

Eco-conception des batteries de véhicules électriques appliquée aux usages du futur

GUILLAUME Baptiste^{1,2}, HODENCQ Sacha², DELINCHANT Benoit², BUI VAN Anh-Linh¹,

¹Univ. Grenoble Alpes, CEA, LITEN, DEHT, 38000 Grenoble, France,

²Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G2Elab, 38000 Grenoble, France

RESUME -Au vu du besoin croissant de batteries lithium-ion dans la mobilité électrique, il est important de questionner leur impact environnemental, en prenant en compte toutes les phases du cycle de vie (production, utilisation et fin de vie). La phase de production est la plus impactante et dépend fortement du dimensionnement de la batterie, directement lié à son usage. Néanmoins, à ce jour, les études prennent peu ou pas en compte les usages et, quand cela est fait, les usages considérés ne sont pas représentatifs. L'une des raisons principales est la complexité à réaliser une étude intégrant des critères sociétaux, environnementaux et techniques. Cet article présente une méthode innovante de prise en compte des usages et de ces critères dans la phase de conception de la batterie. Nous montrons que l'évaluation selon un critère environnemental ou un critère sociétal amène à des dimensionnements optimaux différents. Nous étudions également l'influence de la chimie et de la prise en compte des trajets longue distance.

Mots-clés— *Dimensionnement, ACV, usages prospectifs, évaluation environnementale, vieillissement.*

1. INTRODUCTION

Le recours croissant aux véhicules électriques (VE) en remplacement des véhicules thermiques est considéré comme l'une des solutions clés pour tendre vers l'objectif de neutralité carbone fixé par l'Union européenne à l'horizon 2050. Toutefois, cette stratégie entraîne une utilisation accrue des batteries électriques, soulevant ainsi la question de leur impact environnemental. La production de ces dernières est très impactante, elle représente jusqu'à 60 % des impacts de la production d'un VE [1]. C'est pourquoi il est primordial de s'intéresser à leur conception. Cependant, les méthodes utilisées dans l'industrie ne relèvent que du domaine technico-économique, c'est-à-dire que les critères de conception ne sont que techniques (autonomie, durée de vie, consommation ...) et économiques (coût de la batterie). Les critères environnementaux ne sont en général pas pris en compte dans la méthode de dimensionnement.

2. ETAT DE L'ART

Dans la littérature, le domaine environnemental est pris en compte au travers de l'analyse de cycle de vie (ACV), soit la quantification des impacts environnementaux. Cependant, on peut faire une distinction entre les études réalisant un lien entre le vieillissement et l'ACV de la batterie, et les autres. De nombreuses études omettent la phase d'utilisation de la batterie et ainsi n'étudient pas le système batterie mais les étapes de fabrication et de gestion de fin de vie de la batterie [1], [2], [3]. De plus, quand cette phase d'utilisation est prise en compte, certaines études émettent une hypothèse sur la durée de vie, en

la considérant constante [4], [5]. Ceci est problématique, car cette valeur est essentielle pour le calcul du flux de référence et ainsi les impacts peuvent être réduits artificiellement [6]. Quelques études commencent à établir un réel lien entre la simulation du vieillissement avec l'ACV de la batterie [6], [7] en créant des profils de roulage proches d'un usage réel. Cependant, ces usages ne sont pas évolutifs. Les évolutions possibles des usages au travers du développement des transports en commun, du télétravail, des véhicules connectés au réseau (Vehicle-to-Grid ou V2G), etc., peuvent avoir un impact sur la durée de vie de la batterie et a fortiori sur son ACV. C'est pourquoi il est intéressant de prendre en compte des usages prospectifs dans le dimensionnement de systèmes batteries. Par ailleurs, de nos jours, les freins à l'acceptation des VE (manque d'autonomie, temps de recharge, prix, etc... [8]) peuvent être envisagés à la fois sous un angle technique (amélioration de l'autonomie, développement de la charge rapide) et sous un angle sociétal (perte de confort, « changement de la routine de l'utilisateur » [9]) en lien avec l'usage et le confort pour l'utilisateur. Par conséquent, l'évaluation des différentes solutions —qu'il s'agisse de petites ou grandes batteries par exemple— doit nécessairement intégrer des critères sociétaux, car ceux-ci influencent directement la pertinence et l'acceptabilité des solutions techniques. La Figure 1 illustre, de manière simplifiée, la différence entre les méthodes de dimensionnement d'une batterie communément mises en œuvre dans l'industrie et la littérature, et celle proposée.

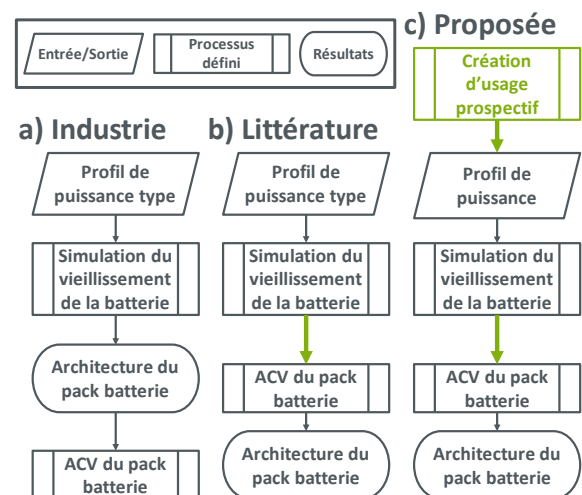


Figure 1: Schéma simplifié des méthodes de dimensionnement de batterie dans l'industrie (a), dans la littérature (b) et proposée (c).

Notre méthode se différencie par l'utilisation d'usages prospectifs tout en prenant en compte le vieillissement et par l'intégration de critères sociétaux. Elle se veut modulaire, permettant ainsi de changer/adapter chacun des blocs en fonction des spécificités de son étude. Cet article vise à expliquer cette méthode innovante de prédimensionnement de batterie.

3. METHODE

Dans cette étude il a fallu dans un premier temps définir les critères d'évaluation. Ces derniers permettront de quantifier la pertinence d'une solution (un pack batterie) par un score pour un aspect particulier. Ensuite, il faut exprimer chacun de ces critères en fonction des variables de l'étude. Pour cela, on utilise des modèles plus ou moins complexes. Si certains modèles sont simples (ex : $m_{bat} = N_{accu} \times m_{accu}$ avec m_{bat} , la masse de la batterie N_{accu} , le nombre d'accumulateurs et m_{accu} , la masse d'un accumulateur), d'autres sont plus complexes (ex : les critères environnementaux dépendent du vieillissement qui dépendent eux même de la chimie et du nombre d'accumulateurs ainsi que du système de refroidissement). En outre, il faut distinguer un paramètre, qui est une variable que l'on vient fixer pour un cas d'étude, d'une variable de conception, qui est une variable pour laquelle on cherche une valeur qui satisfait nos critères.

3.1. Construction des usages.

La Figure 2 représente un schéma de la méthode proposée et utilisée pour cette étude.

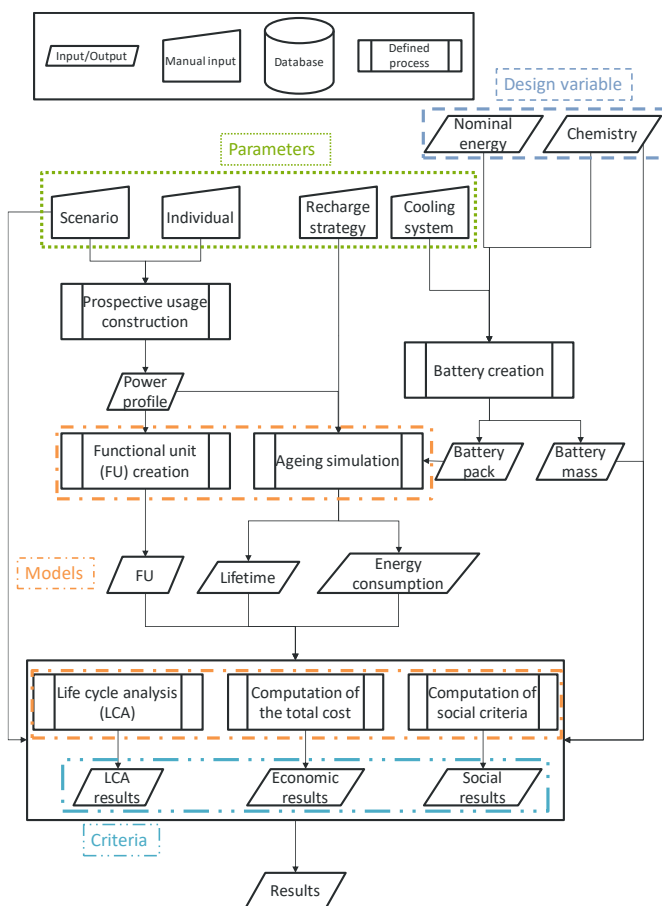


Figure 2 : Schéma de la méthode générale d'écoconception prenant en compte les usages.

Dans le but de dimensionner la batterie au plus près du besoin, des usages représentatifs de l'utilisation d'un VE – et a fortiori de la batterie – sont nécessaires. Pour cela nous créons une

méthode pour produire des profils de mobilité, paramétrables et évolutifs. Ce sont des agrégats de phases mobiles (trajets) et de phases stationnaires. Le but étant d'étudier l'impact des évolutions des usages sur le dimensionnement de la batterie. Ce processus permet de créer une base de données qui comporte — à l'heure actuelle — 10 profils de mobilité prospectifs (à horizon 2050) pour différents jeux de paramètres : 5 scénarios ; 2 types de mobilité ; 1 acteur. Un scénario correspond à un futur possible du monde, où les paramètres (techniques, économiques, sociétaux, etc.) ayant une influence sur le dimensionnement de la batterie évolueront dans le temps. Les scénarios utilisés sont les 4 scénarios créés par l'ADEME (Transition(s) 2050) [10] pour atteindre la neutralité carbone à horizon 2050, ainsi qu'un scénario tendanciel. Les évolutions des paramètres comme les distances annuelles parcourues, les parts modales, les vitesses moyennes etc., y sont décrites. Les types de mobilités pris en compte sont la mobilité quotidienne, comportant uniquement des trajets courtes distances (<80 km) [11] et la mobilité mixte, comprenant la mobilité quotidienne ainsi que des trajets longues distances. La mobilité quotidienne est représentée par une semaine type de mobilité courte distance que l'on répète autant de fois que nécessaire. A ce jour, un unique acteur est considéré (le français moyen) mais à terme d'autres acteurs seront pris en compte. Le lieu de résidence, la catégorie socio-professionnelle et autres, influent sur des paramètres comme le taux de télétravail, les distances parcourues, les parts modales, etc. Un usage est défini comme la combinaison d'un profil de mobilité avec une stratégie de gestion des phases stationnaires du véhicule. Cette dernière permet de gérer à la fois le moment et le type de recharge (stratégie de recharge), ainsi que le V2G.

3.2. Les familles de critères

Les 3 sous sections suivantes décrivent des différentes familles de critères ainsi que les modèles utilisés pour les quantifier.

3.2.1. Sociétal

Comme énoncé dans 1, les freins à l'acceptation des VE peuvent être envisagés sous un angle sociétal. Le prix d'achat des VE, la vitesse de recharge, l'autonomie du véhicule et l'anxiété de l'autonomie (range-anxiety ou RA [8]) font partie des principaux freins [9], [12]. La vitesse de recharge dépend de la puissance de la borne de recharge ainsi que de la capacité de la batterie. La RA dépend de plusieurs aspects qui sortent du cadre de cette étude (comme le nombre de stations de recharge ou la précision des indicateurs [8]). Cependant, elle est directement liée à la capacité de la batterie. Elle est également étroitement liée à la réticence au changement de comportement et potentiellement à une perte de confort, (i.e s'arrêter pour recharger [13]). Ainsi une métrique considérée pour différencier le confort entre 2 solutions est la part du retard sur le temps de trajet total. Le retard est induit du nombre (ou du temps) de pauses forcées, définies comme les pauses nécessaires pour terminer le trajet. Actuellement, le nombre maximal de pauses forcées —destinées à la recharge de la batterie— est aligné sur les recommandations de la sécurité routière, qui préconisent une pause toutes les deux heures de conduite.

3.2.2. Economique

Comme vu précédemment, le prix d'achat constitue un frein majeur à l'adoption des VE. Or, une part significative de ce coût est liée à la batterie, qui représente environ 40 % du coût total du véhicule [14]. À son tour, le coût de la batterie dépend en grande partie des accumulateurs, ceux-ci représentant plus de 60 % du coût de la batterie [15]. Ainsi, ce dernier est modélisé à partir du coût unitaire des accumulateurs, auquel est appliqué un facteur d'intégration représentant les coûts additionnels liés à

l'assemblage et à l'intégration dans le pack. Une valeur de 48 % —utilisée dans [15]— a été retenue. Ainsi le coût de la batterie sera : $C_{bat} = \frac{n \times C_{cell}}{0,48}$. Avec C_{cell} le coût unitaire d'un accumulateur en €, n le nombre d'accumulateurs et C_{bat} le coût total de la batterie en €.

3.2.3. Environnemental

Les impacts environnementaux sont calculés via l'ACV, régie par un cadrage méthodologique clair permettant la comparaison et la reproductibilité des résultats [16]. Ainsi, il faut définir entre autres l'objectif, les frontières de l'étude, le périmètre de l'étude et l'unité fonctionnelle (UF). Les frontières de l'étude correspondent aux phases du cycle de vie prises en compte. Dans notre cas, l'ensemble des phases sera considéré (cradle to grave). La Figure 3, représente le lien entre les variables et le critère environnemental (résultat ACV) pour chaque phase de vie.

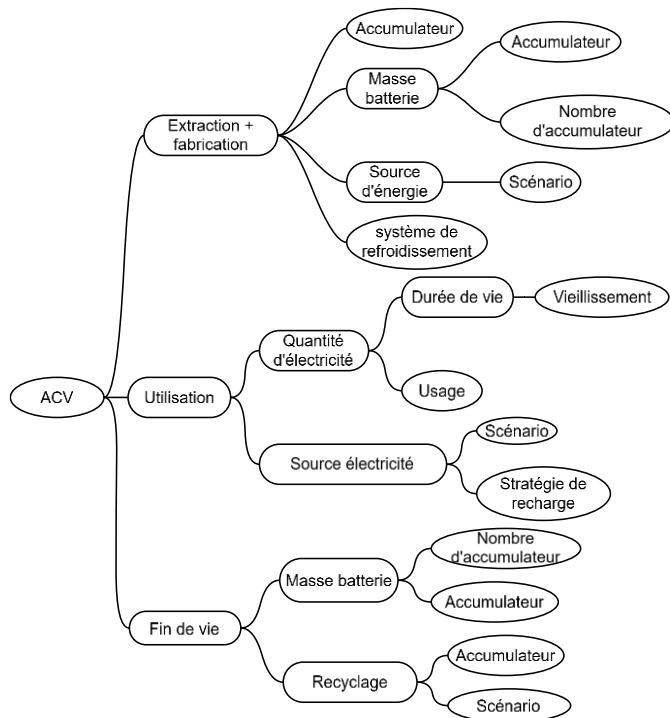


Figure 3 : Décomposition des différentes phase de vie de l'ACV d'une batterie et variables associées.

Pour les limites de l'étude, nous nous intéressons uniquement au système batterie. Il inclut : les modules (formés d'accumulateurs), l'électronique, l'enveloppe, le système de refroidissement et le système de contrôle des batteries (battery management system ou BMS). Ce sont les éléments les plus impactant lors de la production d'une batterie [17]. La production de la batterie est considérée comme effectuée en Chine, tandis que son utilisation est localisée en France. L'électricité nécessaire pour recharger la batterie lors de la phase d'utilisation est également intégrée. Le mix électrique à l'utilisation est considéré comme non évolutif. La variable « accumulateur » représente toutes les données en lien avec l'accumulateur que l'on a choisi, notamment sa chimie, sa densité massique et sa densité énergétique, etc. Les accumulateurs types choisis dépendent des bases de données. L'objectif de l'étude est d'étudier des prédimensionnements, donc les caractéristiques de base d'une batterie (capacité, masse, etc.) qui dépendent en grande partie de la chimie utilisée et du nombre d'accumulateurs dans la batterie, ces 2 éléments ayant une influence prépondérante. Selon [16] l'UF doit être définie pour répondre à un service en répondant à 5 questions : « Quoi ?

Quelle quantité ? Quelle qualité ? Pour combien de temps ? Où ? » La fonction principale de la batterie est de propulser un VE, cependant elle peut également alimenter le réseau dans une configuration V2G en fonctionnalité secondaire. Ainsi nous choisissons de procéder à une « expansion du système » [16], [18] et inclure ces 2 fonctionnalités dans l'UF : Effectuer 1 km personne et fournir 1 kWh personne, avec une pause toutes les 2 h au maximum, pendant 1 an, en France. Ainsi, le flux de référence est l'énergie nominale (kWh) de la batterie construite.

3.2.4. Modèle de batterie

La modélisation de la batterie permet de simuler son vieillissement et donc de déterminer la distance parcourue ainsi que l'énergie totale délivrée au cours de sa vie. Nous considérons que sa fin de vie est atteinte quand l'état de santé (state of health ou SoH) est inférieur à 80 % ou lorsque la qualité de service minimale est atteinte (cf. 3.2.1), dans ce cas, on pourrait parler de « fin de vie anticipée ». Cela permet de calculer les valeurs des critères environnementaux en normalisant par l'UF. Pour évaluer le vieillissement de la batterie, celui-ci est séparé en 2 types : le vieillissement calendaire (dégradation de la santé de la batterie au repos) et le vieillissement cyclique (dégradation en raison des cycles répétés de charge et de décharge de la batterie). La littérature s'accorde sur les 2 principaux facteurs qui influencent le vieillissement calendaire des accumulateurs batterie : la température et le niveau de charge (state of charge ou SoC, représentant la quantité d'énergie stockée dans la batterie) [19]. Cependant, comme l'indique [19], il est difficile d'identifier des facteurs de stress communs à toutes les chimies et formats d'accumulateurs dans le cas du vieillissement cyclique. Ceci explique la nécessité d'avoir des données spécifiques relatives à l'accumulateur et donc un modèle paramétrable, dépendant d'un accumulateur type. A noter qu'il ne faut pas confondre modèle de vieillissement et modèle de performance de la batterie. Le premier vise à calculer la perte de capacité de la batterie (et/ou l'augmentation de la résistance interne) au cours du temps, alors que le second calcule la performance de la batterie, c'est-à-dire son SoC, la tension aux bornes des accumulateurs et le courant d'utilisation. Différents types de modèles existent : des modèles physiques qui représentent les phénomènes physiques tels que l'électrochimie entre les 2 électrodes, ou des modèles empiriques ou semi-empiriques, plus simplifiés. Le choix des modèles a été guidé par plusieurs contraintes telles que les facteurs de vieillissement à prendre en compte, la volonté de créer un outil open source, la base de données en lien avec le modèle, la rapidité de calcul et la volonté de modéliser le « coude ». Ce dernier désigne le point où la capacité d'une batterie commence à chuter rapidement après une phase de dégradation lente. Cette dernière contrainte permettrait de mieux modéliser la fin de vie en fonction de l'aptitude de la batterie à remplir sa fonction prévue. Ainsi, il n'est pas obligatoire de définir une fin de vie en lien avec une valeur de SoH (en général à SoH 80 %). Aujourd'hui 2 modèles de vieillissement sont considérés dans la méthode construite : PyBaMM [20] un modèle physique, open source bénéficiant de mises à jour régulières, et le modèle développé par [6] complété de celui développé dans [21] ayant déjà été utilisé pour de l'éco-conception de batteries.

4. CAS D'ETUDE

A ce jour, nous disposons de données nous permettant de modéliser le vieillissement de 2 accumulateurs types :

1. Sony US26650FTC1 ; Lithium-Fer-Phosphate (LFP), cylindrique, 3 A.h.

2. Samsung SDI60 ; Nickel-Manganèse-Cobalt (NMC111), prismatique, 60 A.h.

Le modèle de vieillissement est celui développé dans [6] et les conditions de fin de vie sont définies par un état de santé (SoH) égal à 80 % ainsi que par l’incapacité à réaliser le trajet prévu, malgré une pause toutes les deux heures de conduite. Lors des pauses forcées, une charge rapide est effectuée (60 kW) et la recharge est limitée à SoC 80 % pour limiter le vieillissement. La puissance de recharge rapide a été dimensionnée de sorte que le courant de charge demeure inférieur à 1,7 fois le courant nominal, afin de garantir la validité du modèle de vieillissement utilisé [21]. Les recharges du quotidien, dites « normales », sont réalisées à une puissance de 11 kW. Nous étudierons 2 usages, basés sur 2 types de mobilités. La mobilité mixte (mob_m) et la mobilité quotidienne (mob_q). Pour la première, la distance parcourue par année est répartie entre de la longue distance (>80 km) et de la courte distance. Pour la seconde, la distance parcourue par année est uniquement réalisée avec des trajets de courte distance. Le Tableau 1 présente les caractéristiques de ces 2 usages.

Tableau 1 : Caractéristiques des 2 usages étudiés

Année	2015	2020	2030	2040	2050
Distance parcourue annuelle (km)	14806	14853	13060	11879	10672
Distance parcourue lors d’une semaine « type » pour l’usage mob_m (km).	216	224	194	167	149
Distance parcourue lors d’une semaine « type » pour l’usage mob_q (km).	285	286	251	228	205
Nombre de trajets longue distance par an pour l’usage mob_m	6	6	5	4	4
Distance annuelle longue distance pour l’usage mob_m (km)	2 957	3 009	2 477	2 051	1 650

Le scénario choisi pour ce cas d’étude est un scénario dit de sobriété, où la distance annuelle parcourue ainsi que le nombre de trajets longue distance diminue avec le temps. La Figure 4 illustre un jour de semaine (trajet courte distance), en 2015, pour chacun de ces usages.



Figure 4 : Exemple de profil de vitesse généré par l’outil de construction des usages, dans le cas mobilité mixte (haut) et mobilité quotidienne (bas).

La distance totale est de 32,7 km dans le cas de la mobilité mixte et est de 44 km dans le cas de la mobilité quotidienne.

5. RESULTATS

Dans cet article, nous n’étudierons que les émissions de gaz à effet de serre (GES) ainsi que l’augmentation du temps de trajet total. La Figure 5 illustre les émissions (sur l’ensemble du cycle de vie) de GES d’un pack batterie par kilomètre parcouru en fonction de son énergie nominale, pour 2 chimies (NMC en bleu, LFP en rouge). Le cas « no_evolution » illustre le cas où les usages n’évoluent pas dans le temps. Dans ce dernier cas, les caractéristiques sont celles de l’année 2015.

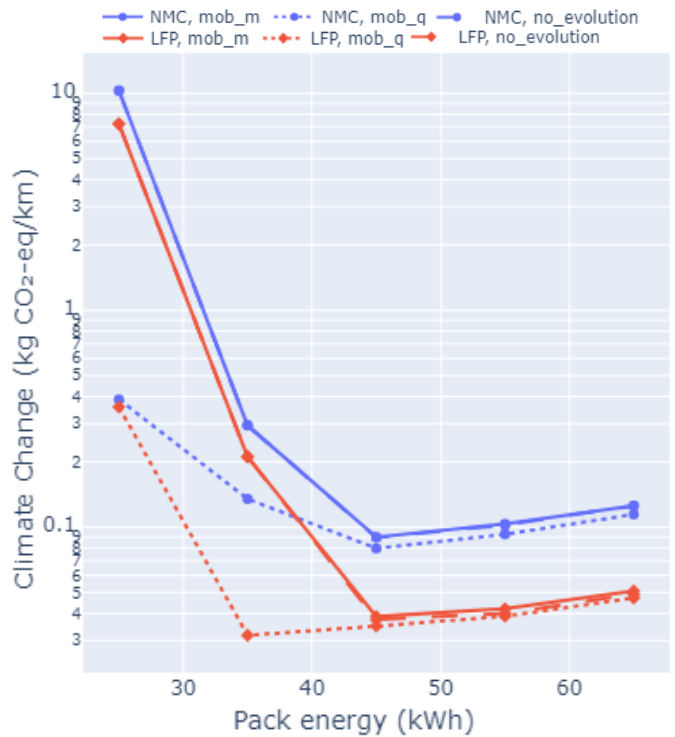


Figure 5 : Emission de GES en fonction de l’énergie nominale de la batterie et de sa chimie.

On observe sur la Figure 5 que les impacts de la mobilité quotidienne sont inférieurs à ceux de la mobilité mixte pour chaque dimensionnement étudié. Par ailleurs, chaque cas présente un optimum (minimum d’émissions de GES). Pour la mobilité quotidienne, la batterie de 35 kWh est celle qui émet le moins lorsqu’elle utilise des accumulateurs de type LFP. En revanche, pour une chimie de type NMC, c’est la batterie de 45 kWh qui présente les plus faibles émissions. Pour la mobilité mixte, l’optimum se situe à 45 kWh, pour les 2 chimies. Cela s’explique par la combinaison de 2 phénomènes. A chimie équivalente, bien que les batteries moins grosses émettent une quantité de GES moins importante, leur fin de vie anticipée (à respectivement SoH 93 % et 95 %) implique une durée de vie trop courte pour compenser leur impact.

Le Tableau 2 illustre ces phénomènes pour des batteries LFP. On observe que les émissions liées à la phase de production et à celle de fin de vie augmentent proportionnellement avec le dimensionnement. Par ailleurs, ces deux phases représentent la majeure partie des émissions totales, avec au minimum 68 % des impacts qui leur sont attribués. Celles de la production sont directement liées à la distance parcourue. De ce fait l’impact total de la batterie de 35 kWh est respectivement 1,9 fois et 2,2 fois inférieur à celui des batteries de, respectivement, 45 kWh et 55 kWh. On observe que la distance parcourue n’évolue pas de

manière proportionnelle entre les 3 batteries. La batterie de 35 kWh —qui arrive en fin de vie anticipée— parcourt environ 10 fois moins de distance que la batterie de 45 kWh et 11 fois moins que celle de 55 kWh. Ces différentes évolutions résultent en une diminution respectivement d'un facteur 5,4 et 5,0 des impacts normalisés entre la batterie de 35 kWh et celles de respectivement 45 kWh et 55 kWh. A l'inverse, même si les batteries plus grosses permettent de réaliser l'usage pendant plus longtemps (entre 4 et 6 ans de plus que celle de 45 kWh), cela ne leur permet pas de compenser leurs émissions sur leur durée de vie, ainsi leur impact augmente.

Tableau 2 : Evolution de différentes métriques pour 3 dimensionnements d'une batterie LFP.

Energie nominale (kWh)	35	45	55
Émissions à la production et en fin de vie (kg CO ₂ -eq)	6 885	8 854	10 822
Émissions à l'utilisation (kg CO ₂ -eq)	538	5 084	5 417
Émissions totales (kg CO ₂ -eq)	7424	13 939	16 240
Distance parcourue (km)	35 169	359 880	386 250
Émissions normalisées (kg CO ₂ -eq/km)	0,211	0,039	0,042

Concernant la chimie, les batteries constituées d'accumulateurs LFP sont moins émettrices que ceux de type NMC. Bien que la masse des batteries LFP soit plus importante, leur vieillissement plus lent ainsi que des impacts massiques moins importants permettent de compenser les impacts sur la durée de vie.

Enfin, dans le cas où les usages n'évoluent pas, nous obtenons des résultats égaux ou légèrement meilleurs qu'avec des usages évolutifs. Cela s'explique par la combinaison de plusieurs phénomènes. Tout d'abord, bien qu'un usage évolutif soit moins contraignant qu'un usage figé, sur la période étudiée (2015 + durée de vie) ces évolutions sont limitées. A noter que cette évolution des usages s'accroît au fil des années (cf. Tableau 1). De plus, la batterie passe moins de 8 % de sa durée de vie à réaliser des cycles (charge ou décharge). Ainsi le vieillissement calendaire est la principale cause de la dégradation de la batterie, c'est pourquoi les durées de vie sont proches. Ces phénomènes sont présentés dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Evolution de différentes métriques pour 4 cas d'étude.

Chimie et énergie nominale (kWh)	NMC 45		LFP 45	
	Oui	Non	Oui	Non
Evolution des usages				
Émissions totales (kg CO ₂ -eq)	15 010	15 034	13 939	14 473
Distance parcourue (km)	166 713	167 864	359 880	386 205
Durée de vie (année)	12,60	12,41	29,66	28,55
Émissions normalisées (kg CO ₂ -eq/km)	0,0900	0,0896	0,0387	0,0375
Émissions normalisées (kg CO ₂ -eq/années)	1 189	1 211	470	507

Ces faibles différences ont un impact limité sur la valeur des émissions normalisées. L'écart est respectivement de 0,4 % et de 3,2 %, pour respectivement la chimie NMC et LFP. Ainsi, dans ce cas, l'évolution des usages a un impact faible sur les émissions de GES, dû à l'impact significatif de la phase statique sur la durée de vie totale. Il est intéressant de noter qu'en normalisant les impacts par la durée de vie, ils diminueraient respectivement de 2 % et 7 %.

La Figure 6 illustre l'évolution de la part du retard sur le temps de trajet total au cours de leur vie, pour les différentes chimies et

les différents dimensionnements. Comme les temps de retard sont liés aux trajets longue distance, seuls les cas de la mobilité mixte avec et sans évolution des usages sont traités. De plus, on étudie uniquement les solutions ayant réalisé au minimum un trajet longue distance.

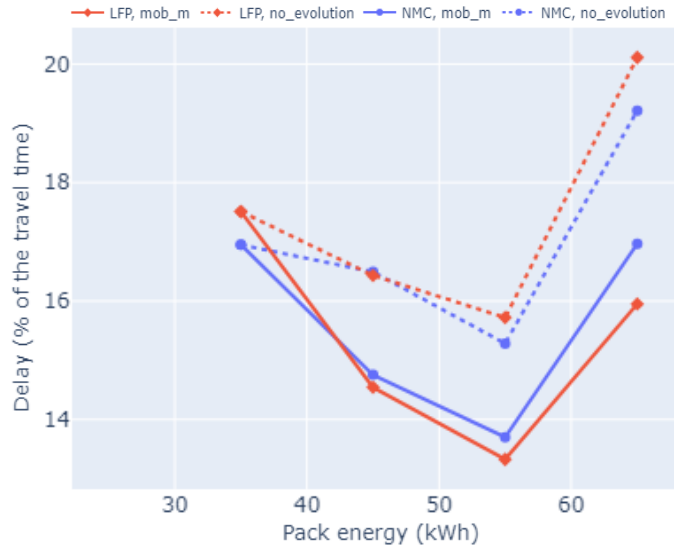


Figure 6 : Part du retard sur le temps de trajet total en fonction de l'énergie nominale de la batterie et de sa chimie.

On observe que ce ratio est minimal pour un pack batterie de 55 kWh. Pour les batteries de 35 à 55 kWh la part du temps de retard diminue car le nombre de recharges nécessaires pour réaliser les trajets longue distance diminue. Cependant, on observe que la part du retard sur le temps total du trajet passe de 14 à 17 % entre 55 et 65 kWh. Cette différence résulte du temps de recharge pour chacune des batteries. A puissance constante, la plus grosse batterie mettra plus de temps à charger et ainsi, comme leur nombre de recharges est équivalent, la métrique augmente. Pour le cas où les usages n'évoluent pas, on remarque que les parts de retard sont toujours plus conséquentes. Cette différence résulte d'une baisse de la distance annuelle parcourue pour les trajets longue distance (cf. Tableau 1) dans le cas des usages évolutifs, cette distance étant fixe dans l'autre cas. Des trajets plus courts induisent un nombre de pauses inférieur et donc une part de retard plus faible.

En combinant les informations sur le critère environnemental et le critère sociétal choisis, on observe que pour un usage donné les résultats sont différents. Pour un usage de mobilité quotidienne, le dimensionnement satisfaisant au mieux notre critère dépend de la chimie : 35 kWh pour une LFP et 45 kWh pour une NMC. Pour un usage combinant mobilité quotidienne et mobilité longue distance, les batteries composées d'accumulateurs LFP satisfont au mieux nos 2 critères de sélection. Cependant, en fonction du critère, on observe que 2 tailles de batterie ressortent comme étant optimales : 45 kWh et 55 kWh. Pour choisir une des deux solutions, un compromis entre émissions de GES et confort de l'utilisateur doit être réalisé.

6. DISCUSSIONS ET PERSPECTIVES

Nous avons utilisé 2 accumulateurs types pour étudier les différentes chimies. Cependant, on peut observer des différences sur les performances et le vieillissement des accumulateurs en fonction des fabricants, de leur géométrie, des procédés de fabrication, etc... De plus, certaines durées de vie sont supérieures à 20 ans, soit plus grandes que la durée de vie moyenne d'un véhicule particulier (20 ans [22]). Cette étude part de l'hypothèse que le VE a une durée de vie aussi grande que

celle de la batterie ou que la batterie peut être réutilisée une fois le VE arrivé en fin de vie. La stratégie de recharge utilisée consistait à recharger les batteries à puissance constante selon 2 modes : rapide (60 kW) et normale (11 kW). De plus, les recharges sont complètes jusqu'au maximum autorisé : 80 % de SoC en recharge rapide et 100 % de SoC en recharge normale. Cette stratégie a des impacts sur la durée de vie et sur la part du retard sur le temps de trajet. Cette dernière pourrait être modifiée en optimisant la recharge, afin qu'elle ne fournisse à la batterie que l'énergie nécessaire pour terminer le trajet. Le critère sociétal peut également évoluer si l'on décide de charger à une puissance proportionnelle à l'énergie nominale de la batterie plutôt qu'à puissance constante. Enfin, l'augmentation du SoC maximum (en charge rapide) permettrait de diminuer la part du temps de retard au détriment de la durée de vie. A la suite de ces travaux, plusieurs critères pourront être ajoutés comme le coût de la batterie ou une métrique en lien avec la « Range-anxiety ». De nouvelles études, utilisant d'autres scénarios ou en faisant varier des paramètres comme la puissance de charge, la stratégie de recharge seront réalisées. De plus, il serait intéressant d'élargir cette méthodologie à une population et ainsi prendre en compte des solutions innovantes avec une flotte de VE, composée de différentes batteries. Enfin, il serait intéressant d'ajouter d'autres impacts environnementaux en plus des émissions de GES (ex : la déplétion des ressources minérales et des métaux), et de coupler cette méthode avec une analyse multicritères afin de mieux gérer les compromis.

7. CONCLUSION

Dans cet article, nous proposons une nouvelle méthode de prédimensionnement de pack batterie. Elle prend en compte l'évolution de la mobilité et permet ainsi d'étudier différents usages ainsi que leurs évolutions selon plusieurs critères. L'impact de l'intégration de ces évolutions s'avère non négligeable sur l'aspect sociétal et illustre la part prépondérante du vieillissement calendaire sur les émissions de GES. L'aspect sociétal, au travers du confort de l'utilisateur a également été introduit. En utilisant un cas simple, prenant en compte un critère environnemental et un critère sociétal, notre méthode illustre et quantifie les compromis de plusieurs solutions sur différents aspects et met ainsi en évidence l'intérêt de considérer différents types de critères dans une méthode de prédimensionnement de batterie de VE.

8. REFERENCES

- [1] A. Temporelli, M. L. Carvalho, et P. Girardi, « Life Cycle Assessment of Electric Vehicle Batteries: An Overview of Recent Literature », *Energies*, vol. 13, n° 11, p. 2864, juin 2020, doi: 10.3390/en13112864.
- [2] Q. Dai, J. C. Kelly, L. Gaines, et M. Wang, « Life Cycle Analysis of Lithium-Ion Batteries for Automotive Applications », *Batteries*, vol. 5, n° 2, p. 48, juin 2019, doi: 10.3390/batteries5020048.
- [3] F. Degen et M. Schütte, « Life cycle assessment of the energy consumption and GHG emissions of state-of-the-art automotive battery cell production », *Journal of Cleaner Production*, vol. 330, p. 129798, janv. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129798.
- [4] Y. Yang *et al.*, « Life Cycle Prediction Assessment of Battery Electrical Vehicles with Special Focus on Different Lithium-Ion Power Batteries in China », *Energies*, vol. 15, n° 15, p. 5321, juill. 2022, doi: 10.3390/en15155321.
- [5] S. Bawankar *et al.*, « Environmental impact assessment of lithium ion battery employing cradle to grave », *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 60, p. 103530, déc. 2023, doi: 10.1016/j.seta.2023.103530.
- [6] T. Lavis, « Ecoconception appliquée aux systèmes batteries, une approche par intégration de modèles à l'ACV », Université Grenoble Alpes, Grenoble, 2024.
- [7] T. D. Patil, E. Vinot, R. Trigui, S. Ehrenberger, et E. Queheille, « Sensitivity analysis study of the life cycle assessment of a PHEV considering battery aging », 2024.
- [8] G. Rainieri, C. Buizza, et A. Ghilardi, « The psychological, human factors and socio-technical contribution: A systematic review towards range anxiety of battery electric vehicles' drivers », *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, vol. 99, p. 52-70, nov. 2023, doi: 10.1016/j.trf.2023.10.001.
- [9] A. C. Ruoso et J. L. D. Ribeiro, « An assessment of barriers and solutions for the deployment of electric vehicles in the Brazilian market », *Transport Policy*, vol. 127, p. 218-229, oct. 2022, doi: 10.1016/j.tranpol.2022.09.004.
- [10] ADEME, « Transition(s) 2050 ». 2021.
- [11] A. Bigo, « Les transports face au défi de la transition énergétique. Explorations entre passé et avenir, technologie et sobriété, accélération et ralentissement. », 2020.
- [12] F. Javadnejad, M. Jahanbakh, C. A. Pinto, et A. Saeidi, « Analyzing incentives and barriers to electric vehicle adoption in the United States », *Environ Syst Decis*, vol. 44, n° 3, p. 575-606, sept. 2024, doi: 10.1007/s10669-023-09958-3.
- [13] L. Noel, G. Zarazua de Rubens, B. K. Sovacool, et J. Kester, « Fear and loathing of electric vehicles: The reactionary rhetoric of range anxiety », *Energy Research & Social Science*, vol. 48, p. 96-107, févr. 2019, doi: 10.1016/j.erss.2018.10.001.
- [14] G. Zubi, R. Dufo-López, M. Carvalho, et G. Pasaoglu, « The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 89, p. 292-308, juin 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.03.002.
- [15] M. Wentker, M. Greenwood, et J. Leker, « A Bottom-Up Approach to Lithium-Ion Battery Cost Modeling with a Focus on Cathode Active Materials », *Energies*, vol. 12, n° 3, p. 504, févr. 2019, doi: 10.3390/en12030504.
- [16] M. Z. Hauschild, R. K. Rosenbaum, et S. I. Olsen, Éd., *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*. Cham: Springer International Publishing, 2018. doi: 10.1007/978-3-319-56475-3.
- [17] 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.
- [18] D. L. Schrijvers, « Developing a systematic framework for consistent allocation in LCA », *Int J Life Cycle Assess*, 2016.
- [19] J. Nájera Álvarez, « Study and Analysis of the Behavior of LFP and NMC Electric Vehicle Batteries concerning their Ageing and their Integration into the Power Grid », PhD Thesis, Universidad Politécnica de Madrid, 2020. doi: 10.20868/UPM.thesis.66547.
- [20] V. Sulzer, S. G. Marquis, R. Timms, M. Robinson, et S. J. Chapman, « Python Battery Mathematical Modelling (PyBaMM) », *JORS*, vol. 9, n° 1, p. 14, juin 2021, doi: 10.5334/jors.309.
- [21] M. Schimpe, M. E. von Kuepach, M. Naumann, H. C. Hesse, K. Smith, et A. Jossen, « Comprehensive Modeling of Temperature-Dependent Degradation Mechanisms in Lithium Iron Phosphate Batteries », *J. Electrochem. Soc.*, vol. 165, n° 2, p. A181-A193, janv. 2018, doi: 10.1149/2.1181714jes.
- [22] LECOINTRE Eric *et al.*, « Véhicules : données 2022 », ADEME, 9791029723469, avr. 2025.