

NRC Publications Archive Archives des publications du CNRC

Modèle d'évaluation du cycle de vie des véhicules légers du CNRC Kannangara, Miyuru; Rabbitt, Christopher; Bensebaa, Farid

For the publisher's version, please access the DOI link below./ Pour consulter la version de l'éditeur, utilisez le lien DOI ci-dessous.

<https://doi.org/10.4224/40003372>

NRC Publications Archive Record / Notice des Archives des publications du CNRC :
<https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/object/?id=a568b65f-a9be-4b22-ab2c-816ef961f484>
<https://publications-cnrc.canada.ca/fra/voir/objet/?id=a568b65f-a9be-4b22-ab2c-816ef961f484>

Access and use of this website and the material on it are subject to the Terms and Conditions set forth at
<https://nrc-publications.canada.ca/eng/copyright>

READ THESE TERMS AND CONDITIONS CAREFULLY BEFORE USING THIS WEBSITE.

L'accès à ce site Web et l'utilisation de son contenu sont assujettis aux conditions présentées dans le site
<https://publications-cnrc.canada.ca/fra/droits>

LISEZ CES CONDITIONS ATTENTIVEMENT AVANT D'UTILISER CE SITE WEB.

Questions? Contact the NRC Publications Archive team at
PublicationsArchive-ArchivesPublications@nrc-cnrc.gc.ca. If you wish to email the authors directly, please see the first page of the publication for their contact information.

Vous avez des questions? Nous pouvons vous aider. Pour communiquer directement avec un auteur, consultez la première page de la revue dans laquelle son article a été publié afin de trouver ses coordonnées. Si vous n'arrivez pas à les repérer, communiquez avec nous à PublicationsArchive-ArchivesPublications@nrc-cnrc.gc.ca.



NRC-CNRC

Energy, Mining and Environment

Modèle d'évaluation du cycle de vie des véhicules légers du CNRC

29-Jan-2023

Miyuru Kannangara, Christopher Rabbitt, Farid Bensebaa



National Research
Council Canada

Conseil national de
recherches Canada

Canada

Journal des modifications

Révision	Modifications	Auteur/Approbateur	Date de sortie
0	Numéro initial (version préliminaire)	M. Kannangara	2023-03-09
1	Version 1.0	M. Kannangara	2023-03-31
2	Version 2.0	M. Kannangara	2024-01-29

Résumé exécutif

Ce document donne un aperçu du modèle d'évaluation du cycle de vie des véhicules légers (ACV) du Conseil national de recherches (CNRC) qui a été élaboré dans le cadre du Projet d'approvisionnement à faibles émissions de carbone (PAFEC) de Services publics et Approvisionnement Canada (SPAC). Il comprend une brève description de la méthodologie, un aperçu détaillé de l'élaboration de l'inventaire des processus modélisés et des instructions sur la mise en place et l'utilisation du modèle pour évaluer les émissions de gaz à effet de serre (GES) sur le cycle de vie des véhicules légers.

Le modèle ACV des véhicules légers du CNRC peut être utilisé pour évaluer les émissions de gaz à effet de serre (GES) sur le cycle de vie de 15 types de véhicules qui varient selon le type de motorisation et la classe de véhicule :

- cinq types de motorisations, dont le moteur à combustion interne (ICEV), moteur hybride (HEV), moteur hybride rechargeable (PHEV), moteur électrique à batterie (BEV) et moteur électrique à pile à combustible (FCEV), et
- trois classes de véhicules, dont une voiture (Car), un véhicule utilitaire sport (SUV) et une camionnette (PUT).

Ce modèle s'appuie sur les travaux antérieurs d'ACV du CNRC sur les véhicules légers. Il utilise openLCA, une plateforme logicielle d'ACV à source ouverte, comprend des informations détaillées sur les apports de matériaux et d'énergie nécessaires à la production et à l'assemblage de composants de véhicules, et intègre des informations sur la consommation d'énergie en amont provenant du modèle canadien d'ACV sur les carburants développé par Environnement et Changement climatique Canada, utilise Ecoinvent v3 comme base de données d'inventaire du cycle de vie et permet aux utilisateurs de définir des paramètres spécifiques au véhicule.

Contents

1. Introduction	5
2. Méthodologie	6
3. Développement de l'inventaire	7
3.1 Structure globale de l'inventaire du CNRC	8
3.2 Processus de production de véhicules	10
3.2.1 Fabrication et assemblage de composants de véhicules	10
3.2.2 Batterie du véhicule	11
3.2.3 Pile à combustible à membrane électrolytique polymère (PEMFC)	13
3.3 Modèle GREET	13
3.4 Intégration des données du GREET dans l'inventaire du CNRC	14
3.5 Processus d'utilisation des véhicules	18
3.6 Processus de production de combustible et d'électricité	18
3.7 Processus de fin de vie des véhicules (EOL)	18
3.8 Paramétrisation de l'inventaire du CNRC	20
4. Installation et utilisation du modèle ACV de véhicule léger du CNRC	22
4.1 Installation	23
4.2 Utilisation du modèle – étapes clés impliquées	24
5. Licence et conditions	27
6. Remerciements	28
7. Références	28

1. Introduction

Le secteur des transports est le principal émetteur de gaz à effet de serre (GES) au Canada avec 159 Mt d'équivalent CO₂ émis en 2019, représentant 24 % de tous les GES émis [1]. Parmi les différents moyens de transport, les véhicules légers ont contribué à hauteur de 73 Mt d'équivalent CO₂ émissions de GES en 2020. Dans ce contexte, l'électrification des véhicules est une option prometteuse pour réduire la consommation d'énergie et les émissions de GES [2]. Au Canada, l'électrification des véhicules est une mesure clé du cadre pancanadien sur la croissance propre et les changements climatiques. Le lancement d'importantes usines de production de véhicules électriques et de batteries a récemment été annoncé au Canada, renforçant l'engagement du pays en faveur d'une croissance propre et de la réduction des émissions de GES du secteur des transports [2,3].

Bien que les véhicules électriques à batterie (BEV) n'émettent pas d'émissions d'échappement, la quantification des réductions d'émissions de GES tout au long de la chaîne d'approvisionnement n'est pas simple. Une bonne évaluation des émissions des véhicules nécessite souvent le recours à l'analyse du cycle de vie (ACV), une méthodologie scientifique et standardisée qui évalue les impacts environnementaux associés à toutes les étapes du cycle de vie des produits et services. Les étapes du cycle de vie des véhicules comprennent l'acquisition des matières premières, la production de composants, la fabrication du véhicule, son utilisation et sa fin de vie, ainsi que la production et la distribution de carburant. Des études antérieures ont rapporté que les BEV ont des émissions de GES de fabrication plus élevées que les véhicules à moteur à combustion interne conventionnels (ICEV), principalement en raison de la production de cellules de batterie, mais des émissions de GES de production de carburant et d'utilisation inférieures lorsqu'ils sont chargés avec de l'électricité propre [4,5]. Cependant, les émissions de GES sur le cycle de vie des BEV et des véhicules électriques hybrides rechargeables (PHEV) peuvent dépasser celles des HEV lorsqu'ils sont chargés à l'aide d'électricité produite à partir de combustibles fossiles [6]. Certaines études ont rapporté que les émissions de GES sur le cycle de vie des véhicules électriques à pile à combustible (FCEV) à hydrogène (H₂) sont inférieures à celles d'autres types de véhicules lorsque l'H₂ est produit à partir de sources renouvelables [7,8]. Une revue générale de la littérature révèle que les réductions d'émissions de GES associées aux nouvelles technologies automobiles sont considérablement affectées par une série de facteurs qui incluent le mix électrique utilisé pour la recharge [5], la capacité de la batterie [8], la chimie de la batterie [9], le taux d'utilisation des véhicules et les profils d'utilisation [4], les modèles de tarification [10], les émissions de GES liées à la production de carburant [11] et la taille du véhicule [12]. Par conséquent, quantifier avec précision les émissions de GES des véhicules tout au long de leur cycle de vie implique d'importantes exigences en matière de données.

Dans la littérature, il n'existe qu'un nombre limité de cadres offrant une couverture complète des paramètres. Pour combler cette lacune, le Centre de recherche sur l'énergie, les mines et l'environnement (EME) du CNRC a développé et publié un modèle d'ACV de véhicule qui peut être utilisé pour quantifier les émissions de GES du cycle de vie des véhicules [13]. Ce modèle couvre 5 technologies de motorisation (véhicule à moteur à combustion interne – ICEV, véhicule électrique hybride – HEV, véhicule électrique hybride rechargeable – PHEV, véhicule électrique

à batterie – BEV et véhicule électrique à pile à combustible – FCEV), et comprend des paramètres clés tels que mix électrique et intensité des émissions de carburant, kilométrage, poids du véhicule, poids et composition chimique de la batterie, et consommation de carburant. Le modèle est basé sur une revue complète et détaillée des inventaires du cycle de vie disponibles.

À l'automne 2021, Services publics et Approvisionnement Canada (SPAC) a contacté le CNRC pour discuter de son modèle d'ACV et de la possibilité de le modifier pour atteindre les objectifs du Projet d'approvisionnement à faibles émissions de carbone (PAFEC) du Ministère. SPAC souhaitait augmenter le nombre de classes de véhicules couvertes par le modèle du CNRC, transférer le modèle vers openLCA – une plateforme logicielle d'ACV à source ouverte, intégrer informations sur la consommation d'énergie en amont provenant du modèle canadien d'ACV sur les carburants développé par Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) et augmenter la flexibilité du modèle pour permettre des entrées de données définies par l'utilisateur. Ce rapport et le modèle associé sont le résultat de la collaboration entre le CNRC et SPAC.

2. Méthodologie

Cette section décrit brièvement les choix méthodologiques effectués lors de l'élaboration du modèle ACV des véhicules légers du CNRC. Une ACV typique comprend une définition d'objectif, de portée et de limites du système, l'élaboration d'un inventaire, une évaluation d'impact et une interprétation des résultats. Ce rapport fournit toutefois des détails jusqu'à l'étape d'élaboration de l'inventaire. Il est de la responsabilité de l'utilisateur de terminer le processus d'ACV en choisissant une unité fonctionnelle appropriée (par exemple, « 1 véhicule km parcouru » ou « 1 véhicule au cours de sa durée de vie ») et des méthodes d'évaluation d'impact, en exécutant openLCA et en interprétant les résultats. Il est important de noter que la version actuelle du modèle ACV se concentre sur les émissions de GES et les impacts du changement climatique et n'a pas été testée pour d'autres catégories d'impacts environnementaux.

L'objectif principal de ce modèle ACV est d'estimer les émissions de GES sur le cycle de vie de modèles spécifiques de véhicules électriques et conventionnels en fonction d'un ensemble de paramètres définis par l'utilisateur. Le système de produits comprend les phases de production, de fabrication, d'utilisation et de fin de vie des matériaux pour les cycles des véhicules et du carburant. La Figure 1 montre le système de produits et les limites du système.

Les processus de premier plan du modèle ACV comprennent, par exemple, la fabrication de composants, l'assemblage, l'utilisation et la fin de vie des véhicules. Un inventaire des processus est dressé pour tous les processus de premier plan par le CNRC. Les processus de fond comprennent tous les processus de support qui fournissent de l'énergie et des matières aux processus de premier plan, y compris l'extraction et la transformation des matériaux, la production et la livraison de carburant, la production d'électricité, le traitement des déchets, l'élimination et le recyclage. Ecoinvent [14] et le modèle canadien d'ACV sur les carburants d'ECCC [15] sont utilisés comme bases de données de base.

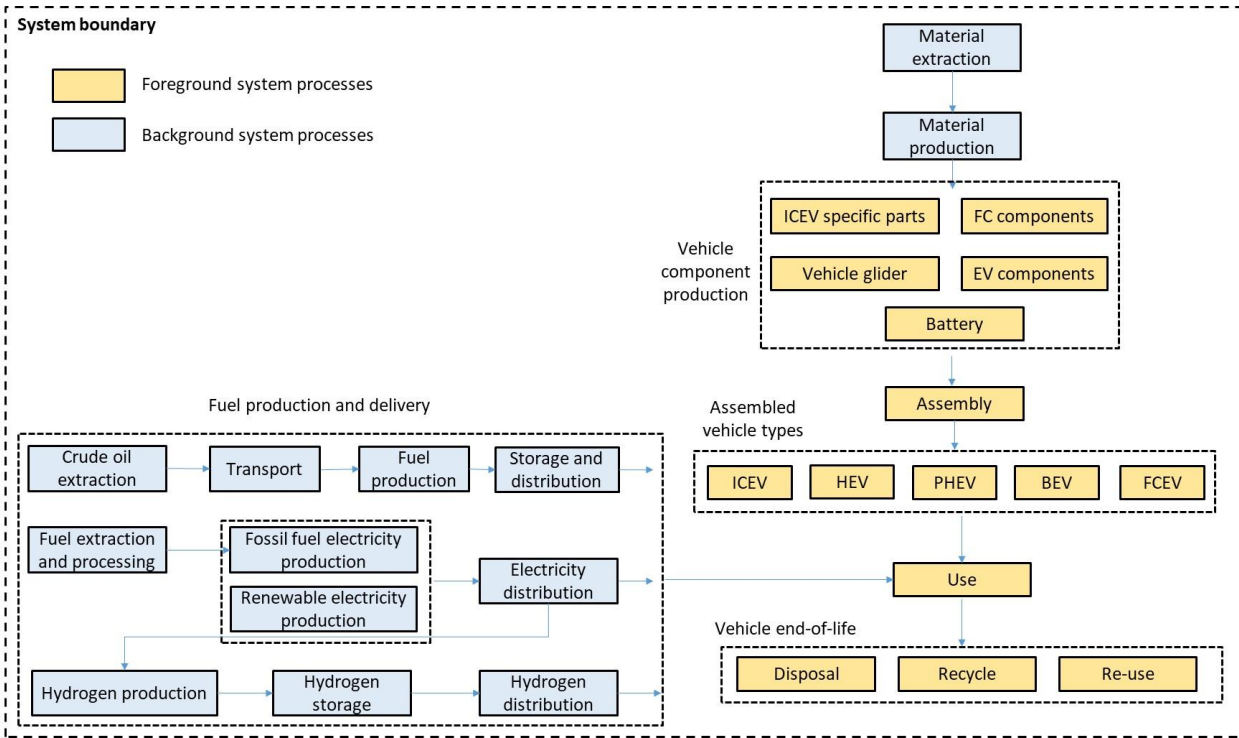


Figure 1 : Le système de produits, les limites du système et les sous-systèmes

Les processus suivants sont exclus en raison de la disponibilité limitée des données et de leur importance limitée compte tenu de la portée de la présente étude :

- Livraison du véhicule depuis l'usine d'assemblage jusqu'à l'utilisateur final ;
- Infrastructures pour l'assemblage des véhicules, la recharge, la distribution de carburant et les routes ; et
- Infrastructure pour la fin de vie des véhicules.

Certains processus de premier plan, tels que les processus de traitement des véhicules en fin de vie, sont multifonctionnels (par exemple, traiter les déchets et fournir des matières secondaires pour de nouveaux produits). Pour faire face à la multifonctionnalité des procédés de traitement, l'approche de coupure « cut-off » est utilisée pour imputer les impacts du traitement de fin de vie. Dans cette approche, les impacts de la fin de vie sont alloués au système de produits du véhicule, les matériaux recyclés sont reçus sans charges environnementales et aucun crédit n'est accordé pour le recyclage des matériaux. Cette approche est également appelée « approche en contenu recyclé » car elle encourage l'utilisation de matériaux recyclés dans le véhicule. À ce titre, il est recommandé d'utiliser la base de donnéesecoinvent avec le modèle de système « cut-off » comme base de données de base.

3. Développement de l'inventaire

Cette section décrit l'élaboration de l'inventaire des processus de premier plan et la conception générale du modèle ACV du CNRC. La publication précédente du CNRC [13] décrit l'inventaire

original constitué par le CNRC pour les véhicules légers, désormais appelé « inventaire du CNRC ». Dans ce projet, l'inventaire du CNRC a d'abord été transféré du logiciel SimaPro vers le logiciel openLCA. Ensuite, la granularité du modèle ACV a été améliorée en incorporant des données de haut niveau sur la composition du poids des véhicules et en ajoutant des données sur la carrosserie et le châssis des SUV et PUT du modèle GREET du Département de l'énergie des États-Unis (US DOE) [16]. GREET est un modèle ACV développé par l'Argonne National Laboratory des États-Unis pour évaluer les émissions de GES sur le cycle de vie des véhicules et des carburants. L'intégration des données de GREET dans l'inventaire du CNRC a nécessité une cartographie, une mise à l'échelle et, dans certains cas, un recalcul, et est décrite dans les sections suivantes.

3.1 Structure globale de l'inventaire du CNRC

Le modèle ACV des véhicules légers du CNRC est construit en reliant les processus de l'inventaire du CNRC d'une manière particulière pour créer le système de produits requis (c'est-à-dire la production, l'utilisation et la fin de vie). La Figure 2 montre la structure globale du modèle avec quatre niveaux de processus comprenant les matières premières, les matières intermédiaires, les composants du véhicule et les véhicules complets. Les processus de production de matières premières proviennent de la base de données ecoinvent. Les processus de production de matières intermédiaires font appel à des matières premières, à des procédés de fabrication et à des intrants énergétiques. Ces intrants proviennent de la base de données ecoinvent et des processus de production de matières premières. Les processus de production de composants représentent la fabrication de composants de véhicules, tels que des moteurs électriques ou des batteries, et sont composés d'intrants de matières premières et intermédiaires et d'intrants d'énergie. Les processus de production de composants incluent de nombreux niveaux de sous-composants pour fournir une granularité supplémentaire (par exemple, le bloc de batterie est divisé en cellule de batterie, système de gestion de batterie, système de refroidissement et emballage). Enfin, les différents composants du véhicule sont assemblés entre eux pour produire des véhicules.

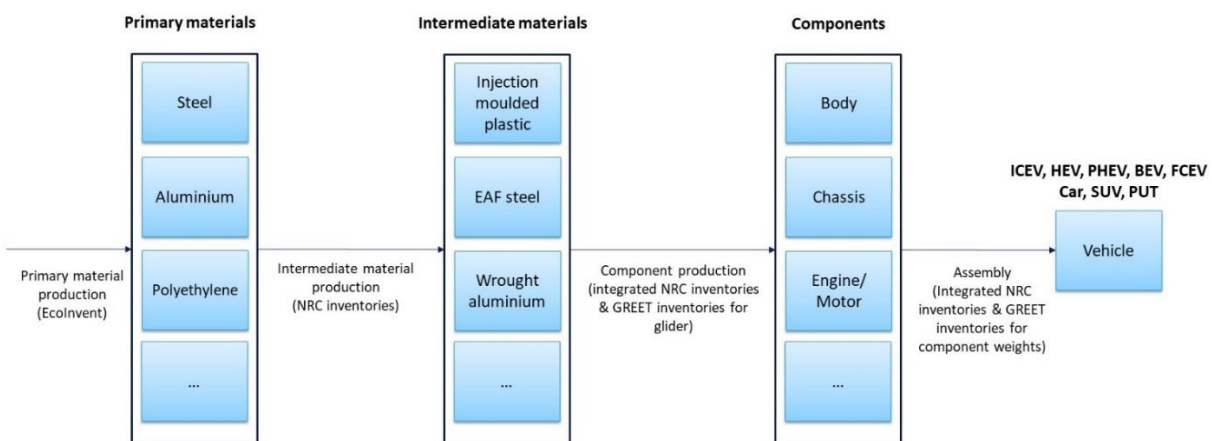


Figure 2 : Structure globale de l'inventaire NRC jusqu'à la production du véhicule à quatre niveaux différents (véhicule, composant, matière intermédiaire et matière primaire)

Des exemples de processus à différents niveaux (par exemple, véhicule, composants et matériaux intermédiaires) et leurs connexions sont donnés ci-dessous pour plus de précisions. Les tableaux 1 et 2 montrent les processus au niveau du véhicule avec les entrées des processus des composants du véhicule. Le processus présenté au tableau 2, qui aboutit à 1 kg de composants de véhicule hors batteries et fluides (« Vehicle components except batteries and fluids (BEV-Car) »), est relié à l'inventaire présenté au Tableau 1, qui aboutit à 1 véhicule assemblé « Assembled vehicle (BEV-Car) ». Des paramètres, tels que le paramètre poids à vide du véhicule intitulé « curb_weight_without_batteries_fluids » ou le paramètre de poids de la batterie intitulé « battery_weight » sont décrits dans la section 3.8 et facilitent les connexions et la mise à l'échelle des processus. Le Tableau 3 montre un processus au niveau des composants qui aboutit à 1 kg de production de châssis « Chassis (BEV-Car) » et est connecté au processus décrit dans le Tableau 2. Enfin, le Tableau 4 contient un processus au niveau des matériaux intermédiaires qui aboutit à 1 kg de production moyenne de plastique « Average plastic » et est connecté au processus du Tableau 3. Toutes les entrées du processus présentées dans le Tableau 4 proviennent de la base de données ecoinvent. La structure complète de l'inventaire des processus du CNRC peut être visualisée dans le modèle openLCA.

Tableau 1 : Processus au niveau du véhicule pour la production d'un véhicule assemblé « Assembled vehicle (BEV-Car) »

	Montant	Unité	Processus de saisie
Contributions			
Vehicle components except batteries and fluids (BEV-Car)	curb_weight_without_batteries_fluids	kg	Tableau 2
Traction battery pack	battery_weight	kg	<i>Non fourni dans l'exemple</i>
Fluids	1	p	
SLI battery	1	p	
Sorties			
Assembled vehicle (BEV-Car)	1	p	

Tableau 2 : Processus au niveau du véhicule pour la production de 1 kg de composants de véhicules à l'exception des batteries et des fluides « Vehicle components except batteries and fluids (BEV-Car) »

	Montant	Unité	Processus de saisie
Contributions			
Powertrain System (including BOP)	0.048	kg	<i>Non fourni dans l'exemple</i>
Transmission System	0.057	kg	
Chassis (w/o battery)	0.248	kg	Tableau 3
Traction Motor	0.072	kg	<i>Non fourni dans l'exemple</i>
Generator	0	kg	
Electronic Controller	0.059	kg	
Fuel Cell Onboard Storage	0	kg	
Body: BIW, interior, exterior, and glass	0.516	kg	
Assembly	7.72201E-4	p	
Sorties			

Vehicle components except batteries and fluids (BEV-Car)	1	kg	
--	---	----	--

Tableau 3 : Processus au niveau des composants pour la production de 1 kg de châssis « Chassis (BEV-Car) »

	Montant	Unité	Processus de saisie
Contributions			
Average Plastic	0.023	kg	Tableau 4
Cast Aluminum	0.186	kg	<i>Non fourni dans l'exemple</i>
Cast iron	0	kg	
Copper/Brass	0.013	kg	
Glass	0	kg	
Glass Fiber-Reinforced Plastic	0.002	kg	
Magnesium	0.001	kg	
Rubber	0.092	kg	
Steel	0.668	kg	
Wrought Aluminum	0.015	kg	
Zinc	0	kg	
Sorties			
Chassis (BEV-Car)	1	kg	

Tableau 4: Processus au niveau des matériaux intermédiaires pour la production de 1 kg de plastique « Average plastic »

	Montant	Unité	Processus de saisie
Contributions			
Synthetic rubber	1	kg	ecoinvent
Injection moulding	1	kg	
Sorties			
Average plastic	1	kg	

3.2 Processus de production de véhicules

3.2.1 Fabrication et assemblage de composants de véhicules

Les processus relatifs aux composants de véhicules sont classés comme suit : pièces communes, pièces spécifiques aux véhicules électriques, pièces spécifiques aux ICEV et pièces spécifiques aux FCEV. La Figure 3 montre les principaux composants des ICEV, EV et FECV. Les véhicules hybrides (c'est-à-dire HEV et PHEV) sont modélisés en combinant des pièces spécifiques aux EV et ICEV. Les processus composants sont basés sur des données de la littérature publiées [17–20].

Le processus d'un composant illustré à la Figure 3 comprend les matières premières, les matières intermédiaires, l'énergie et les intrants de fabrication requis pour la production du composant. Les processus de matériaux intermédiaires sont modélisés à partir de sources littéraires [17–20]. Les processus d'assemblage des véhicules sont supposés être similaires pour tous les types de motorisations, d'après Hawkins et al. [21], et incluent les apports de matériaux et d'énergie nécessaires à l'assemblage du véhicule.

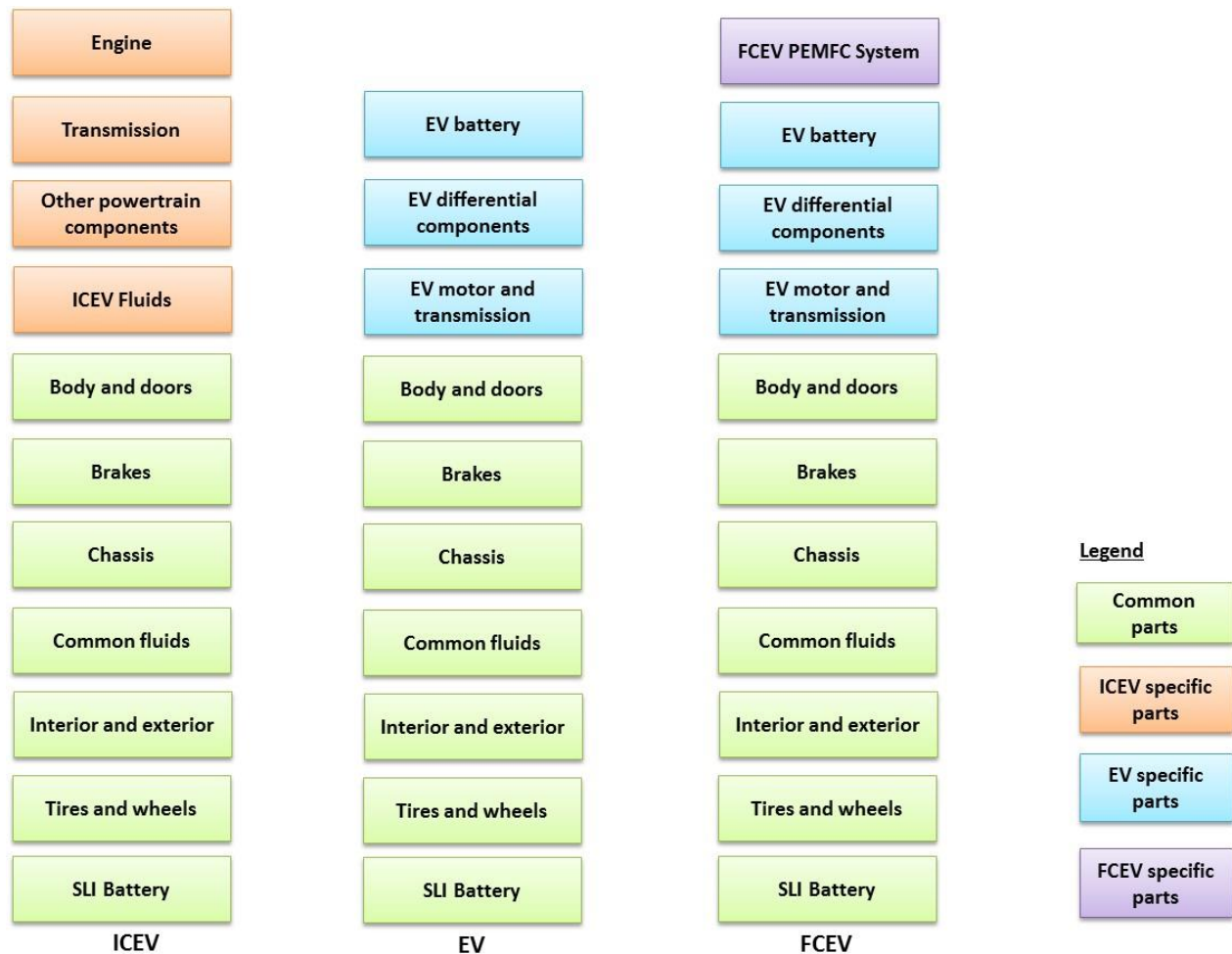


Figure 3 : Une représentation de haut niveau des composants pris en compte pour la construction d'un ICEV, EV et FCEV

3.2.2 Batterie du véhicule

L'inventaire comprend les types de batteries suivants : batterie au lithium fer phosphate (Li-Ion LFP), batterie au lithium nickel manganèse oxyde de cobalt (Li-Ion NMC), batterie au oxydes d'aluminium lithium-nickel-cobalt (Li-Ion NCA) et batterie nickel-hydrure métallique (NiMH). Les processus pour les batteries Li-Ion LFP, Li-Ion NMC, Li-Ion NCA et NiMH sont compilés sur la base de plusieurs sources de données [18,20,22]. Une batterie est composée de plusieurs composants, tels que les cellules de la batterie, le système de refroidissement, le système de

gestion de la batterie et l'emballage, chacun composé de plusieurs sous-composants. La Figure 4 montre une représentation des composants et sous-composants requis pour produire un bloc de batterie. Des systèmes similaires sont supposés pour tous les types de batteries, avec des modifications apportées aux matériaux d'électrode active pour être représentatifs de la chimie spécifique de la batterie (c'est-à-dire Li-Ion LFP, Li-Ion NMC, Li-Ion NCA et NiMH). Tous les autres composants et sous-composants, tels que le système de refroidissement, le système de gestion de la batterie et l'emballage, restent inchangés dans les différentes compositions chimiques de la batterie en raison de l'indisponibilité des données. La voie de production du matériau cathodique Li-Ion NMC est modélisée comme des réactions entre LiOH, NiSO₄, CoSO₄, MnSO₄ et NaOH. La voie de production du matériau cathodique Li-Ion LFP est modélisée comme des réactions entre LiOH, FeSO₄ et H₃PO₄. La voie de production du matériau cathodique Li-Ion NCA est modélisée comme des réactions entre LiOH, NiSO₄, CoSO₄, AlSO₄ et NaOH.

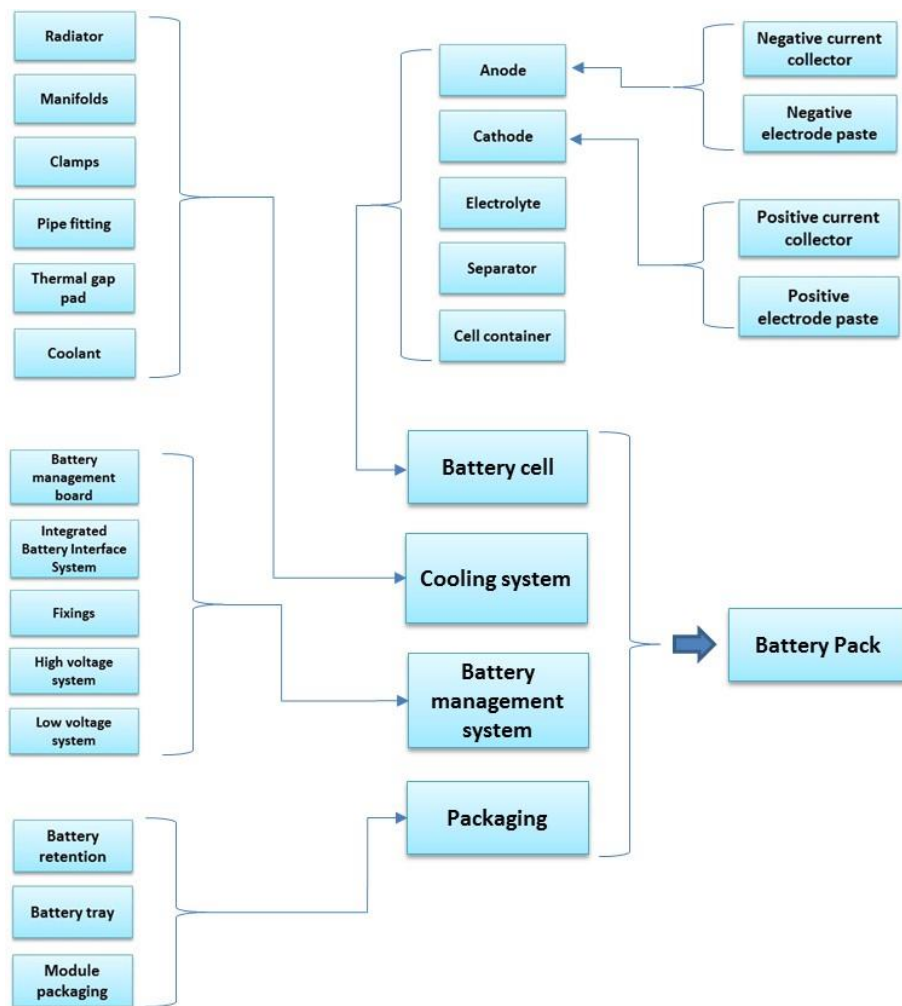


Figure 4 : Processus d'une batterie

3.2.3 Pile à combustible à membrane électrolytique polymère (PEMFC)

Les procédés pour le système de pile à combustible à membrane électrolytique polymère (PEMFC) pour véhicules à pile à combustible dérivent d'Evangelisti et al. [19] et sont modélisés comme le montre la Figure 5. Le système PEMFC comprend la pile PEMFC, le système de gestion de pile à combustible, le réservoir d'hydrogène et le reste de l'installation, y compris les pompes, les compresseurs et les ventilateurs. Le système de gestion de pile à combustible est supposé être similaire au système de gestion de batterie illustré à la Figure 4. Un système de réservoir unique enveloppé de fibre de carbone et de résine avec un revêtement en polyéthylène haute densité est supposé pour le réservoir d'hydrogène.

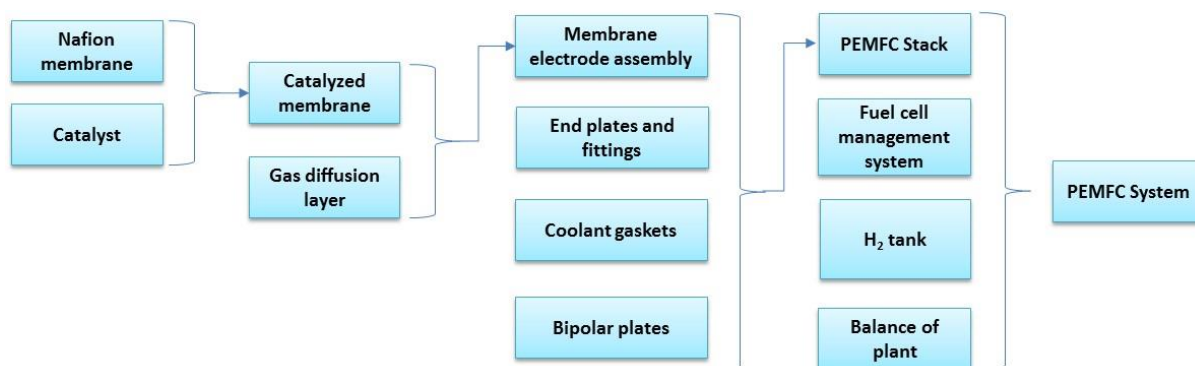


Figure 5 : Processus d'un système de pile à combustible à membrane électrolytique polymère (PEMFC)

3.3 Modèle GREET

Le modèle GREET du Département de l'énergie des États-Unis publie la composition des matériaux par composant du véhicule et la composition du poids des composants par type de motorisation et classe de véhicule. Ces données représentent actuellement les seules données accessibles au public pour développer des modèles ACV de véhicules avec une granularité élevée. Le Tableau 5 montre un exemple de composition du poids des composants dans le modèle GREET pour les BEV dans trois classes de véhicules (Car, SUV et PUT). Il est important de noter que les composants inclus dans GREET et dans l'inventaire du CNRC sont différents et la section 3.4 décrit la procédure pour intégrer les données de GREET dans l'inventaire du CNRC.

Tableau 5 : Composition pondérale des composants des BEV dans les trois classes de véhicules (Car, SUV et PUT), telle que donnée par le modèle GREET [16]

Système de composants	BEV, Car (%)	BEV, SUV (%)	BEV, PUT (%)
Powertrain System (including BOP)	4.8	3.1	1.8
Transmission System	5.7	4.7	4.0
Chassis (w/o battery)	24.8	26.6	37.4
Traction Motor	7.2	7.2	7.4

Generator	-	-	-
Electronic Controller	5.9	5.9	5.9
Fuel Cell Onboard Storage	-	-	-
Body: BIW, interior, exterior, and glass	51.6	52.4	41.8

En plus des compositions de poids des composants (indiquées dans le Tableau 5), les compositions matérielles du composant GREET intitulé « glider », représentant le châssis et la carrosserie, pour les trois classes de véhicules (Car, SUV et PUT) [16] sont incluses dans l'inventaire du CNRC. Ces données augmentent la granularité de l'inventaire du CNRC lors de la modélisation des trois classes de véhicules (Car, SUV et PUT), pour lesquelles les compositions des matériaux du composant « glider » peuvent différer considérablement.

3.4 Intégration des données du GREET dans l'inventaire du CNRC

Le modèle ACV du CNRC tient compte de la variation de la composition du poids des composants du véhicule selon les types de motorisations et les classes de véhicules. Ceci est réalisé en intégrant les données sur la composition du poids des composants du modèle GREET (Tableau 5) dans l'inventaire du CNRC. Comme les systèmes de composants de l'inventaire original du CNRC et du modèle GREET sont différents, la cartographie des composants est définie pour prendre en charge l'intégration (illustré à la Figure 6). Une valeur de mappage de 1 indique qu'il existe une correspondance directe entre un composant GREET et un composant CNRC. Dans certains cas, un composant GREET représente une combinaison de composants du CNRC. Par exemple, le composant « châssis » dans GREET comprend le châssis, les freins, les pneus et les roues, tandis que l'inventaire du CNRC comprend des composants distincts pour le « châssis », les « brakes » et les « tires and wheels ». Dans de tels cas, les composants du CNRC sont combinés pour produire un composant qui correspond à la définition des composants GREET. Dans certains cas, les composants GREET représentent un sous-ensemble des composants correspondants du CNRC. Par exemple, le composant « EV motor » dans l'inventaire du CNRC est une combinaison d'un moteur, d'un générateur, d'un onduleur et de pièces électroniques de support, tandis que GREET définit « traction motor », « generator » et « electronic controller » comme des composants distincts. Dans de tels cas, les sources originales de données de l'inventaire du CNRC sont examinées et l'inventaire est mis à jour pour inclure uniquement les sous-composants de la définition des composants GREET. Les définitions des composants GREET et des composants CNRC peuvent être trouvées dans les références suivantes : [17,19,23].

		NRC framework components										
		body & doors	brakes	chassis	EV motor	Engine ICEV	vehicle interior & exterior	tires and wheels	other ICEV powertrain	ICEV transmissn	PEMFC stack	PEMFC auxiliaires
GREET components	Powertrain system (including BOP) - ICEV					1			1			
	Powertrain system (including BOP) - BEV								Powertrain electrical, weld blanks and fasteners, Pollen Filter Housing			
	Powertrain system (including BOP) - FCEV								Powertrain electrical, weld blanks and fasteners, Pollen Filter Housing		1	
	Transmission system									1		
	Chassis		1	1				1				
	Traction motor				Electric motor, motor related components, electric motor-other							
	Generator				Inverter, for charging							
	Electronic controller				Controller, passive cooling, other hardware							
	Fuel cell onboard storage											1
	Body: BIW, interior, exterior and glass	1						1				

Figure 6 : Cartographie des composants de l'inventaire du CNRC et du GREET

En plus de cartographier les composants, des coefficients de cartographie sont également développés (illustrés à la Figure 7). Cela facilite le couplage de l'inventaire du CNRC, qui est rapporté par composants, aux données de GREET, qui sont rapportées par 1 kg de poids. Les coefficients sont calculés en prenant l'inverse des pondérations des composants du CNRC. Par exemple, le composant « traction battery » dans l'inventaire du CNRC pèse 138 kg et un coefficient de 0,007 est calculé en prenant l'inverse de 138 pour convertir le processus approprié du CNRC en 1 kg de flux de référence.

		NRC framework components															
		body & doors	brakes	chassis	EV motor	Engine ICEV	vehicle interior & exterior	tires and wheels	final assembly	other ICEV powertrain	EV differential transmission	ICEV transmissn	SU battery	PEMFC stack	PEMFC auxiliaires	Traction battery	
GREET components	Powertrain system (including BOP) - ICEV					0.002476546				0.0013402							
	Powertrain system (including BOP) - BEV									0.0620084							
	Powertrain system (including BOP) - FCEV									0.0066819				0.00668193			
	Transmission system											0.019282684					
	Chassis		0.00314179	0.00314179				0.00314179									
	Traction motor				0.00721												
	Generator				0.01347												
	Electronic controller				0.00606												
	Fuel cell onboard storage															0.006374717	
	Body: BIW, interior, exterior and glass	0.001508534						0.001508534									
	SU battery								0.0007722				0.060724803				
Traction battery																1	

Figure 7 : Cartographie des coefficients de l'inventaire du CNRC et du GREET

Les composants « glider » de l'inventaire du CNRC (c.-à-d. châssis et carrosserie) pour les trois classes de véhicules (Car, SUV et PUT) ont été mis à jour sur la base des composants « glider » de GREET (les données de GREET se trouvent dans [16]). Cela nécessite toutefois la mise en correspondance des matériaux de GREET avec ceux du CNRC, car l'inventaire du CNRC utilise ecoinvent comme base de données de base. Les tableaux Tableau 6 et 7 montrent la cartographie des matériaux GREET avec les matériaux du CNRC pour les composants du châssis et de la carrosserie du CNRC. Dans certains cas, une cartographie un à un était possible et le matériau du GREET était directement associé à un procédé ecoinvent, tel que le plastique renforcé de fibres de verre (« Glass fiber reinforced plastic »). Dans d'autres cas, une cartographie un à un n'était pas possible. Par exemple, il y a un seul matériau acier (« steel ») dans GREET, mais l'inventaire du CNRC contient de nombreux types d'acier (par exemple, l'acier EAF « EAF steel », l'acier galvanisé « galvanized steel », etc.). Dans de tels cas, une moyenne pondérée a été calculée sur la base des pourcentages de matériaux en acier dans l'inventaire original du CNRC [17].

Tableau 6 : Cartographie des matériaux de l'inventaire du CNRC avec les matériaux GREET pour le châssis

Le matériau de GREET	Inventaire du CNRC	
	Composant/Base de données dans lequel se trouvent les matériaux cartographiques	Nom du matériau
Average Plastic	Chassis	Plastic - Chassis
Cast Aluminum	Chassis	Cast Aluminium - Chassis
Cast iron	Chassis	Cast iron - chassis
Copper/Brass	Body and doors	Copper - Chassis
Glass	Body and doors	Glass
Glass Fiber-Reinforced Plastic	Ecoinvent	Glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulded
Magnesium	Chassis	Magnesium- Chassis
Rubber	Chassis	Rubber - Chassis
Steel	Chassis	Steel -Chassis
Wrought Aluminum	Chassis	Wrought Aluminium - Chassis
Zinc	Body and doors	Zinc

Tableau 7 : Cartographie des matériaux de l'inventaire du CNRC avec les matériaux GREET pour le corps

Le matériau de GREET	Inventaire du CNRC	
	Composant/Base de données	Nom du matériau
Average Plastic	Body and doors	Plastic
Carbon Fiber-Reinforced Plastic	Ecoinvent	carbon fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulded
Cast Aluminum	Body and doors	Cast Aluminium
Copper/Brass	Body and doors	Copper
Glass	Body and doors	Glass
Glass Fiber-Reinforced Plastic	Ecoinvent	glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulded
Magnesium	Body and doors	Magnesium
Rubber	Body and doors	Rubber
Steel	Body and doors	EAF steel - 4.9%, Galvanized steel - 81.5%, Hot rolled steel - 8.6%, Stainless steel - 0.02%, rolled steel - 4.9%
Wrought Aluminum	Body and doors	Wrought Aluminium
Zinc	Body and doors	Zinc

3.5 Processus d'utilisation des véhicules

Les processus d'utilisation des véhicules comprennent les processus d'utilisation du carburant et les processus de service/maintenance. Les processus de consommation de carburant évaluent la quantité d'essence, d'électricité ou d'hydrogène utilisée pendant la durée de vie du véhicule, tandis que les processus de service/maintenance évaluent les besoins en matériaux et en énergie pour le remplacement des pièces et les services pendant la durée de vie du véhicule.

Les processus de consommation de carburant utilisent le kilométrage sur la durée de vie du véhicule et la consommation moyenne de carburant du véhicule. Les apports de carburant des processus d'utilisation du carburant proviennent des processus de production de carburant décrits à la section 3.6. Les processus de maintenance des véhicules sont basés sur le processus de « passenger car maintenance » de la base de données ecoinvent [14], qui représente le remplacement de composants et de substances courants tels que les pneus, l'huile moteur, le liquide de refroidissement et la batterie SLI (Starting, Light, and Ignition). Enfin, les processus d'entretien des véhicules incluent la consommation d'énergie associée à l'entretien du véhicule et aux émissions des freins, comme l'ont fourni Hawkins et al. [21].

3.6 Processus de production de combustible et d'électricité

Les limites du système du modèle ACV du CNRC comprennent les étapes du cycle de vie des carburants utilisés par les véhicules, y compris les étapes de production et de livraison. Les processus de production de combustible et d'électricité du modèle NRC dérivent du modèle canadien d'ACV sur les carburants d'ECCC [15]. Les processus de production de carburant et d'électricité suivants sont ajoutés à partir du modèle canadien d'ACV sur les carburants :

- Réseau électrique au consommateur pour toutes les provinces et territoires canadiens « Grid electricity at consumer for all the Canadian provinces and territories ».
- Intensités moyennes des émissions de GES du diesel et de l'essence sur le cycle de vie du consommateur au Canada « Average Canadian life cycle diesel and gasoline GHG emission intensities at consumer ».

En plus des processus de production de carburant et d'électricité au Canada, l'entrée d'électricité, moyenne tension « Electricity, medium voltage » de la base de données ecoinvent est incluse dans les processus de production de composants pertinents. Ainsi, l'utilisateur du modèle peut choisir la source de l'apport d'électricité en sélectionnant l'un des processus de production d'électricité d'ecoinvent qui représente le lieu de fabrication du composant.

3.7 Processus de fin de vie des véhicules (EOL)

Le modèle ACV des véhicules légers du CNRC utilise une approche de coupure « cut-off ». Dans cette approche, les producteurs sont responsables de leurs déchets et les produits recyclables sont disponibles gratuitement. La figure 8 montre un diagramme plus détaillé des limites du système en fin de vie et des flux coupés. Les minéraux critiques pour les batteries, les batteries recyclées, les métaux ferreux, les métaux non ferreux et les flux non métalliques

quittent le système de produits à la fin de vie du véhicule (EOL) et leurs charges potentielles évitées ne sont pas créditées au cycle de vie du véhicule. Toutefois, les charges associées au démontage, au déchetage, au démontage des batteries, au recyclage et à la réutilisation des véhicules sont imputées au cycle de vie du véhicule.

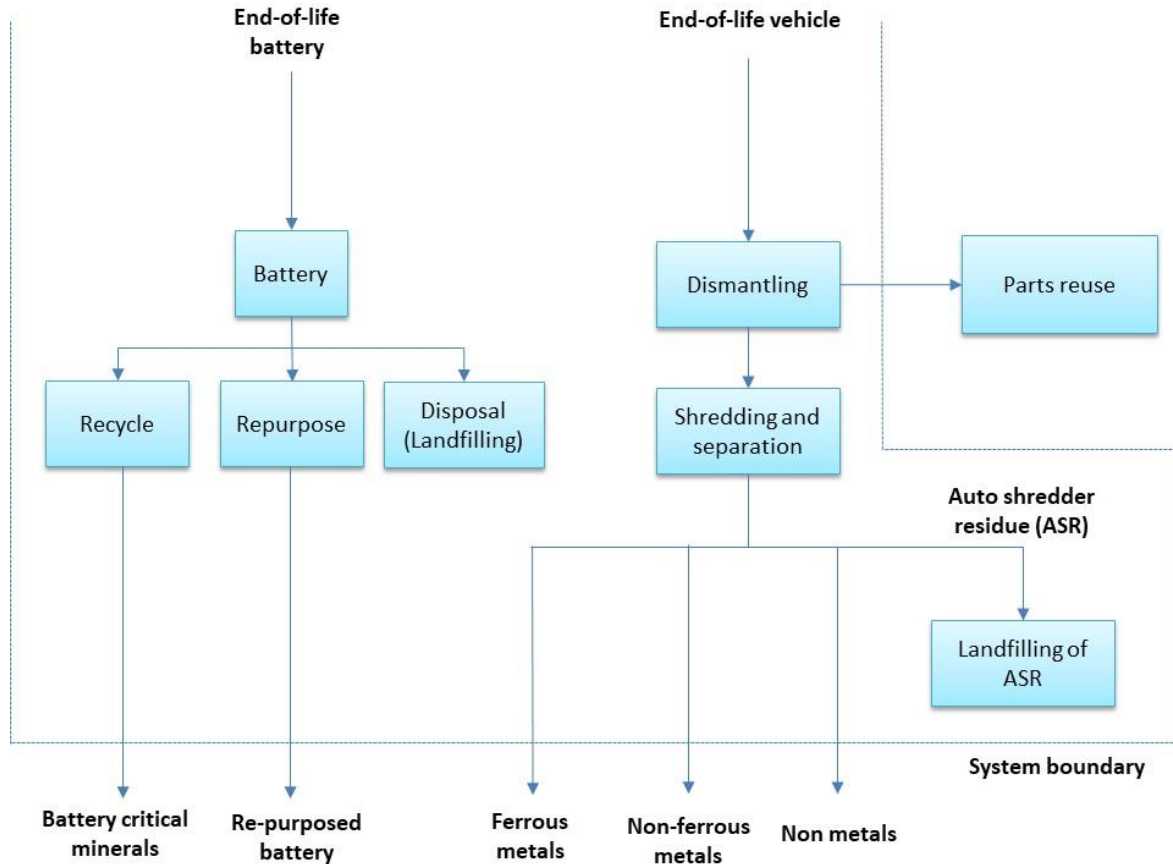


Figure 8 : Traitement de fin de vie des véhicules

Les données sur la consommation d'énergie pour le démantèlement, le déchetage et la séparation des véhicules mis au rebut, la part des pièces de véhicules réutilisées, les taux de recyclage des matériaux pendant le déchetage et la séparation sont basées sur des valeurs canadiennes typiques [24]. Les procédés de recyclage des batteries sont modélisés en supposant une répartition proportionnelle de trois types de procédés, à savoir le procédé hydrométallurgique, le procédé physique intermédiaire et le procédé physique direct [25]. Les processus de réutilisation des batteries sont basés sur la demande d'énergie et les remplacements de composants nécessaires pour produire une batterie adaptée aux applications de stockage d'énergie [26]. L'élimination des résidus de batteries et de broyeurs automatiques est basée sur des processus de traitement des déchets disponibles dans la base de donnéesecoinvent.

3.8 Paramétrisation de l'inventaire du CNRC

L'inventaire du CNRC contient près de 370 processus unitaires qui décrivent la production de matériaux et de matériaux intermédiaires, la production et la livraison d'énergie, la production de sous-composants et de composants de véhicules, l'assemblage de véhicules, l'utilisation et la fin de vie des véhicules. La Figure 9 montre un exemple de système pour un véhicule, tel que donné par openLCA. Il peut être difficile pour un nouvel utilisateur de déterminer l'emplacement des paramètres critiques de l'inventaire du CNRC qui doivent être ajustés pour calculer les impacts environnementaux d'un modèle de véhicule spécifique. Par conséquent, les spécifications de modélisation critiques sont paramétrées pour permettre à l'utilisateur du modèle de saisir plus facilement les spécifications du véhicule.

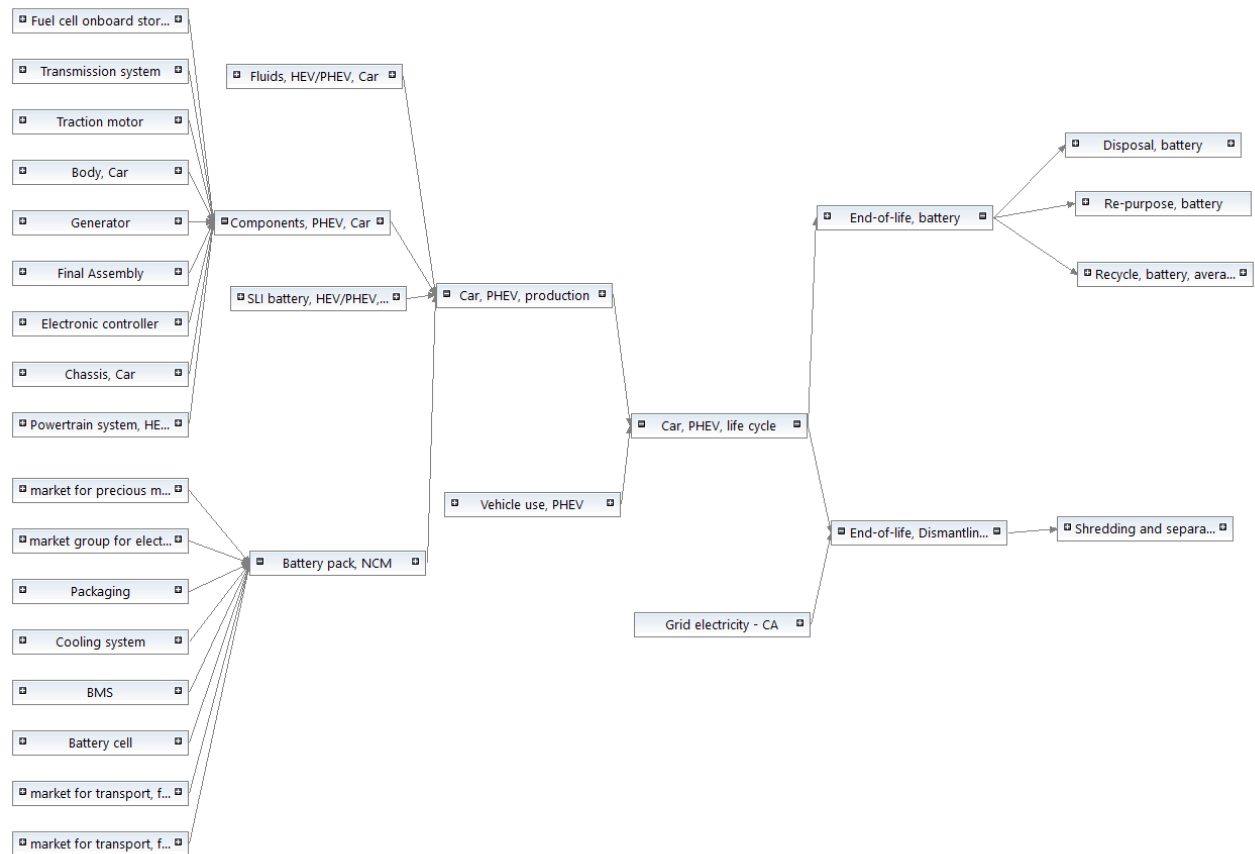


Figure 9 : Un exemple de système de produit automobile, comme illustré dans le graphique du modèle openLCA

Le tableau 8 donne un aperçu des paramètres critiques, de leurs descriptions et des unités permettant de déterminer les émissions de GES sur le cycle de vie d'un modèle de véhicule spécifique. Le Tableau 9 montre les poids typiques des fluides et des batteries SLI pour les types de motorisations et les classes de véhicules modélisés, tels que définis dans le modèle GREET [23]. Le Tableau 10 fournit des exemples de valeurs de paramètres pour la classe de véhicules automobiles pour les cinq types de motorisations de véhicules tels que définis dans

l'étude ACV originale du CNRC sur les véhicules légers [13]. Enfin, le Tableau 11 montre des exemples de valeurs de paramètres pour le poids à vide selon les types de motorisations et les classes de véhicules, telles que données par le modèle GREET [23].

Tableau 8 : Paramètres de véhicule critiques requis pour définir un modèle de véhicule spécifique

Nom du paramètre	Description	Unité
curb_weight_without_batteries_fluids	Le poids à vide du véhicule, à l'exception du poids de traction, de la batterie SLI et des fluides tels que le carburant, l'huile moteur, les liquides de refroidissement et l'huile de frein. Des suggestions de poids pour la batterie et les fluides SLI se trouvent dans le Tableau 9.	Kg
battery_weight	Poids du pack batterie de traction. Cela comprend les cellules de batterie, le boîtier de batterie, le refroidissement passif et le système de gestion de la batterie.	Kg
fuel_consumption_electric	Consommation d'électricité, applicable pour BEV et PHEV	kWh/100 km
fuel_consumption_gas	Consommation d'essence, applicable pour ICEV, HEV et PHEV	L/100 km
fuel_consumption_hydrogen	Consommation d'hydrogène, applicable pour FCEV	kg/100 km
lifetime_kms	La distance parcourue par le véhicule au cours de sa durée de vie	Km
no_battery_replacements	Nombre de remplacements de batteries de traction au cours de leur durée de vie	Valeur entiere
share_electric_kms	Part des kilomètres électriques parcourus en PHEV	Fraction

Tableau 9 : Fluides typiques et poids des batteries SLI par type de motorisation et classe de véhicule [23]

Type de motorisation et classe de véhicule	Poids total du fluide (kg)	Poids de la batterie SLI (kg)	Total (kg)
Passenger Car - ICEV	29	13	42
Passenger Car - HEV	19	9	27
Passenger Car - PHEV	19	9	27
Passenger Car - EV	12	5	17
Passenger Car - FCV	12	5	17
SUV - ICEV	38	17	55
SUV - HEV	25	11	36
SUV - PHEV	25	11	36
SUV - EV	16	7	23
SUV - FCV	16	7	23

PUT - ICEV	38	17	55
PUT - HEV	25	11	36
PUT - PHEV	25	11	36
PUT - EV	16	7	23
PUT - FCV	16	7	23

Tableau 10 : Exemples de valeurs de paramètres par type de motorisation [13]

	ICEV	HEV	PHEV	BEV	FCEV
Poids à vide (kg)	1301	1517	1673	1580	1863
Capacité de la batterie (kWh)		1.5	10	46	
Poids de la batterie (kg)	-	36	137	300	30
Économie de carburant – Essence (L/100 km)	7.32	5.0	5.14	-	-
Économie de carburant – Essence (L/100 km)	-	-	18.74	16.85	0.94 kg/100 km
Kilométrage à vie (km)	200,000	200,000	200,000	200,000	200,000
Part du kilométrage électrique			47.5%		

Tableau 11 : Exemples de poids à vide (kg) pour différents types de motorisations et classes de véhicules [23]

	ICEV	HEV	PHEV	BEV	FCEV
Car	1352	1461	1501	1937	1647
SUV	1642	1796	1864	2504	2082
PUT	1891	2068	2159	2953	2431

4. Installation et utilisation du modèle ACV de véhicule léger du CNRC

Le modèle ACV des véhicules légers du CNRC utilise openLCA comme plate-forme et l'inventaire du CNRC est disponible sous forme de base de données openLCA. Il utilise la base de données ecoinvent 3.8 cut-off comme base de données de base. Par conséquent, les utilisateurs du modèle doivent obtenir la version compatible openLCA de la base de données ecoinvent à partir d'openLCA nexus [27].

4.1 Installation

Le serveur de collaboration openLCA est une application serveur qui complète l'application openLCA et a été développé pour faciliter l'échange et la synchronisation des données ACV (par exemple, processus de flux, systèmes de produits ou modèles ACV entiers) entre différents utilisateurs travaillant à partir de différents ordinateurs, permettant ainsi une distribution, modélisation collaborative ACV. Les utilisateurs d'OpenLCA peuvent travailler simultanément sur une étude ACV tout en suivant les modifications de chacun dans des bases de données synchronisées. Le CNRC héberge son propre serveur de collaboration openLCA [28] auquel les utilisateurs externes peuvent accéder. Actuellement, les utilisateurs doivent demander des informations d'identification pour accéder au serveur de collaboration. Un manuel de référence décrivant l'accès et l'utilisation du serveur de collaboration du CNRC est publié dans les archives des publications du CNRC [29].

Les principales étapes pour télécharger et mettre en place le cadre d'ACV pour les véhicules légers du CNRC sont décrites ci-dessous. Les utilisateurs sont encouragés à se référer au manuel du serveur de collaboration de CNRC pour obtenir des instructions détaillées [29] :

1. Demander les identifiants d'accès au serveur de collaboration du CNRC en contactant l'administrateur (Cyrille.Deces-Petit@nrc-cnrc.gc.ca);
2. Téléchargez et installez le logiciel d'application openLCA Desktop 1.11 sur un ordinateur local ;
3. Configurez le serveur de collaboration dans l'application de bureau openLCA ;
4. Créez une nouvelle base de données vide et connectez le référentiel du serveur de collaboration du CNRC de « Light_Duty_Vehicle » à la base de données ;
5. Importez la base de données d'arrière-plan ecoinvent 3.8 cut-off;
6. Désélectionnez ecoinvent et toute autre base de données d'arrière-plan importée ; et
7. Récupérer les données du serveur de collaboration du CNRC pour recevoir les inventaires de véhicules légers.

À la fin de l'étape 7, les utilisateurs doivent avoir le modèle installé sur leur ordinateur. Un exemple de base de données est présenté dans la figure 10. Dans la figure, les sections grisées identifient la base de données d'arrière-plan. Le dossier « Light duty vehicles » du dossier « Processes » contient les ensembles de données de premier plan développés par le CNRC.

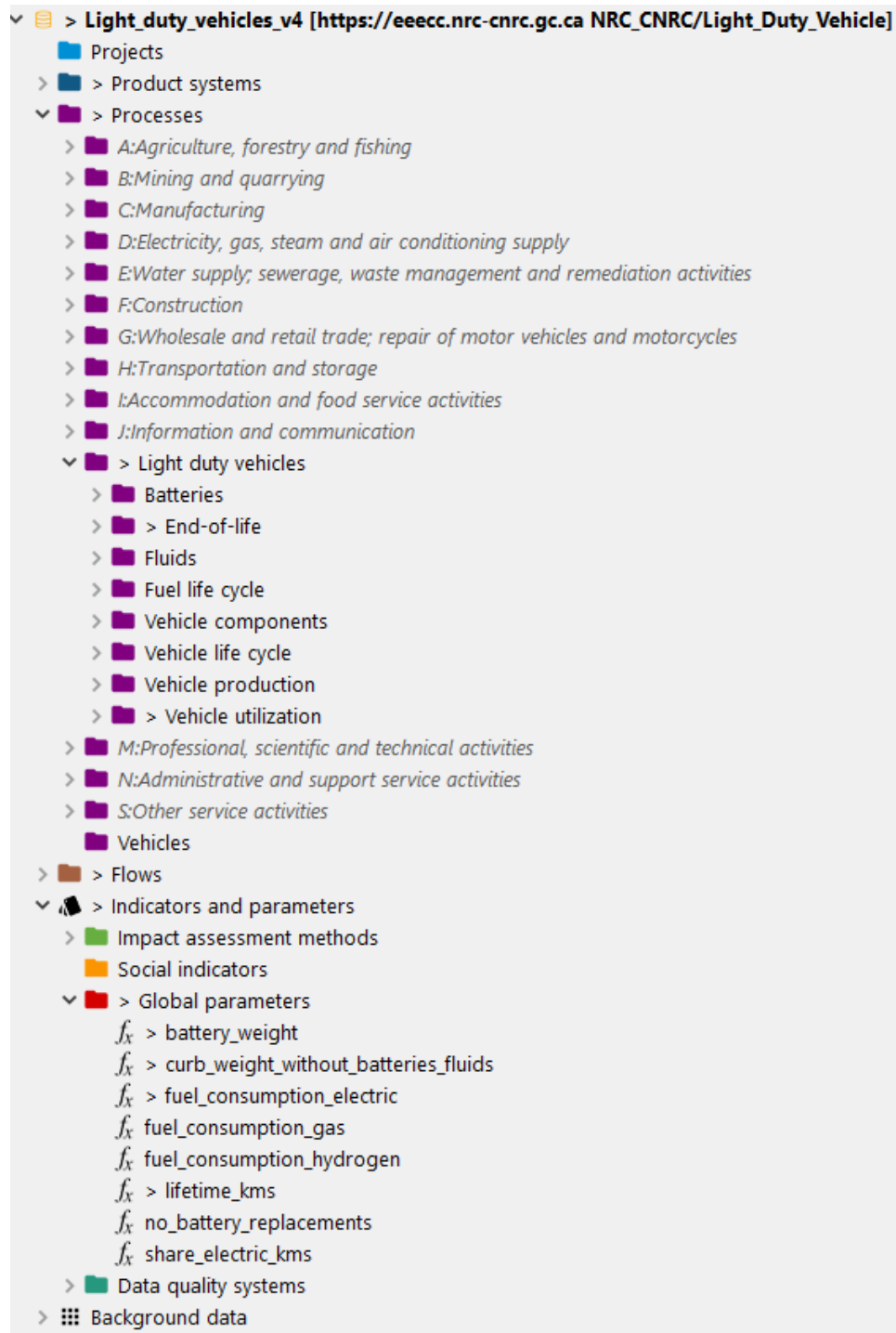


Figure 10 : Aperçu du modèle de véhicule léger du CNRC tel qu'indiqué dans la base de données openLCA

4.2 Utilisation du modèle – étapes clés impliquées

Une fois le modèle installé comme décrit à la section 4.1, il est automatiquement connecté à la base de données d'arrière-plan ecoinvent et est prêt à être utilisé pour l'évaluation de l'impact

sur les cinq types de motorisations (ICEV, HEV, PHEV, BEV et FCEV) et les trois classes de véhicules (Car, SUV et PUT). Les principales étapes de l'évaluation sont brièvement décrites ci-dessous.

1. Sélectionnez le type de motorisation et la classe de véhicule appropriés et créez un système de produits.

Les utilisateurs doivent sélectionner le type de motorisation et la classe de véhicule appropriés à partir des processus unitaires openLCA, comme le montre la Figure 11. En outre, les utilisateurs peuvent évaluer l'ensemble du cycle de vie du véhicule ou les étapes jusqu'à la production du véhicule en choisissant le processus approprié. Une fois le processus pertinent sélectionné, un système de produits doit être créé.

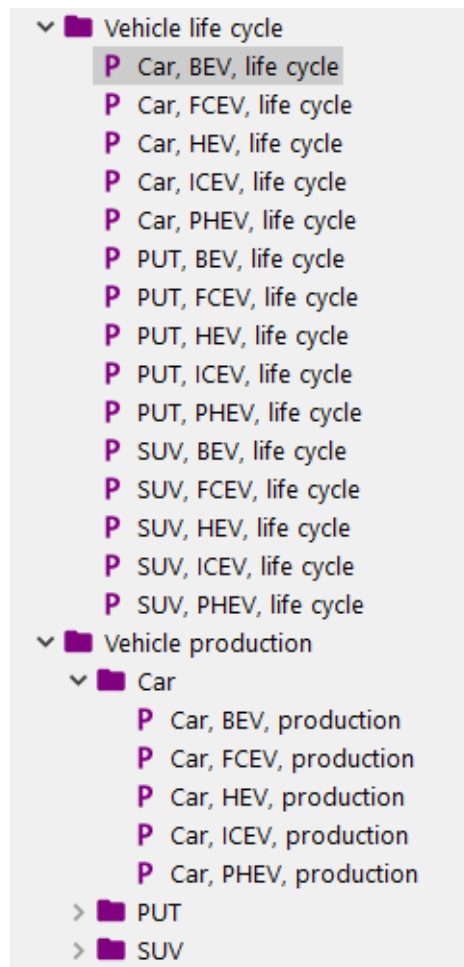


Figure 11 : Types de motorisations et classes de véhicules disponibles dans le modèle de véhicule léger du CNRC, comme indiqué dans la base de données openLCA

2. Attribuez des valeurs appropriées aux paramètres du véhicule

La liste des paramètres clés nécessaires pour définir un véhicule est fournie sous les paramètres globaux de la base de données openLCA, comme le montre la figure 12. Des explications supplémentaires sur les paramètres sont fournies dans la section 3.8.

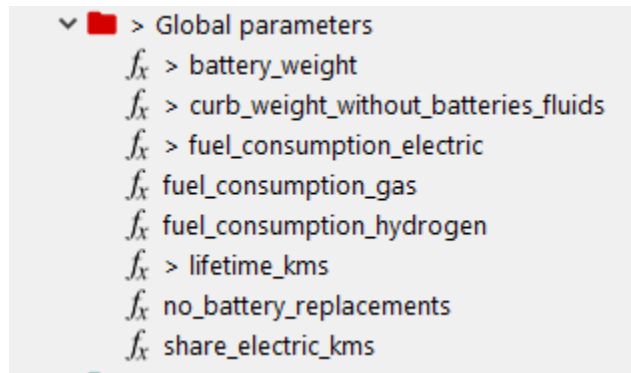


Figure 12: Paramètres globaux du modèle CNRC tels qu'indiqués dans la base de données

3. Sélectionnez les zones géographiques/sources d'approvisionnement en électricité et autres énergies appropriées pour obtenir une chaîne d'approvisionnement représentative et un traitement en amont.

Le modèle du CNRC utilise par défaut les ensembles de données de base ecoinvent mondiaux (GLO) ou Reste du monde (RoW). Si l'utilisateur dispose d'informations sur les sites de fabrication ou sur les intrants énergétiques spécifiques utilisés dans l'assemblage de véhicules ou la production de composants de véhicules, les fournisseurs (ou processus) des intrants peuvent être modifiés dans le processus unitaire approprié du CNRC, étant donné qu'ils sont disponibles dans le système ecoinvent base de données. La même procédure peut être suivie pour les matériaux, cependant, la base de données ecoinvent propose une sélection plutôt limitée en termes de processus de production de matériaux spécifiques à chaque pays.

4. Validez les connexions en amont et en aval à l'aide d'un graphique modèle du système de produit openLCA.

Avant de calculer les indicateurs d'impact environnemental, les utilisateurs doivent valider que toutes les connexions entre les différents processus unitaires de la base de données sont intactes. Cela peut être vérifié en suivant le graphique du modèle du système de produits openLCA.

5. Calculer les impacts environnementaux.

Le modèle du CNRC ne fournit pas de méthodes spécifiques d'évaluation des impacts. L'utilisateur peut soit utiliser les méthodes d'évaluation d'impact ecoinvent, soit les méthodes d'évaluation d'impact de référence openLCA qui peuvent être téléchargées gratuitement dans

openLCA nexus [27]. Il est important de noter que le modèle ACV des véhicules légers du CNRC se concentre actuellement sur les émissions de GES et les impacts des changements climatiques, et n'a pas été testé avec d'autres impacts environnementaux.

5. Licence et conditions

Les processus suivants du modèle ACV du CNRC ont été créés sur la base des données du modèle GREET. Par conséquent, la déclaration de droits d'auteur GREET [30] s'applique aux ensembles de données de processus suivants.

- Components, BEV, Car
- Components, BEV, PUT
- Components, BEV, SUV
- Components, FCEV, Car
- Components, FCEV, PUT
- Components, FCEV, SUV
- Components, HEV, Car
- Components, HEV, PUT
- Components, HEV, SUV
- Components, ICEV, Car
- Components, ICEV, PUT
- Components, ICEV, SUV
- Components, PHEV, Car
- Components, PHEV, PUT
- Components, PHEV, SUV
- Car, BEV, production
- Car, FCEV, production
- Car, HEV, production
- Car, ICEV, production
- Car, PHEV, production
- PUT, BEV, production
- PUT, FCEV, production
- PUT, HEV, production
- PUT, ICEV, production
- PUT, PHEV, production
- SUV, BEV, production
- SUV, FCEV, production
- SUV, HEV, production
- SUV, ICEV, production
- SUV, PHEV, production
- Body, Car
- Body, PUT
- Body, SUV
- Body, Car
- Body, PUT
- Body, SUV
- Lithium nickel cobalt aluminum oxide
- Nickel cobalt aluminium hydroxide

Les autres processus du modèle ACV du CNRC ont été créés à partir de données provenant de la littérature publique. Ces ensembles de données sont sous licence gouvernementale ouverte du gouvernement du Canada [31]. Toutes les utilisations, modifications et distributions des ensembles de données doivent citer ce rapport comme source.

6. Remerciements

Ce travail a été soutenu par le Programme Transports propres et écoénergétiques du Conseil national de recherches Canada (CNRC) et le Projet d'approvisionnement à faibles émissions de carbone (PAFEC) de Services publics et Approvisionnement Canada (SPAC).

7. Références

- [1] Environment and Climate Change Canada. National Inventory Report 1990-2019: Greenhouse Gas Sources and Sinks in Canada 2021.
- [2] Government of Canada. Government of Canada welcomes largest investment in Canada's auto industry with the first large-scale domestic EV battery manufacturing facility 2022.
- [3] Global News Canada. Electric vehicle battery plant coming to Windsor, Ont., to be fully operational by 2025 2022.
- [4] Held M, Schücking M. Utilization effects on battery electric vehicle life-cycle assessment: A case-driven analysis of two commercial mobility applications. *Transp Res Part D Transp Environ* 2019;75:87–105. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.08.005>.
- [5] Faria R, Marques P, Moura P, Freire F, Delgado J, De Almeida AT. Impact of the electricity mix and use profile in the life-cycle assessment of electric vehicles. *Renew Sustain Energy Rev* 2013;24:271–87. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.063>.
- [6] Onat NC, Kucukvar M, Tatari O. Conventional, hybrid, plug-in hybrid or electric vehicles? State-based comparative carbon and energy footprint analysis in the United States. *Appl Energy* 2015;150:36–49. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.001>.
- [7] Thomas CE. Fuel cell and battery electric vehicles compared. *Int J Hydrogen Energy* 2009;34:6005–20.
- [8] Ellingsen LAW. The size and range effect: Life-cycle greenhouse gas emissions of electric vehicles. *CONCAWE Rev* 2017;2017:6.
- [9] Kallitsis E, Korre A, Kelsall G, Kupfersberger M, Nie Z. Environmental life cycle assessment of the production in China of lithium-ion batteries with nickel-cobalt-manganese cathodes utilising novel electrode chemistries. *J Clean Prod* 2020;254:120067. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120067>.
- [10] Ahmadi P, Cai XM, Khanna M. Multicriterion optimal electric drive vehicle selection based on lifecycle emission and lifecycle cost. *Int J Energy Res* 2018;42:1496–510.
- [11] de Souza LLP, Lora EES, Palacio JCE, Rocha MH, Renó MLG, Venturini OJ.

- Comparative environmental life cycle assessment of conventional vehicles with different fuel options, plug-in hybrid and electric vehicles for a sustainable transportation system in Brazil. *J Clean Prod* 2018;203:444–68.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.236>.
- [12] Bohnes FA, Gregg JS, Laurent A. Environmental impacts of future urban deployment of electric vehicles: assessment framework and case study of Copenhagen for 2016–2030. *Environ Sci Technol* 2017;51:13995–4005.
- [13] Kannangara M, Bensebaa F, Vasudev M. An adaptable life cycle greenhouse gas emissions assessment framework for electric, hybrid, fuel cell and conventional vehicles: Effect of electricity mix, mileage, battery capacity and battery chemistry in the context of Canada. *J Clean Prod* 2021;317:128394.
- [14] Frischknecht R, Jungbluth N, Althaus H-J, Doka G, Dones R, Heck T, et al. The ecoinvent Database: Overview and Methodological Framework (7 pp). *Int J Life Cycle Assess* 2005;10:3–9. <https://doi.org/10.1065/lca2004.10.181.1>.
- [15] Environment and Climate Change Canada. Fuel Life Cycle Assessment Model 2020. <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/managing-pollution/fuel-life-cycle-assessment-model.html>.
- [16] Kelly JC, Winjobi O. Update of Vehicle Material Compositions in the GREET® Model. Argonne Natl Lab Energy Syst Div 2020.
- [17] Hawkins TR, Singh B, Majeau-Bettez G, Strømman AH. Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles. *J Ind Ecol* 2013;17:53–64. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00532.x>.
- [18] Ellingsen LA-W, Majeau-Bettez G, Singh B, Srivastava AK, Valøen LO, Strømman AH. Life Cycle Assessment of a Lithium-Ion Battery Vehicle Pack. *J Ind Ecol* 2013;00:n/a-n/a. <https://doi.org/10.1111/jiec.12072>.
- [19] Evangelisti S, Tagliaferri C, Brett DJL, Lettieri P. Life cycle assessment of a polymer electrolyte membrane fuel cell system for passenger vehicles. *J Clean Prod* 2017;142:4339–55. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.159>.
- [20] Majeau-Bettez G, Hawkins TR, Strømman AH. Life cycle environmental assessment of lithium-ion and nickel metal hydride batteries for plug-in hybrid and battery electric vehicles. *Environ Sci Technol* 2011;45:4548–54. <https://doi.org/10.1021/es103607c>.
- [21] Hawkins TR, Singh B, Majeau-Bettez G, Strømman AH. Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles. *J Ind Ecol* 2012;17:53–64. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00532.x>.
- [22] Benavides P, Qiang D, Kelly J, Dunn JB. Addition of nickel cobalt aluminum (NCA) cathode material to GREET2. 2016.
- [23] Burnham A. Updated vehicle specifications in the GREET vehicle-cycle model. Argonne Natl Lab 2012.
- [24] Sawyer-Beaulieu S. Gate-to-Gate Life Cycle Inventory Assessment of North American

End-of-Life Vehicle Management Processes. University of Windsor, 2009.

- [25] Dunn JB, Gaines L, Sullivan J, Wang MQ. Impact of Recycling on Cradle-to-Gate Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions of Automotive Lithium-Ion Batteries. *Environ Sci Technol* 2012;46:12704–10. <https://doi.org/10.1021/es302420z>.
- [26] Bobba S, Mathieux F, Ardente F, Blengini GA, Cusenza MA, Podias A, et al. Life Cycle Assessment of repurposed electric vehicle batteries: an adapted method based on modelling energy flows. *J Energy Storage* 2018;19:213–25. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.est.2018.07.008>.
- [27] GreenDelta. openLCA Nexus 2023. <https://nexus.openlca.org/>.
- [28] National Research Council. NRC LCA collaboration server 2023. <https://eeecc.nrc-cnrc.gc.ca/openlca/>.
- [29] Masibi P, Kannangara M. NRC open LCA collaboration server: reference manual. Volume 1. 2022.
- [30] Argonne National Laboratory. The Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Technologies (GREET®) Model copyright 2017. <https://greet.anl.gov/copyright>.
- [31] Government of Canada. Open Government Licence - Canada 2022. <https://open.canada.ca/en/open-government-licence-canada>.