

Prise en compte du vieillissement des batteries lithium-ion dans un modèle d'analyse du cycle de vie environnementale

Morgane GILLET¹, Eduardo REDONDO-IGLESIAS², Hugo HELBLING¹, Ali SARI¹

¹Université Claude Bernard Lyon 1, Ampère, UMR5005, INSA Lyon, Ecole Centrale de Lyon, CNRS, Villeurbanne, F-69100, France

²Univ Eiffel, ENTPE, LICIT-ECO7, F-69500 Bron, France

RESUME – Ce travail explore l'influence de l'intégration du vieillissement des batteries sur leurs impacts environnementaux à travers l'utilisation de la méthode d'analyse du cycle de vie (ACV) environnementale au moyen d'un outil dédié et accessible par la communauté. Dans un premier temps, une présentation de la méthodologie de l'ACV environnementale et un état de l'art contextualisant les enjeux liés à cette étude sont exposés. Ensuite, la méthodologie de modélisation et de l'estimation du vieillissement des batteries Li-ion est détaillée. La démarche pour réaliser une ACV environnementale de batterie est décrite et une quantification de l'impact du vieillissement sur les résultats d'ACV environnementale est effectuée.

Mots-clés – « Analyse du Cycle de Vie », « Batterie », « Soutenabilité », « Vieillesse », « Python », « Science Ouverte »

1. INTRODUCTION

L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) environnementale est une méthode normée qui permet de quantifier les impacts environnementaux d'un système ou d'un produit sur son cycle de vie. Ses principes et sa méthodologie d'application sont spécifiés par les normes ISO 14040 [1] et 14044 [2]. Une ACV environnementale se décompose en quatre étapes :

- Définition des objectifs, des limites de l'étude ou encore de l'unité fonctionnelle du système ;
- Réalisation d'un inventaire des flux entrants et sortants (ressources, émissions) ;
- Évaluation des impacts environnementaux ;
- Interprétation des résultats dans l'optique de mettre en place des actions de réduction des impacts environnementaux.

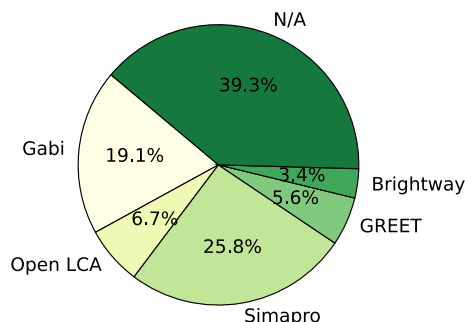


Figure 1 : Hétérogénéité des logiciels relevée dans les ACV environnementales de batteries Li-ion [3].

Il existe, dans la mise en œuvre d'ACV environnementale sur les batteries lithium-ion (Li-ion), une grande hétérogénéité dans les méthodes de calcul, les logiciels, les indicateurs, les unités fonctionnelles, les champs d'application, les données utilisées et la définition des études [3]. Le choix des logiciels s'avère hétérogène au sein de la communauté, comme le montre la figure 1. Ce choix est pourtant crucial car il peut induire une différence allant jusqu'à 20% dans les résultats finaux de l'ACV environnementale [4]. De plus, cette hétérogénéité rend complexe la comparaison des différentes ACV environnementales entre elles et la généralisation de conclusions sur l'impact des batteries Li-ion puisqu'« on ne peut comparer les résultats de diverses analyses du cycle de vie ou de divers inventaires du cycle de vie que lorsque les hypothèses et le contexte de chaque étude sont les mêmes » [1].

Un état de l'art sur l'impact environnemental des batteries [3] a mis en évidence un manque d'intégration du vieillissement des batteries dans l'ACV environnementale malgré son impact notable [5]. Le vieillissement des batteries est pris en compte dans moins de 10% des 90 articles étudiés, et cela, sans forcément intégrer la non-linéarité du vieillissement ou les conditions d'utilisation de la batterie. Comme illustré dans la figure 2, les durées de vie sont choisies arbitrairement [6] dans la littérature.

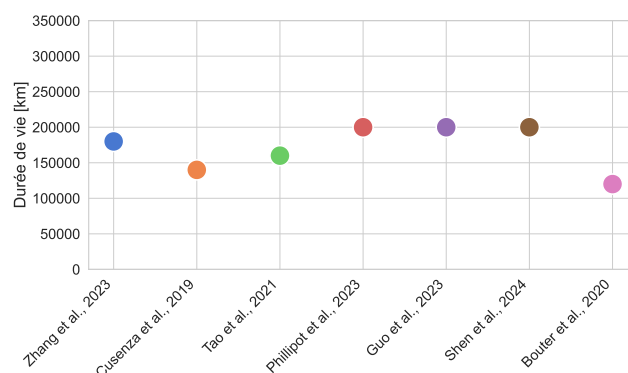


Figure 2 : Durées de vie définies dans la littérature dans les ACV environnementales de batterie pour véhicules électriques [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14].

Les articles cités dans la figure 2 ne définissent pas les conditions d'utilisation (températures extérieure et cycle

d'utilisation) ce qui ne permet pas de prendre en compte l'impact de l'utilisation de la batterie sur les résultats des ACV environnementales [7]. La durée de vie de la batterie est estimée arbitrairement. La littérature propose le plus souvent une durée de vie de 10 ans avec 200 000km parcourus soit 20 000km/an. Or, si la batterie dure 15 ans dans certaines conditions d'utilisation, son impact sera lissé sur l'ensemble de sa durée de vie et sera donc moins important.

Ainsi, la littérature modélise la phase d'utilisation de la batterie de façon arbitraire. C'est pour cette raison que cet article propose de coupler la phase d'utilisation de l'ACV environnementale à un modèle de batterie afin d'obtenir une durée de vie réaliste en fonction des conditions d'utilisation définies.

2. MODELISATION D'UNE BATTERIE LITHIUM-ION

Les travaux présentés dans cet article proposent, dans un premier temps, de modéliser le comportement d'une batterie au cours de sa vie et en fonction de ses conditions d'utilisation. Pour ce faire, les travaux de modélisation du projet VEHLIB [8] ont été utilisés comme base.

Le modèle de batterie implémenté dans VEHLIB a été modélisé en Python, afin de rendre le projet plus accessible, plus libre et de le coupler au modèle d'ACV environnementale. Le modèle de batterie utilisé est un modèle en circuit électrique équivalent. Il intègre le vieillissement grâce à un modèle [9], [10] associant les effets du cyclage et du calendrier en se calibrant sur des données obtenues à l'aide d'essais de vieillissement.

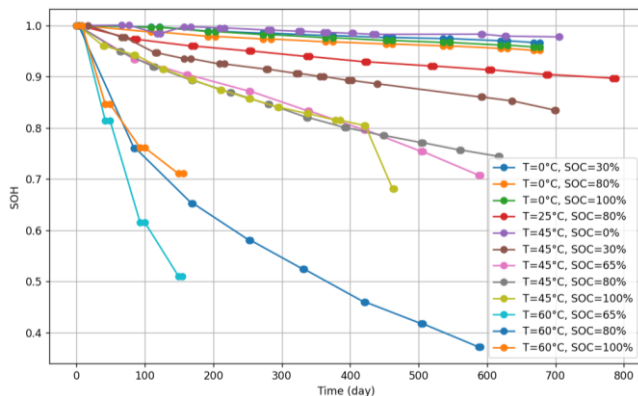


Figure 3 : Données de vieillissement calendaire utilisées dans BANANES.

Dans le but d'automatiser l'identification des coefficients quantifiant l'évolution du vieillissement, un module Python a été créé. Ce projet, nommé BANANES (Battery AgeiNg ANalysis and EStimation), permet d'extraire les résultats expérimentaux de State of Health (SoH) de batteries vieilles dans diverses conditions en cyclage et en calendrier. La figure 3 présente des données d'évolution de SoH d'une cellule Nickel Manganèse Cobalt (NMC). Le vieillissement calendaire y est présenté pour différents State of Charge (SoC) et températures. Une fois ces résultats extraits, l'algorithme permet d'identifier les coefficients qui modélisent le vieillissement d'une batterie en s'appuyant sur des données réelles. Le module BANANES sera ouvert et partagé.

Pour finir, le modèle électrique utilisé dans ce travail est un modèle simple sans dynamique (OCV + R) qui permet d'obtenir le SoC et le courant. Le modèle thermique est un modèle 0D. Cette température va venir impacter le vieillissement. En ce qui concerne le vieillissement, le modèle prend en compte la non-linéarité de la dégradation de la batterie au cours de sa vie.

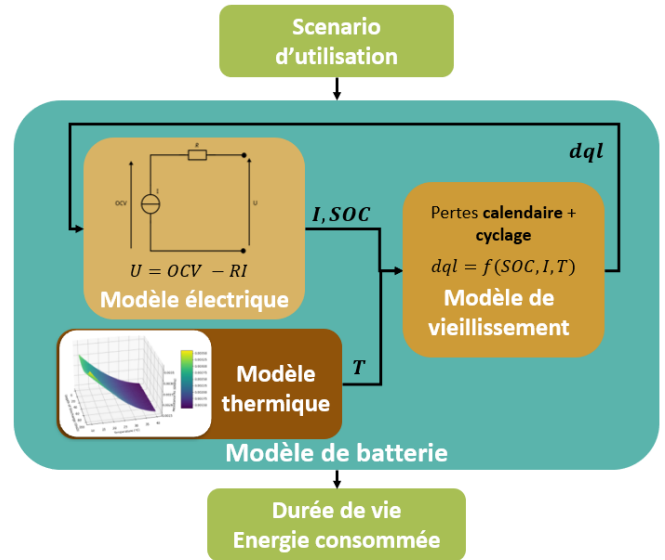


Figure 4 : Fonctionnement du modèle de batterie.

En conclusion, ce modèle de batterie permet d'obtenir la durée de vie de la batterie ainsi que la quantité d'énergie nécessaire pour l'alimenter en fonction d'un scénario d'utilisation (charge, décharge et conditions extérieures), figure 4.

3. LIEN ENTRE LE MODELE DE BATTERIE ET L'ACV ENVIRONNEMENTALE

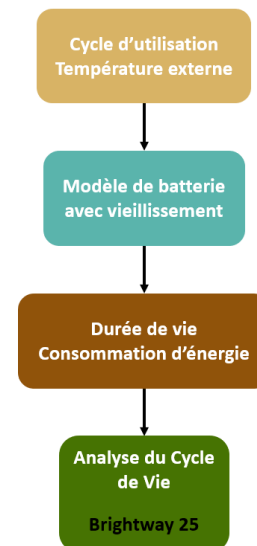


Figure 5 : Intégration du modèle de batterie dans l'ACV-E.

Le modèle d'ACV environnementale utilisé dans ces travaux s'appuie sur la base de données Ecoinvent v3.11 [11]. Cette base de données permet d'obtenir une nomenclature produit incluant des données récentes et ouvertes sur les batteries Li-ion [12]. En couplant cette base de données avec l'outil Brightway25 [13], et en sélectionnant une méthode de calcul, il est possible d'obtenir les impacts environnementaux d'une batterie Li-ion pour l'extraction, la fabrication, le transport et le recyclage de celle-ci.

Conformément à la norme ISO 14044 [2] « exigeant une transparence totale » (garantissant l'interprétabilité des résultats), tous les travaux présentés seront effectués en Python et sur

Brightway [14], logiciel libre d'ACV environnementale en Python. Les codes ainsi développés seront distribués sous une licence libre et à disposition de la communauté.

Ces travaux visent à implémenter au mieux la phase d'utilisation d'une batterie dans l'ACV environnementale grâce aux données obtenues dans le modèle défini précédemment, comme illustré figure 5. La consommation d'énergie de la batterie ainsi que la ville d'utilisation permettent de calculer l'impact environnemental dû à la recharge de la batterie. Enfin, la durée de vie influence la répartition temporelle des impacts. Plus une batterie vit longtemps, plus ses impacts environnementaux diminuent annuellement.

Les objectifs de l'étude sont la modélisation d'une batterie NMC532 de 62 kWh. Afin de correspondre au facteur le plus répandu dans la littérature [15], la fin de vie de la batterie dans le véhicule électrique a été définie comme une perte de capacité supérieure à 20% de la capacité initiale. Le scénario considéré pour notre véhicule est le parcours de 20 000 km/an, calibré sur un cycle WLTC. Le même cycle et kilométrage ont été utilisés pour les cinq villes d'étude. Cela ne reflète pas les différences de mobilités entre les villes, mais permet de faire une comparaison des résultats d'ACV environnementale en fonction du vieillissement de la batterie. Ce cycle a été étudié et permet de prendre en compte le vieillissement en se rapprochant de la réalité [16]. Les limites de l'étude sont la prise en compte de toutes les phases de vie de la batterie, autrement appelée étude « cradle to grave ».

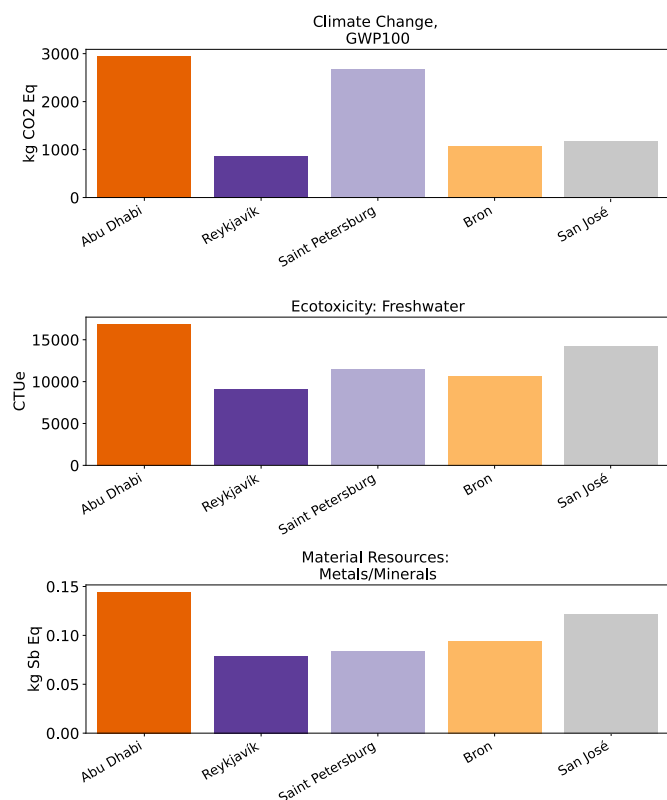


Figure 6 : Comparaison des résultats obtenus pour l'ACV environnementale de différents indicateurs de EF3.1 pour une batterie utilisée dans différentes villes avec notre unité fonctionnelle.

Afin de réaliser cette ACV environnementale, la méthode EF 3.1 a été utilisée, comme recommandé par l'Union Européenne [17]. L'unité fonctionnelle sélectionnée est : « **stocker et fournir l'énergie à la voiture pour réaliser un scénario donné, pendant un an** ».

Pour réaliser l'inventaire des flux entrants et sortants (ressources, émissions), la base de données Ecoinvent 3.11 cut-off a été utilisée. Celle-ci se base sur les données open-source les plus récentes de la littérature, publiées par le laboratoire Argonne [12].

La majorité des résultats présentés ici sont ceux pour l'indicateur « Climate change », aussi nommé GWP100 (Global Warming Potential sur 100 ans) en kg CO2 équivalent. Cet indicateur est le plus utilisé dans la littérature [3]. Les indicateurs « Ecotoxicity : freshwater, comparative toxic unit for ecosystems (CTUe) » en CTUe et « Material Resources : metals/minerals, abiotic depletion potential (ADP) : elements (ultimate reserves) » en kg Sb équivalent ont également été utilisés.

La figure 6 expose les résultats pour les trois indicateurs ci-dessus en fonction la ville d'étude. Chaque ville présente des résultats d'ACV environnementale différents pour notre unité fonctionnelle, impacts quantifiés pour toute la vie de la batterie. Ces comparaisons ont été effectuées pour l'utilisation de la même batterie, sur le même cycle dans plusieurs villes différentes. Les villes choisies sont chaudes (Abu Dhabi, San José) ou froides (Saint Petersburg, Reykjavik) avec des mix électriques plus ou moins décarbonés dans chaque pays et une ville en France pour faire une comparaison locale (Bron). Il est important de quantifier ces différents indicateurs puisqu'ils mettent en lumière le fait qu'une ville qui semble avoir moins d'impact GWP100 peut avoir un impact sur la toxicité dans l'eau plus important que les autres villes (par exemple San José).

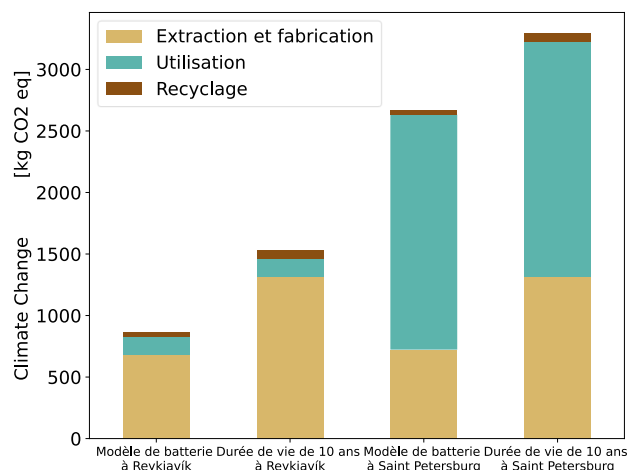


Figure 7 : Comparaison de l'impact de la phase d'utilisation entre l'ACV environnementale couplée au modèle de batterie et pour une durée de vie fixée à 10 ans pour la ville de Reykjavik et Saint Petersburg par année.

La figure 7 présente les résultats obtenus pour l'ACV environnementale de la même batterie pour une utilisation similaire dans des pays différents. Les résultats sont séparés pour chaque phase de vie de la batterie. Le scénario d'utilisation se déroule à Reykjavik ou à Saint Petersburg.

Ville d'utilisation de la batterie	« Climate Change » + modèle batterie [kgCO2-Eq]	« Climate Change » + 10 ans [kgCO2-Eq]	Différence relative « Climate Change »	Température (min et max)	Mix électrique [kgCO2-Eq]	Durée de vie calculée dans le modèle de batterie
Abu Dhabi (Emirats Arabes Unis)	2 944	3 011	2,2%	25°C à 40°C	0,591	10 ans 6 mois
San José (Costa Rica)	1 169	1 441	18,9%	20°C à 27°C	0,0179	12 ans 5 mois
Bron (France)	1 073	1 605	33,2%	-5°C à 40°C	0,0775	16 ans 3 mois
Saint Petersburg (Russie)	2 672	3 300	19%	-7°C à 21°C	0,696	18 ans 3 mois
Reykjavík (Islande)	862	1 534	43,8%	-7°C à 15°C	0,0518	19 ans 4 mois

Tableau 1 : Comparaison des impacts entre notre ACV environnementale pour une batterie utilisée pendant 10 ans et 200 000km et notre modèle d'ACV environnementale couplé avec un modèle de batterie pour un an.

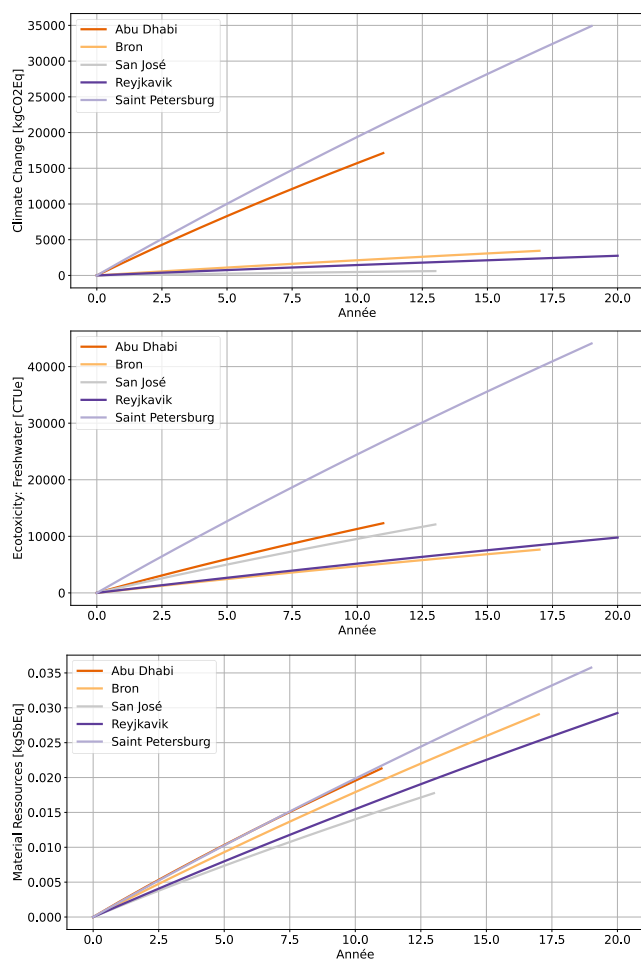


Figure 8 : Evolution du « Climate Change », « Ecotoxicity » et « Material Ressources » pour la phase d'utilisation uniquement selon la ville d'utilisation en fonction du temps.

Les résultats sont présentés pour l'ACV environnementale couplés avec un modèle de batterie ou pour le scénario de la littérature. La durée de vie fixée à 10 ans est le scénario le plus courant dans la littérature et permet de quantifier les effets de l'utilisation d'un modèle de batterie sur les résultats d'ACV environnementale. Le recyclage est modélisé en utilisant les données d'Ecoinvent. Cette phase prend en compte la collecte et l'acheminement des éléments vers le site de traitement ou la moitié des batteries est considérée comme traitée par hydrométallurgie et l'autre moitié par pyrométallurgie. La figure montre que l'impact total, pour l'unité fonctionnelle choisie, est divisé par deux entre une utilisation à Saint Petersburg et Reykjavik. Ensuite, l'impact de la décarbonation du mix électrique sur l'impact total de l'ACV environnementale est notable. Les batteries utilisées à Saint Petersburg et Reykjavik ont une durée de vie similaire. L'utilisation dans un pays ayant un mix électrique plus ou moins décarboné a un impact majeur sur les résultats globaux de l'ACV environnementale. L'impact de la phase d'utilisation contribue à 15% de l'impact total de la batterie pour Reykjavik, mais cet impact peut aller jusqu'à deux tiers de l'impact global pour Saint Petersburg, par exemple. Cette figure met également en lumière la différence importante que crée l'utilisation des scénarios de la littérature par rapport à l'utilisation d'un modèle de batterie.

Ces résultats se retrouvent aussi dans le tableau 1 qui présente une comparaison entre les résultats d'ACV environnementale couplée avec notre modèle de batterie et l'ACV environnementale dont la durée de vie est fixée à 10 ans avec 200 000 km parcourus.

Comme affiché dans le tableau 1, la ville d'utilisation (et donc sa température) a une grande influence sur les résultats de l'ACV environnementale. Une différence de plus de 40% dans un cas de ville froide avec un mix décarboné (Reykjavik) est notée. En effet, la batterie aura une plus grande durée de vie dans ces conditions. Étant donné que l'unité fonctionnelle est quantifiée par année, plus la batterie vit longtemps, plus ses impacts sont répartis et donc diminuent annuellement.

Ainsi, les résultats de l'ACV environnementale couplée avec un modèle de batterie soulignent l'importance de prendre en compte les conditions d'utilisation de la batterie pour avoir des résultats au plus proche de la réalité. La figure 8 illustre l'évolution des indicateurs « GWP100 », « ecotoxicité » et « matériel ressources » pour plusieurs villes avec des mix électriques différents pour la phase d'utilisation uniquement. Il est possible de noter qu'une ville d'utilisation peut avoir des résultats positifs pour un indicateur, mais pas pour les autres. Par exemple, l'impact écotoxique de l'utilisation à Bron est le plus faible tandis que son impact de changement climatique est au milieu des autres. Tous ces résultats sont dus à la composition du mix électrique. En effet, le mix électrique russe est composé de gaz à 50%, de nucléaire pour 19% et de charbon pour 19% [18] tandis que le mix électrique du Costa Rica est hydraulique à 73% et éolien à 13% [19].

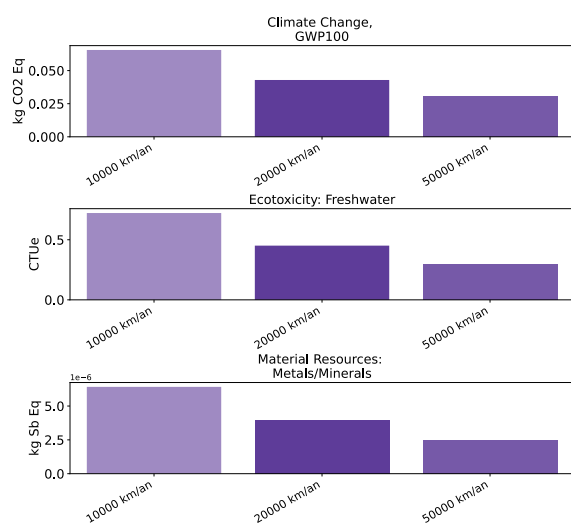


Figure 9 : impact de l'évolution du nombre de kilomètres parcourus par an sur les résultats d'ACV ramenés au nombre de kilomètre parcourus.

Pour finir, la figure 9 présente les résultats des différents indicateurs pour une batterie utilisée dans un véhicule électrique à Reykjavik selon différents scénarios de distance annuelle parcourue : 10 000 à 50 000 km par an. Les impacts sont présentés en fonction du service rendu par la batterie, c'est-à-dire ramené à l'impact par kilomètre. La figure permet d'observer que l'augmentation du nombre de kilomètres parcourus par an entraîne une diminution de l'impact de la batterie. La durée de vie de la batterie va diminuer (de plus de 23 ans à 12 ans) mais le nombre de kilomètres va lui passer de 236 000 km parcourus à 560 000 km total, soit une augmentation de 237 % du kilométrage, mais une diminution de la durée de vie de moins de 50 %. Ainsi, le scénario choisi aura une grande incidence sur le service rendu par la batterie.

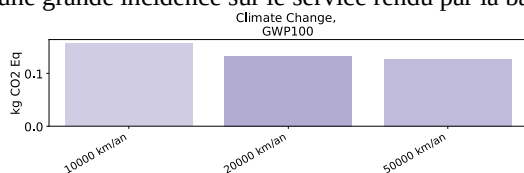


Figure 10 : Impact de l'indicateur « climate change » par kilomètre parcouru pour une batterie utilisée selon plusieurs scénarios à Saint Petersburg.

La figure 10 présente l'impact du « Climate Change » selon différents scénarios d'utilisation à Saint Petersburg. Au vu de la non-décarbonation du mix électrique, il n'y a pas de réel gain (pour cet indicateur) à utiliser le véhicule de façon beaucoup plus intensive. En effet, en augmentant le nombre de kilomètres parcourus, le nombre de kWh consommés augmente et l'utilisation du mix électrique augmente également. La durée de vie de la batterie diminue et les impacts de toutes les phases de vie entre une utilisation à 20 000 et 50 000 km par an est similaire.

Il est important de noter qu'augmenter le nombre de km par le véhicule par an conduit à une diminution de sa durée de vie. Il sera donc probable que l'utilisateur souhaite investir dans une nouvelle batterie, ce qui aura un impact majeur sur tous les indicateurs environnementaux. Cette diminution de l'impact en fonction du nombre de kilomètres parcourus met plutôt en lumière les bénéfices de l'autopartage qui réduit aussi le nombre de batteries en circulation et donc la production de batterie globale.

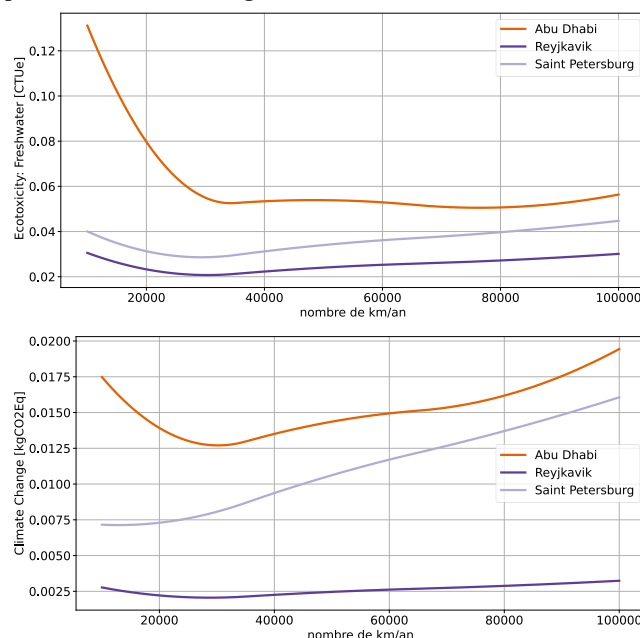


Figure 11 : impact de l'évolution du nombre de kilomètres parcourus par an sur les résultats d'ACV ramenés au kilomètre par an

Pour finir, la figure 11 présente l'évolution des impacts par kilomètre par en fonction du scénario choisi. Cette figure met en évidence qu'il existe un optimum du nombre de kilomètres parcouru par an pour maximiser la durée de vie de la batterie tout en augmentant au plus le nombre de kilomètres parcourus. Ces courbes soulignent le fait que ces optimums dépendent du lieu d'utilisation (et de sa température), de la composition du mix électrique et des indicateurs choisis.

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Pour conclure, cet article souligne le besoin de définir le lieu et les conditions d'utilisation pour estimer la durée de vie et l'énergie consommée avant d'effectuer une ACV environnementale. En effet, les résultats de l'ACV environnementale dépendent de la durée de vie de la batterie qui va varier selon les conditions d'utilisation. Ils dépendent

également du mix électrique de la phase d'utilisation (ainsi que de celui utilisé pour l'extraction, la fabrication et le recyclage, effet qui n'a pas été quantifié ici) car chaque mix électrique a un impact environnemental différents en fonction des moyens utilisés pour produire l'énergie du pays.

Dans un premier temps, les comportements liés à la mobilité ont ici été modélisés selon un cycle WLTC avec 20 000km parcourus par an. Or, ces conditions d'utilisation peuvent être très différentes selon la ville ou le pays choisis. Une utilisation d'un véhicule en Russie sera très différente d'une utilisation au Costa Rica ou en Islande en termes de cycle ainsi que de kilomètres parcourus. Des travaux supplémentaires pourrait être effectués pour étudier l'influence des habitudes de déplacement sur les durées de vies de la batterie et les résultats d'analyse de cycle de vie.

L'étude d'ACV environnementale effectuée dans cet article devrait être étendue à d'autres technologies de batteries telles que le LFP et la NMC811 qui seront les technologies le plus utilisées dans les années à venir selon les prévisions fournies dans [15]. Il serait aussi intéressant de prendre en compte et d'intégrer la seconde vie. Concernant le recyclage, l'approche cut-off utilisée ici ne prend pas en compte les bénéfices du recyclage. Celui-ci pourrait être modélisé en retirant les matières recyclées de la phase d'extraction.

L'analyse précédente présente uniquement les résultats des impacts environnementaux or, il est nécessaire de s'intéresser par ailleurs aux impacts sociaux des batteries Li-ion. L'analyse sociale du cycle de vie est définie par le cadre de la norme ISO 14075 [21]. Concernant les points critiques de la vie de la batterie, l'exemple de la mine de Kolwezi peut être cité. Elle est située en République Démocratique du Congo et produit environ trois quarts du cobalt utilisé dans le monde. Il a été estimé en 2017 que 40 000 enfants travaillent dans ces mines [22]. Elles sont détenues par une entreprise chinoise dont l'installation a entraîné une « flambée de violations » [22] dont l'exploitation de mineurs, le non-respect du code minier ou encore les tirs sur toute personne qui tente de s'introduire dans la mine. Dans cette province, deux tiers des habitants vivent sous le seuil de pauvreté et tentent donc au péril de leur vie d'accéder à la mine afin de tenter de revendre quelques ressources.

Pour finir, la littérature traite uniquement de l'influence relative des différentes technologies de batteries, mais il semble intéressant d'examiner la soutenabilité absolue des batteries Li-ion. Nous pourrions nous demander si la production et l'utilisation des batteries Li-ion peuvent être compatibles avec le respect des limites planétaires [23] et la raréfaction des ressources en fonction des applications.

5. REMERCIEMENTS

Ce travail utilise des données qui ont été collectées dans le cadre du programme collaboratif français MOBICUS. Les auteurs remercient tous les membres du programme MOBICUS. Les 12 partenaires impliqués dans MOBICUS sont : Renault (Leader), Valeo, EDF, Siemens, Enedis, Controlsys, DBT-CEV, IFPEN, CEA, Université Gustave Eiffel (ex-IFSTTAR), IMS-Bordeaux et EIGSI-La Rochelle. Les partenaires invités sont : PSA-Peugeot-Citroën, SAFT, UTC-Compiègne et La Poste.

6. REFERENCES

- [1] AFNOR, « NF EN ISO 14040 : Management environnemental, Analyse du cycle de vie », oct. 2006.
- [2] 14:00-17:00, « ISO 14044:2006 », ISO. Consulté le: 18 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.iso.org/fr/standard/38498.html>
- [3] M. Gillet, H. Helbling, et A. Sari, « Etat de l'art sur la soutenabilité forte des batteries lithium-ion dans le cadre de la mobilité électrique », in *Journées couplées du GDR SEEDS et de la conférence JCGE - Jeunes Chercheurs en Génie Electrique*, 44490 Le Croisic, France: GDR SEEDS, juin 2024. Consulté le: 17 janvier 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://hal.science/hal-04828335>
- [4] R. Speck, S. Selke, R. Auras, et J. Fitzsimmons, « Life Cycle Assessment Software: Selection Can Impact Results », *J. Ind. Ecol.*, vol. 20, n° 1, p. 18-28, 2016, doi: 10.1111/jiec.12245.
- [5] T.-D. Patil, E. Vinot, S. Ehrenberger, R. Trigui, et E. Redondo-Iglesias, « Sensitivity Analysis of Battery Aging for Model-Based PHEV Use Scenarios », *Energies*, vol. 16, n° 4, p. 1749, févr. 2023, doi: 10.3390/en16041749.
- [6] T. Lavis, R. Panariello, F. Perdu, et P. Zwolinski, « Integrating an ageing model within Life Cycle Assessment to evaluate the environmental impacts of electric batteries », *Procedia CIRP*, vol. 116, p. 251-256, 2023, doi: 10.1016/j.procir.2023.02.043.
- [7] S. Su, W. Li, J. Mou, A. Garg, L. Gao, et J. Liu, « A Hybrid Battery Equivalent Circuit Model, Deep Learning, and Transfer Learning for Battery State Monitoring », *IEEE Trans. Transp. Electrification*, vol. 9, n° 1, p. 1113-1127, mars 2023, doi: 10.1109/TTE.2022.3204843.
- [8] B. Jeanneret, B. Kabalan, E. Redondo, R. Trigui, E. Vinot, « Vehlib », GitLab. Consulté le: 10 janvier 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://gitlab.univ-eiffel.fr/eco7/vehlib>
- [9] E. Redondo-Iglesias, P. Venet, et S. Pelissier, « Eyring acceleration model for predicting calendar ageing of lithium-ion batteries », *J. Energy Storage*, vol. 13, p. 176-183, oct. 2017, doi: 10.1016/j.est.2017.06.009.
- [10] A. Houbbadi, E. Redondo-Iglesias, S. Pelissier, R. Trigui, et T. Bouton, « Smart charging of electric bus fleet minimizing battery degradation at extreme temperature conditions », in *2021 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, oct. 2021, p. 1-6, doi: 10.1109/VPPC53923.2021.9699367.
- [11] « Database », ecoinvent. Consulté le: 20 janvier 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://ecoinvent.org/database/>
- [12] O. Winjobi, Q. Dai, et J. C. Kelly, « Update of Bill-of-Materials and Cathode Chemistry addition for Lithium-ion Batteries in GREET 2020 », *brightway-lca/brightway25*. (7 avril 2025). Jupyter Notebook. Brightway LCA Software Framework. Consulté le: 13 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://github.com/brightway-lca/brightway25>
- [14] « Brightway LCA Software Framework — Brightway documentation ». Consulté le: 20 janvier 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://docs.brightway.dev/en/latest/>
- [15] A. Nuhic, T. Terzimehic, T. Soczka-Guth, M. Buchholz, et K. Dietmayer, « Health diagnosis and remaining useful life prognostics of lithium-ion batteries using data-driven methods », *J. Power Sources*, vol. 239, p. 680-688, oct. 2013, doi: 10.1016/j.jpowsour.2012.11.146.
- [16] M. Ben-Marzouk, S. Pelissier, G. Clerc, A. Sari, et P. Venet, « Generation of a Real-Life Battery Usage Pattern for Electrical Vehicle Application and Aging Comparison With the WLTC Profile », *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 70, n° 6, p. 5618-5627, juin 2021, doi: 10.1109/TVT.2021.3077671.
- [17] « New EU regulatory framework for batteries: Setting sustainability requirements | Think Tank | European Parliament ». Consulté le: 12 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI\(2021\)689337](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI(2021)689337)
- [18] « Stratégie énergétique de la Russie : Politique, réglementation et objectifs futurs pour 2035 ». Consulté le: 14 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.enerdata.fr/publications/breves-energie/strategie-energetique-russe.html>
- [19] « Comprendre les énergies bas-carbone en Costa Rica avec les données | Low-Carbon Power ». Consulté le: 14 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: https://lowcarbonpower.org/fr/region/Costa_Rica
- [20] H. E. Melin, « Analysis of the climate impact of lithium-ion batteries and how to measure it ».
- [21] « ISO 14075:2024 », ISO. Consulté le: 30 avril 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.iso.org/fr/standard/61118.html>
- [22] « République démocratique du Congo : les petits forçats du cobalt », Amnesty France. Consulté le: 30 avril 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.amnesty.fr/actualites/republique-democratique-du-congo-enfants-cobalt-face-cachee-de-nos-batteries>
- [23] « Planetary boundaries ». Consulté le: 22 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.stockholmresilience.org/research/planetary-boundaries.html>