,4	0,0	0,0	1,4
Zinc	8 845	1,3	0,0	0,0	8 846
TOTAL	146 410	10 379	139 104	459	296 352

7.2 RECOMMANDATIONS

7.2.1 Énergie éolienne

Le secteur de l'énergie éolienne est un secteur important des énergies renouvelables au Québec et va encore largement se développer jusqu'en 2050, représentant la part la plus importante des matériaux utilisés et générés.

Les recommandations et pistes d'action concernant l'énergie éolienne sont décrites au tableau 50.

Tableau 50 Recommandations - énergie éolienne

Recommandation	Stratégie d'économie circulaire
Exiger dans les appels d'offres un rendement massique minimal pour les éoliennes et une recyclabilité des équipements utilisés.	Stratégie 1 : écoconception Stratégie 2 : consommation et approvisionnement responsables
Exiger un taux minimal de récupération et de valorisation des matériaux issus du démantèlement des composantes des éoliennes en fin de vie lors des autorisations délivrées et/ou des appels d'offres.	Stratégie 1 : écoconception Stratégie 11 : recyclage Stratégie 12 : valorisation
Soutenir la mise en place d'incitatifs fiscaux, financiers ou contractuels visant à favoriser une plus longue durée d'opération des éoliennes.	Stratégie 3 : optimisation des opérations Stratégie 6 : entretien et réparation
Soutenir le développement de filières de reconditionnement et réemploi des composantes d'éolienne afin d'allonger leur durée de vie.	Stratégie 7 : don et revente Stratégie 8 : reconditionnement
Soutenir les initiatives locales en lien avec le recyclage ou la valorisation des pales d'éolienne, en tenant compte des opportunités locales, telle la présence de cimenteries, de fabricants de composantes d'éolienne.	Stratégie 11 : recyclage
Soutenir les centres techniques et les formations visant à optimiser l'opération et l'entretien des éoliennes.	Stratégie 3 : optimisation des opérations Stratégie 6 : entretien et réparation

7.2.2 Énergie solaire

Le secteur de l'énergie solaire est peu développé actuellement au Québec, mais les projections montrent que la quantité de matériaux utilisés en 2030 serait équivalente au secteur du transport électrique. La durée de vie des équipements, plus longue que les véhicules électriques, a pour conséquence que les quantités générées resteraient faibles jusqu'en 2050.

Les recommandations et pistes d'action concernant l'énergie éolienne sont décrites au tableau 51.

Tableau 51 Recommandations - énergie solaire

Recommandation	Stratégie d'économie circulaire
Exiger dans les appels d'offres un rendement massique minimal pour les panneaux solaires, une durabilité et une recyclabilité des équipements utilisés.	Stratégie 1 : écoconception Stratégie 2 : consommation et approvisionnement responsables



Recommandation	Stratégie d'économie circulaire
Initier la création d'une REP pour les panneaux solaires intégrant des critères pour favoriser l'écoconception et le financement de la recherche et du développement de filières de recyclage.	Stratégie 1 : écoconception Stratégie 2 : consommation et approvisionnement responsables Stratégie 11 : recyclage Stratégie 12 : valorisation
Soutenir le développement de filières de reconditionnement et réemploi des composantes de parcs solaires afin d'allonger leur durée de vie.	Stratégie 7 : don et revente Stratégie 8 : reconditionnement
Soutenir le développement de centres techniques et de formations visant à mieux opérer et entretenir les parcs solaires.	Stratégie 3 : optimisation des opérations Stratégie 6 : entretien et réparation
Soutenir la mise en place d'une filière complète de fabrication, récupération et recyclage de panneaux solaires afin de favoriser l'économie circulaire.	Stratégie 1 : écoconception Stratégie 11 : recyclage

7.2.3 Transport électrique

Le secteur du transport électrique est déjà en plein développement au Québec, mais les projections montrent que la quantité de matériaux utilisés en 2050 serait 20 fois plus élevée qu'actuellement et la quantité de matériaux générés serait équivalente au secteur de l'énergie éolienne.

Les recommandations et pistes d'action concernant le transport électrique sont décrites au tableau 52.

Tableau 52 Recommandations – transport électrique

Recommandation	Stratégie d'économie circulaire
Initier la création d'une REP pour les batteries, les moteurs électriques et les bornes en intégrant des exigences telles que l'utilisation de matières issues de sources responsables avec un usage limité de substances dangereuses, la teneur minimale en matières recyclées, l'empreinte carbone, la performance, la durée et le marquage. Cela favoriserait l'écoconception et le financement de la recherche et du développement de filières de réemploi et de recyclage.	Stratégie 1 : écoconception Stratégie 2 : consommation et approvisionnement responsables Stratégie 7 : don et revente Stratégie 8 : reconditionnement Stratégie 11 : recyclage Stratégie 12 : valorisation
Soutenir le développement de centres techniques et de formations visant à mieux connaître les batteries, leur fonctionnement et leur entretien.	Stratégie 3 : optimisation des opérations Stratégie 6 : entretien et réparation
Soutenir la mise en place d'une filière complète de fabrication, récupération et recyclage de batteries au Québec afin de favoriser l'économie circulaire.	Stratégie 1 : écoconception Stratégie 11 : recyclage



7.2.4 Production d'hydrogène par électrolyse

Malgré son aspect stratégique et son rôle comme pilier de la transition énergétique, la production d'hydrogène par électrolyse utiliserait beaucoup moins de matériaux que les autres secteurs à l'étude. De plus, les sites seraient moins diffus et ainsi plus aisés à gérer en fin de vie.

Il sera opportun d'adapter les actions menées en fonction du développement effectif de ce secteur. Dans un premier temps, un soutien à la recherche et le développement visant à optimiser les ressources requises pour la fabrication d'électrolyseurs, leur durabilité et leur recyclabilité pourraient être pertinentes.



8.0 RÉFÉRENCES

- Plan québécois pour la valorisation des minéraux critiques et stratégiques 2020-2025 (gouvernement du Québec, 2020)
- Stratégies de circularité, Québec Circulaire (<https://www.quebeccirculaire.org/static/strategies-de-circularite.html>, consulté le 8 août 2022)
- Projets éoliens au Québec (ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, 2021); <https://mern.gouv.qc.ca/energie/energie-eolienne/projets-eoliens-au-quebec/>
- Trajectoires de réduction d'émissions de GES du Québec – Horizons 2030 et 2050 (Mise à jour 2021) (Dunsky, 2021 pour le MELCC)
- Analyse du Cycle de Vie de la production d'électricité d'origine éolienne en France (Cycleco, 2015 pour l'ADEME)
- The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions (AIE, version révisée mars 2022)
- Situation présente et évolution du photovoltaïque – Rapport annuel canadien 2015 (Ressources Naturelles Canada, 2015)
- Énergie solaire photovoltaïque dans le mix énergétique québécois - Analyse et perspectives (NERGICA, 2021)
- Photovoltaic Degradation Rates — An Analytical Review (NREL, 2012)
- État d'avancement 2020 du plan d'approvisionnement 2020-2029 (Hydro-Québec, 2020)
- End-of-life management, Solar Photovoltaic Panels (IRENA, 2019)
- Performance and Reliability of Photovoltaic Systems. Subtask 3.2: Review of Failures of Photovoltaic Modules (IEA PVPS Task 13. External final report IEA-PVPS, March 2014)
- Backhaus, R. Battery Raw Materials - Where from and Where to?. ATZ Worldw 123, 8–13 (2021) <https://doi.org/10.1007/s38311-021-0715-5>
- Vehicle Materials: Fuel Cell Vehicle Material Composition Update (Argonne National Lab, 2016) <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwid597Z4Nf3AhX0HTQIHVSBCL8QFnoECAQQAQ&url=https%3A%2F%2Fgreet.es.anl.gov%2Ffiles%2Ffcv-composition-2016&usg=AOvVaw1Q4fWobrLQMfbO2q1Lutb1>
- U.S Department of Energy, Alternative Fuels Data Center (2021) <https://afdc.energy.gov/>
- Données statistiques sur l'évolution du programme Roulez vert du gouvernement du Québec <https://vehiculeselectriques.gouv.qc.ca/rabais/statistiques/infographie-programme-roulez-electrique.asp> (consulté le 8 juin 2022)
- Stratégie québécoise sur l'hydrogène vert et les bioénergies (gouvernement du Québec, 2022)
- Stratégie canadienne pour l'hydrogène (gouvernement du Canada, 2020)
- Filière de l'hydrogène vert : Concertation et projections (Innov'ÉE, 2021)
- Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition (IRENA, 2019)
- Étude sur le potentiel technico-économique du développement de la filière de l'hydrogène au Québec et son potentiel pour la transition énergétique – Volet B : Revue de littérature technicoéconomique de l'hydrogène : de la production à l'utilisation (Transition énergétique Québec, 2020)



- Electric Vehicle Charging Infrastructure, Market Analysis 2017-2030 (Grand View Research, 2021)
- The Road to Sustainable Mobility is Paved with Copper (Copper Development Association Inc., 2017)
https://www.copper.org/publications/pub_list/pdf/a6193_ev_casestudypdf.pdf
- Économie circulaire dans la filière éolienne terrestre en France (ADEME, 2019)
- Analyse du cycle de vie et recommandations concernant la valorisation des pâles d'éoliennes dans l'Est du Québec (Université de Sherbrooke, 2018)
- PV in the circular economy, a dynamic framework analyzing technology evolution and reliability impacts (Ovaatt et al., iScience 25, 103488 January 21, 2022 ^a 2021 <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.103488>)
- End-of-life Management Solar Photovoltaic Panels (IEA, IRENA, 2016)
- End-of-Life Management for Solar Photovoltaics: Recycling (SEIA, 2020)
- Directive 2012/19/UE du Parlement européen et du Conseil du 4 juillet 2012 relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) (refonte)
- PV Module Design for Recycling Guidelines (IEA, 2021)
- Research Study on Reuse and Recycling of Batteries Employed in Electric Vehicles (Energy API, 2019)
- Advancing Recycling in B.C. - Extended Producer Responsibility Five-Year Action Plan 2021-2026 (British Columbia, Ministry of Environment and Climate Change Strategy, 2021)



ANNEXE A LISTE DES PRODUITS DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE



Secteur d'activité	Sous-secteur d'activité	Produits
Énergies renouvelables	Énergie solaire	Panneau solaire à cellules amorphes
Énergies renouvelables	Énergie solaire	Panneau solaire à cellules monocristallines
Énergies renouvelables	Énergie solaire	Panneau solaire à cellules polycristallines
Énergies renouvelables	Énergie solaire	Batterie LFP (Lithium-Fer-Phosphate)
Énergies renouvelables	Énergie solaire	Batterie à flux (Batterie redox vanadium)
Énergies renouvelables	Énergie solaire	Onduleur
Énergies renouvelables	Énergie solaire	Câbles électriques
Énergies renouvelables	Énergie solaire	Transformateur
Énergies renouvelables	Énergie solaire	Station de livraison/transfert connectée au réseau local
Énergies renouvelables	Énergie solaire	Panneau solaire thermique
Énergies renouvelables	Énergie solaire	Centrale thermique à concentration
Énergies renouvelables	Énergie éolienne	Pale non recyclable
Énergies renouvelables	Énergie éolienne	Pale recyclable
Énergies renouvelables	Énergie éolienne	Batterie LFP (Lithium-Fer-Phosphate)
Énergies renouvelables	Énergie éolienne	Batterie à flux (Batterie redox vanadium)
Énergies renouvelables	Énergie éolienne	Nacelle et mât
Énergies renouvelables	Énergie éolienne	Générateur
Énergies renouvelables	Énergie éolienne	Transformateur
Énergies renouvelables	Énergie éolienne	Câbles électriques
Énergies renouvelables	Énergie éolienne	Base et fondation
Énergies renouvelables	Biomasse	Système de chauffage à la biomasse (édifices)
Énergies renouvelables	Biomasse	Système de chauffage à la biomasse (installations, industrie)
Énergies renouvelables	Biomasse	Système à cycle organique de Rankine (ORC)
Énergies renouvelables	Biomasse	Centrale électrique à la biomasse
Énergies renouvelables	Énergie hydraulique	Centrale hydroélectrique
Énergies renouvelables	Énergie hydraulique	Hydrolienne
Énergies renouvelables	Énergie hydraulique	Usine marémotrice
Énergies renouvelables	Énergie hydraulique	Usine houlomotrice
Énergies renouvelables	Géothermie	Centrale géothermique
Énergies renouvelables	Géothermie	Bâtiment à géothermie (Thermopompe)
Énergies renouvelables	Hydrogène	Système d'électrolyse de l'eau
Énergies renouvelables	Biocarburant/biocombustible	Système de gazéification
Énergies renouvelables	Biocarburant/biocombustible	Système de pyrolyse
Énergies renouvelables	Biocarburant/biocombustible	Système de biométhanisation
Énergies renouvelables	Biocarburant/biocombustible	Système de production à partir du CO2
Transport électrique	Véhicules légers	VEÉ + VHR - Batteries LFP (Lithium Fer Phosphate)
Transport électrique	Véhicules légers	VEÉ + VHR - Batteries NCA (Nickel Cobalt Aluminium Oxydes)
Transport électrique	Véhicules légers	VEÉ + VHR - Batteries NMC (Nickel Manganèse Cobalt)
Transport électrique	Véhicules légers	VEÉ + VHR - Batterie sèches
Transport électrique	Véhicules légers	VEÉ + VHR - Chargeur et câblage
Transport électrique	Véhicules légers	VEÉ + VHR - Moteur électrique
Transport électrique	Véhicules légers	Borne de recharge Niveau 1 (120V)
Transport électrique	Véhicules légers	Borne de recharge Niveau 2 (208 ou 240V)
Transport électrique	Véhicules légers	Borne de recharge Niveau 3 (Recharge rapide - 220 à 450V)
Transport électrique	Véhicules légers	Deux roues loisirs - Batterie LFP
Transport électrique	Véhicules légers	Deux roues loisirs - Moteur
Transport électrique	Véhicules légers	Deux roues transport - Batterie LFP
Transport électrique	Véhicules légers	Deux roues transport - Moteur
Transport électrique	Véhicules légers	Quatre roues hors-route - Batterie LFP
Transport électrique	Véhicules légers	Quatre roues hors-route - Moteur
Transport électrique	Véhicules légers	Utilitaire industriel - Batterie LFP
Transport électrique	Véhicules légers	Utilitaire industriel - Moteur
Transport électrique	Véhicules lourds	Batteries LFP (Lithium Fer Phosphate)
Transport électrique	Véhicules lourds	Batteries NCA (Nickel Cobalt Aluminium Oxydes)
Transport électrique	Véhicules lourds	Batteries NMC (Nickel Manganèse Cobalt)
Transport électrique	Véhicules lourds	Chargeurs et câbles
Transport électrique	Véhicules lourds	Borne de recharge

Secteur d'activité	Sous-secteur d'activité	Produits
Transport électrique	Équipement lourd	Batteries
Transport électrique	Équipement lourd	Moteur
Transport électrique	Équipement lourd	Borne de recharge
Transport électrique	Train et tramway	Train électrique
Transport électrique	Train et tramway	Tramway et métro
Transport électrique	Bateaux	Transport de marchandises
Transport électrique	Bateaux	Transport de passagers: croisières, traversiers
Transport électrique	Bateaux	Hors-bord électrique
Transport électrique	Bateaux	In-bord électrique
Transport électrique	Bateaux	Équipement de loisir nautique électrique (surf, paddle, pédalo, barque)
Transport électrique	Bateaux	Borne de recharge
Transport électrique	Aéronef	Drone (livraison de colis)
Transport électrique	Aéronef	Avion électrique (en R&D)
Transport électrique	Aéronef	Hélicoptère électrique
Transport électrique	Aéronef	Équipement volant de transport individuel (jetpack, ULM, etc.)
Transport électrique	Aéronef	Borne de recharge
Transport électrique	Batiments	Ascenseur
Transport électrique	Batiments	Escalier mécanique
Transport électrique	Batiments	Tapis mécanique
Transport électrique	Transport urbain par câble	Téléphérique
Transport électrique	Transport urbain par câble	Télesiège/télécabine
Transport électrique	Transport urbain par câble	Funiculaire

ANNEXE B RATIOS DE COMPOSITION DES PARCS ÉOLIENS



Tableau 53 Ratios de composition des parcs éoliens (kg/MW)

Matériaux	Vestas V 82 1,65 MW	Enercon E 82 2,3 MW 107 m béton DDSG	(Crawford et al.). 3 MW, 80 m DFIG	Source
Aluminium	4 965	3 651	3 856	Analyse du Cycle de Vie de la production d'électricité d'origine éolienne en France (Cycleco, 2015 pour l'ADEME)
Métaux ferreux	130 364	138 973	91 897	
Fibre de verre	10 255	7 549	4 013	
Époxy	6 109	5 033	2 677	
Béton	487 879	818 261	380 000	
Plastique	1 818	0	233	
Autres	5 080	2 777	3 191	
Cuivre	2 900			The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions (AIE, version révisée mars 2022)
Nickel	300			
Zinc	5,500			
Manganèse	780			
Terres rares	99			
Chrome	500			
Total	656 549	986 323	495 446	



ANNEXE C RATIOS DE COMPOSITION DES PARCS SOLAIRES



Tableau 54 Ratios de composition des parcs solaires (kg/MW)

Matériaux	kg/MW	Source
Aluminium	7 288	The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions (AIE, version révisée mars 2022). <i>End-of-life management, Solar Photovoltaic Panels</i> (IRENA, 2019) pour la durée de vie des panneaux solaires et la maintenance. Données transmises par ELVO (batteries LFP). Données de fournisseurs (onduleur et transformateur).
Argent	79	
Béton	0	
Cuivre	3 707	
Époxy	62	
Graphite	1 848	
Lithium	168	
Métaux ferreux	66 940	
Nickel	1	
Phosphate	1 932	
Plastiques	455	
Polymère	7 897	
Silicium	3 948	
Verre	60 014	
Zinc	30	
Autres MCS	32	
Autres	2 702	
Total	157 104	



ANNEXE D RATIOS DE COMPOSITION DES VÉHICULES ÉLECTRIQUES



Tableau 55 Ratios de composition des batteries LFP

Matériaux	kg/kWh	Source
Cuivre	0,528	The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions (AIE, version révisée mars 2022). <i>Battery Raw Materials</i> (Argonne National Lab, 2021) Backhaus, R. Battery Raw Materials - Where from and Where to?. ATZ Worldw 123, 8–13 (2021).
Lithium	0,095	
Graphite	1,016	
Aluminium	2,696	
Plastique	0,315	
Acier	0,045	
Autres	1,305	

Tableau 56 Ratios de composition des batteries NCA+

Matériaux	kg/kWh	Source
Cuivre	0,315	The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions (AIE, version révisée mars 2022). <i>Battery Raw Materials</i> (Argonne National Lab, 2021) Backhaus, R. Battery Raw Materials - Where from and Where to? ATZ Worldw 123, 8–13 (2021).
Lithium	0,102	
Nickel	0,755	
Cobalt	0,045	
Graphite	0,901	
Aluminium	2,217	
Plastique	0,315	
Acier	0,045	
Autres	1,305	

Tableau 57 Ratios de composition des batteries NMC622

Matériaux	kg/kWh	Source
Cuivre	0,339	The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions (AIE, version révisée mars 2022). <i>Battery Raw Materials</i> (Argonne National Lab, 2021)
Lithium	0,119	
Nickel	0,531	
Manganese	0,166	



Matériaux	kg/kWh	Source
Cobalt	0,178	Backhaus, R. Battery Raw Materials - Where from and Where to? ATZ Worldw 123, 8–13 (2021).
Graphite	0,884	
Aluminium	2,118	
Plastique	0,315	
Acier	0,045	
Autres	1,305	

Tableau 58 Ratios de composition des moteurs électriques

Matériaux	kg/kW	Source
Terres rares	0,003	The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions (AIE, version révisée mars 2022). Hypothèses
Cuivre	0,023	
Fer	0,008	
Bore	0,000	
Aluminium	0,091	
Acier inoxydable	0,091	
Plastique	0,014	
Autres	0,027	

Tableau 59 Ratios de composition des piles à combustible

Matériaux	kg/kW	Source
Fibre de carbone	2,217	<i>Vehicle Materials: Fuel Cell Vehicle Material Composition Update</i> (Argonne National Lab, 2016)
Acier	0,311	
Acier inoxydable	0,274	
Plastique	0,264	
Fibre de verre	0,152	
Silicium	0,034	
Autres	0,128	



Tableau 60 Ratios de composition des bornes de recharge résidentielles et publiques de niveau 2

Matériaux	kg/kW	Sources
Cuivre	0,27	The Road to Sustainable Mobility is Paved with Copper (Copper Development Association Inc., 2017) Metal in Electric Vehicle Charging Infrastructure, Market Analysis, 2017-2030 (Grand View Research, 2021).
Acier	0,27	
Aluminium	0,13	
Autres métaux	0,31	
Polymère	0,07	

Tableau 61 Ratios de composition des bornes de recharge BRCC publiques et véhicules électriques lourds

Matériaux	kg/kW	Sources
Cuivre	0,04	The Road to Sustainable Mobility is Paved with Copper (Copper Development Association Inc., 2017) Metal in Electric Vehicle Charging Infrastructure, Market Analysis, 2017-2030 (Grand View Research, 2021).
Acier	0,27	
Aluminium	0,13	
Autres métaux	0,31	
Polymère	0,07	



**ANNEXE E TABLEAUX DÉTAILLÉS DES QUANTITÉS
UTILISÉES ET GÉNÉRÉES DU SECTEUR DU
TRANSPORT ÉLECTRIQUE**



Tableau 62 Quantités estimées de matériaux utilisés – VEÉ légers (t/an)

	2021	2030	2050
Nombre de VEÉ additionnels par année	21 487	167 812	55 416
Nombre de VEÉ remplacés par année	45	17 313	147 378
Nombre de VEÉ en circulation	72 200	1 613 183	3 725 251
Quantité totale de matériaux utilisés	10 974	95 046	104 117
• Aluminium	3 908	33 724	36 943
• Bore	0,4	3,7	4,1
• Métaux ferreux	565	5 116	5 604
• Manganèse	197	1 838	2 014
• Phosphate	114	1 421	1 556
• Plastique	567	4 877	5 343
• Autres	2 225	19 126	20 952
• Minéraux critiques et stratégiques	3 397	28 941	31 703
Cobalt	226	2 039	2 234
Cuivre	658	5 772	6 323
Graphite	1 448	12 483	13 674
Lithium	184	1 590	1 741
Nickel	868	6 949	7 612
ETR	12	107	118

Tableau 63 Quantités estimées de matériaux générés – VEÉ légers (t/an)

	2021	2030	2050
Nombre de VEÉ remplacés par année	45	17 313	147 378
Nombre de VEÉ en circulation	72 200	1 613 183	3 725 251
Quantité totale de matériaux utilisés	23	8 889	75 666
• Aluminium	8,2	3 154	26 848
• Bore	0,0	0,3	2,9
• Métaux ferreux	1,2	478	4 073
• Manganèse	0,4	172	1 464
• Phosphate	0,0	133	1 131
• Plastique	1,2	456	3 883
• Autres	4,7	1 789	15 226
• Minéraux critiques et stratégiques	7,1	2 707	23 039
Cobalt	0,5	191	1 624
Cuivre	1,4	540	4 595
Graphite	3,0	1 167	9 938
Lithium	0,4	149	1 265
Nickel	1,8	650	5 532
ETR	0,0	10	85



Tableau 64 Quantités estimées de matériaux utilisés – VHR légers (t/an)

	2021	2030	2050
Nombre de VHR additionnels par année	14 388	24 098	0
Nombre de VHR remplacés par année	141	9 643	6 254
Nombre de VHR en circulation	55 484	276 795	310 024
Quantité totale de matériaux utilisés	1 704	3 983	738
• Aluminium	607	1414	262
• Bore	0,1	0,3	0,1
• Métaux ferreux	162	386	72
• Manganèse	27	67	12
• Phosphate	15	52	10
• Plastique	88	205	38
• Autres	324	752	139
• Minéraux critiques et stratégiques	481	1 106	205
Cobalt	31	74	14
Cuivre	108	256	47
Graphite	195	455	84
Lithium	25	58	11
Nickel	117	253	47
ETR	4,2	10	1,8

Tableau 65 Quantités estimées de matériaux générés – VHR légers (t/an)

	2021	2030	2050
Nombre de VHR remplacés par année	141	9 643	6 254
Nombre de VHR en circulation	55 484	276 795	310 024
Quantité totale de matériaux utilisés	17	1 138	738
• Aluminium	5,9	404	262
• Bore	0,0	0,1	0,1
• Métaux ferreux	1,6	110	72
• Manganèse	0,3	19	12
• Phosphate	0,1	15	10
• Plastique	0,9	59	38
• Autres	3,1	215	139
• Minéraux critiques et stratégiques	4,7	316	205
Cobalt	0,3	21	14
Cuivre	1,1	73	47
Graphite	1,9	130	84
Lithium	0,2	17	11
Nickel	1,1	72	47
ETR	0,0	2,8	1,8



Tableau 66 Quantités estimées de matériaux utilisés – VÉPC légers (t/an)

	2021	2030	2050
Nombre de VÉPC additionnels par année	13	4 559	1 665
Nombre de VÉPC remplacés par année	0	67	4 353
Nombre de VÉPC en circulation	72	41 936	103 893
Quantité totale de matériaux utilisés	2,2	759	987
• Aluminium	0,2	73	95
• Bore	0,0	0,1	0,1
• Fibre de carbone	1,1	390	507
• Fibre de verre	0,1	27	35
• Métaux ferreux	0,5	161	209
• Manganèse	0,0	1,2	1,6
• Phosphate	0,0	0,9	1,1
• Plastique	0,2	57	74
• Silicium	0,0	5,9	7,7
• Autres	0,0	10	13
• Minéraux critiques et stratégiques	0,1	33	43
Cobalt	0,0	1,4	1,8
Cuivre	0,0	16	21
Graphite	0,0	8,3	11
Lithium	0,0	1,1	1,4
Nickel	0,0	4,6	6,0
ETR	0,0	1,7	2,2



Tableau 67 Quantités estimées de matériaux générés – VÉPC légers (t/an)

	2021	2030	2050
Nombre de VÉPC remplacés par année	0	67	4 353
Nombre de VÉPC en circulation	72	41 936	103 893
Quantité totale de matériaux utilisés	0,0	12	783
• Aluminium	0,0	1,1	69
• Bore	0,0	0,0	0,1
• Fibre de carbone	0,0	5,7	367
• Fibre de verre	0,0	0,4	25
• Métaux ferreux	0,0	2,3	151
• Manganèse	0,0	0,0	1,2
• Plastique	0,0	0,0	0,8
• Phosphate	0,0	0,8	54
• Silicium	0,0	0,1	5,6
• Autres	0,0	0,7	47
• Minéraux critiques et stratégiques	0,0	0,5	31
Cobalt	0,0	0,0	1,3
Cuivre	0,0	0,2	15
Graphite	0,0	0,1	7,8
Lithium	0,0	0,0	1,0
Nickel	0,0	0,1	4,4
ETR	0,0	0,0	1,6



Tableau 68 Quantités estimées de matériaux utilisés – VEÉ lourds (t/an)

	2021	2030	2050
Nombre de VEÉ additionnels par année	139	10 206	49 548
Nombre de VEÉ remplacés par année	1	118	31 721
Nombre de VEÉ en circulation	1 000	78 095	754 887
Quantité totale de matériaux utilisés	244	17 896	140 882
• Aluminium	86	6 334	49 865
• Bore	0,0	0,3	2
• Métaux ferreux	23	1 681	13 236
• Manganèse	0,1	19	149
• Phosphate	31	2 200	17 322
• Plastique	10	756	5 953
• Autres	41	3 051	24 015
• Minéraux critiques et stratégiques	52	3 854	30 340
Cobalt	0,1	20	160
Cuivre	17	1 246	9 806
Graphite	31	2 301	18 115
Lithium	2,9	218	1 717
Nickel	0,2	61	477
ETR	0,1	8	64

Tableau 69 Quantités estimées de matériaux générés – VEÉ lourds (t/an)

	2021	2030	2050
Nombre de VEÉ remplacés par année	1	118	31 721
Nombre de VEÉ en circulation	1 000	78 095	754 887
Quantité totale de matériaux utilisés	1,1	204	54 989
• Aluminium	0,4	72	19 463
• Bore	0,0	0,0	0,9
• Métaux ferreux	0,1	19	5 166
• Manganèse	0,0	0,2	58
• Phosphate	0,1	25	6 761
• Plastique	0,0	8,6	2 324
• Autres	0,2	35	9 373
• Minéraux critiques et stratégiques	0,2	44	11 843
Cobalt	0,0	0,2	63
Cuivre	0,1	14	3 828
Graphite	0,1	26	7 071
Lithium	0,0	2,5	670
Nickel	0,0	0,7	186
ETR	0,0	0,1	25



Tableau 70 Quantités estimées de matériaux utilisés – VHR lourds (t/an)

	2021	2030	2050
Nombre de VHR additionnels par année	3	3 586	0
Nombre de VHR remplacés par année	0	70	337
Nombre de VHR en circulation	5	27 080	33 437
Quantité totale de matériaux utilisés	2,2	2 695	249
• Aluminium	0,8	954	88
• Bore	0,0	0,1	0,0
• Métaux ferreux	0,2	285	26
• Manganèse	0,0	2,7	0,3
• Phosphate	0,3	318	29
• Plastique	0,1	115	11
• Autres	0,4	452	42
• Minéraux critiques et stratégiques	0,5	568	52
Cobalt	0,0	2,9	0,3
Cuivre	0,2	190	18
Graphite	0,3	332	31
Lithium	0,0	32	2,9
Nickel	0,0	8,7	0,8
ETR	0,0	2,4	0,2



Tableau 71 Quantités estimées de matériaux générés – VHR lourds (t/an)

	2021	2030	2050
Nombre de VHR remplacés par année	0	70	337
Nombre de VHR en circulation	5	27 080	33 437
Quantité totale de matériaux utilisés	0,0	52	249
• Aluminium	0,0	18	88
• Bore	0,0	0,0	0,0
• Métaux ferreux	0,0	5,5	26
• Manganèse	0,0	0,1	0,3
• Phosphate	0,0	6,1	29
• Plastique	0,0	2,2	11
• Autres	0,0	8,6	42
• Minéraux critiques et stratégiques	0,0	11	52
Cobalt	0,0	0,1	0,3
Cuivre	0,0	3,6	18
Graphite	0,0	6,4	31
Lithium	0,0	0,6	2,9
Nickel	0,0	0,2	0,8
ETR	0,0	0,0	0,2



Tableau 72 Quantités estimées de matériaux utilisés – VÉPC lourds (t/an)

	2021	2030	2050
Nombre de VÉPC additionnels par année	1	8 119	43 483
Nombre de VÉPC remplacés par année	0	99	28 398
Nombre de VÉPC en circulation	3	61 298	653 442
Quantité totale de matériaux utilisés	0,3	2 752	24 075
• Aluminium	0,1	478	4 183
• Bore	0,0	0,2	2,1
• Fibre de carbone	0,1	929	8 129
• Fibre de verre	0,0	64	558
• Métaux ferreux	0,1	539	4 713
• Manganèse	0,0	0,8	7,2
• Phosphate	0,0	95	833
• Plastique	0,0	174	1 519
• Silicium	0,0	14	124
• Autres	0,0	234	2 051
• Minéraux critiques et stratégiques	0,0	224	1 957
Cobalt	0,0	0,9	7,7
Cuivre	0,0	104	912
Graphite	0,0	100	871
Lithium	0,0	9,4	83
Nickel	0,0	2,6	23
ETR	0,0	6,9	60



Tableau 73 Quantités estimées de matériaux générés – VÉPC lourds (t/an)

	2021	2030	2050
Nombre de VÉPC remplacés par année	0	99	28 398
Nombre de VÉPC en circulation	3	61 298	653 442
Quantité totale de matériaux utilisés	0,0	33	9 554
• Aluminium	0,0	5,8	1 653
• Bore	0,0	0,0	0,8
• Fibre de carbone	0,0	11	3 211
• Fibre de verre	0,0	0,8	220
• Métaux ferreux	0,0	6,5	1 862
• Manganèse	0,0	0,0	2,8
• Phosphate	0,0	1,1	329
• Plastique	0,0	2,1	600
• Silicium	0,0	0,2	49
• Autres	0,0	3,0	853
• Minéraux critiques et stratégiques	0,0	2,7	773
Cobalt	0,0	0,0	3,0
Cuivre	0,0	1,3	360
Graphite	0,0	1,2	344
Lithium	0,0	0,1	33
Nickel	0,0	0,0	9,1
ETR	0,0	0,1	24



Tableau 74 Quantités estimées de matériaux utilisés – bornes de recharge (t/an)

	2021	2030	2050
Nombre de bornes additionnelles par année	17 371	106 004	53 244
Nombre de bornes remplacées par année	79	23 078	97 364
Nombre de bornes installées	65 695	1 024 062	2 469 881
Quantité totale de matériaux utilisés	177	4 607	14 398
• Aluminium	22	738	2 414
• Métaux ferreux	57	1 591	5 175
• Polymères	10	73	59
• Autres	53	1 789	5 848
• Minéraux critiques et stratégiques	35	415	903
Cuivre	35	415	903

Tableau 75 Quantités estimées de matériaux générés – bornes de recharge (t/an)

	2021	2030	2050
Nombre de bornes remplacées par année	79	23 078	97 364
Nombre de bornes installées	65 695	1 024 062	2 469 881
Quantité totale de matériaux utilisés	1,6	1 826	7 321
• Aluminium	0,2	280	1 122
• Métaux ferreux	0,8	604	2 406
• Polymères	0,1	152	608
• Autres	0,4	678	2 718
• Minéraux critiques et stratégiques	0,2	112	466
Cuivre	0,2	112	466



ANNEXE F RATIOS DE COMPOSITION DES ÉLECTROLYSEURS



Tableau 76 Ratios de composition des électrolyseurs alcalins

Matériaux	kg/MW	Source
Nickel	1 000	The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions (AIE, version révisée mars 2022).
Zirconium	100	
Aluminium	500	
Acier	10 000	
Cobalt	0,7	Hypothèse
Cuivre	0,3	

Tableau 77 Ratios de composition des électrolyseurs MEP

Matériaux	kg/MW	Source
Nickel	1 000	Hypothèse : même composition que les électrolyseurs alcalins.
Zirconium	100	
Aluminium	500	
Acier	10 000	
MGP (Platine, iridium)	1	The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions (AIE, version révisée mars 2022).

