

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. M. OULHADJ - Bouira
Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département de Génie des Procédés



Mémoire

Présenté par

CHERARAK Nabil
SADAOUI Mohamed Redha

Pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière: Génie de l'environnement
Spécialité : Science et Génie de l'environnement

**Analyse de cycle de vie (ACV) des véhicules
électriques- Une voie pour prendre en compte les
facteurs d'influence**

Déposé le 29 /12 / 2020

Devant le jury composé de :

Mr. LOUNICI. H	PROFESSEUR	UAMOB	Examineur
Mr. HARITI. M	MAB	UAMOB	Examineur
Mr. KERNANI. R	MCB	UAMOB	Encadreur

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

À mes chers parents

À ma femme

À mes frères

Soyez honoré par ce travail et que dieu vous garde.

Nabil

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

À mes parents

*En signe d'amour, de reconnaissance et de gratitude pour tous
les soutiens et les sacrifices dont ils ont fait preuve à mon égard;*

Mohamed Redha

Remerciement

Nous remercions Dieu, le tout puissant de nous avoir donné force et patience, pour mener à terme ce modeste travail.

Nous tenons à remercier Mr. KERNANI Redha, notre encadreur, pour son aide, sa patience, ses conseils et pour sa disponibilité, surtout ses judicieux conseils, qui ont contribués à alimenter notre réflexion et à enrichir nos connaissances.

Nous tenons à témoigner ici notre respectueuse reconnaissance à Mr. LOUNICI H. Professeur à l'université de Bouira, pour l'intérêt qu'il a porté à notre travail, en acceptant d'examiner ce travail. Il nous est agréable de remercier profondément Mr. HARITI M., MAB à l'université de Boumerdès, de nous avoir fait l'honneur de juger ce travail. Qu'ils soient assurés de notre profonde reconnaissance.

Nous remerciment s'adressent aussi à tous ceux qui nous ont encouragé.

Table des matières

Liste des tableaux	iii
Table des figures	iv
Introduction	1
1 Introduction à l'Analyse de Cycle de Vie (ACV)	5
1.1 Bref historique de l'ACV	6
1.2 Analyse de cycle de vie; définition	7
1.3 Développement durable et ACV	7
1.4 Les étapes de l'ACV	9
1.4.1 Définition de l'objectif et du champ de l'étude	10
1.4.1.1 La fonction du système.	11
1.4.1.2 L'unité fonctionnelle et flux de référence.	11
1.4.1.3 Les limites du système.	12
1.4.2 Analyse d'inventaire (LCI)	15
1.4.2.1 Collecte de données.	16
1.4.2.2 Application des critères d'allocation.	17
1.4.2.3 Base de données d'inventaire de cycle de vie.	17
1.4.2.4 Calcul des charges environnementales.	17
1.4.3 Analyse d'impacts	21
1.4.3.1 Phases d'analyse d'impacts.	22

1.4.3.2	catégories d'impact.	23
1.4.3.3	Caractérisation.	24
1.4.3.4	Cadre méthodologique de base.	25
1.4.3.5	Méthodes d'analyse de l'impact environnemental.	28
1.4.4	Interprétation	30
2	Introduction aux véhicules électriques	32
2.1	Historique	33
2.2	Les différentes configuration des véhicules électrique	33
2.3	Le véhicule électrique	34
2.3.1	Composants et fonctionnement des véhicules électriques	35
2.3.2	Fonctionnement	35
2.3.3	Moteur électrique	37
2.3.4	Batterie	37
2.3.5	Consommation d'énergie des véhicules électriques en phase d'utilisation	38
2.3.6	Impacts du déploiement des véhicules électriques	40
2.3.6.1	Impact économique.	40
2.3.6.2	Impact sur le réseau électrique.	41
2.3.6.3	Impacts environnementaux des véhicules électriques	42
3	Cycle de vie des véhicules électriques	45
3.1	Etat de l'art de l'ACV des véhicules électriques	46
3.2	Lignes directrices pour l'ACV des véhicules électrique	49
3.2.1	Cadre méthodologique de la définition de l'objectif et la détermination de l'unité fonctionnelle	49
3.2.2	Cadre de modélisation de l'inventaire du cycle de vie	53
3.3	Etudes ACV sur les véhicules électrique	56
4	Conclusion	61
	Références	62

Liste des tableaux

1.1	Différents types de sources de données [20]	17
1.2	Catégories d'impact et indicateurs possibles	25
1.3	Catégories intermédiaires et substances de référence utilisées dans Impact 2002+	28
1.4	Catégories intermédiaires et substances de référence utilisées dans Impact 2002+	29

Table des figures

1	Émissions anthropiques de gaz à effet de serre par secteur en 2010 [données de l'AIE (2012)]	2
1.1	Méthodes conceptuellement liées dans la gestion de l'environnement.[38]	6
1.2	Un diagramme typique du cycle de vie du produit [35].	8
1.3	Lien possible entre l'ACV et le développement durable dans la perspective du triple résultat.[35].	9
1.4	Lien possible entre l'ACV et le développement durable dans la perspective du triple résultat.[35].	10
1.5	Exemple d'un procédé unitaire dans un système (selon ISO 14 041) [30]	12
1.6	Étapes du cycle de vie du produit. [29]	14
1.7	Limites de l'ACV. [29]	15
1.8	CO ₂ affecté à un processus du cycle de vie d'un produit. [38]	16
1.9	Représentation d'un système de produits génériques. [38]	20
1.10	Éléments obligatoires de l'analyse d'impact selon ISO 14042 (2002).	23
1.11	Le concept d'indicateurs (ISO 14042, 2000).	24
1.12	Schéma global selon PNUE/SETAC du cadre méthodologique de l'analyse des impacts reliant les résultats de l'inventaire via les catégories d'impacts aux catégories de dommages [24].	27
1.13	Exemple de résultats LCIA de véhicules conventionnels [21]	30
1.14	Analyse simple du seuil de rentabilité d'un véhicule électrique et conventionnel [16]	31

2.1	Un véhicule électrique à batterie de 1901	34
2.2	Composants de véhicule électrique [12]	36
2.3	Moteur, Coupe transversale d'un moteur de véhicule électrique, moteurs et unité de transmission	38
2.4	Batterie	39
2.5	Fonctionnement de base d'une batterie lithium-ion	40
2.6	Émissions de GES pour différents types de production d'électricité et différents types de véhicules	44
3.1	Organigramme simplifié du cycle de vie d'un véhicule électrique	47
3.2	Étapes requises pour la production de la batterie Li-ion [7]	54
3.3	Principaux procédés impliqués dans la production de véhicules électrique	55
3.4	Principaux procédés impliqués dans la production de véhicules électrique	56
3.5	Impacts normalisés des VE et des véhicules conventionnels [40]; réchauffement climatique (GWP), acidification terrestre (TAP), formation de particules (PMFP), formation d'oxydation photochimique (POFP), toxicité humaine (HTP), écotoxicité de l'eau douce (FETP), écotoxicité terrestre (TETP), eutrophisation de l'eau douce (FEP), épuisement des ressources minérales (MDP), potentiel d'épuisement des fossiles (FDP), véhicule à moteur à combustion interne (ICEV), diesel (D), essence (G), véhicule électrique (EV), lithium fer phosphate (LiFePO 4), lithium nickel cobalt manganèse (LiNCM), charbon (C), gaz naturel (GN), mix électrique européen (Euro)	60

Introduction

Les modes de transport à notre disposition sont très importants pour le déroulement des événements de notre vie quotidienne. La disponibilité et les coûts de ces modes de transport influencent nos choix dans notre environnement privé (par ex. Shopping et loisirs) et professionnel (ex. Lieu de travail). Dans les pays plus développés en particulier, l'invention des véhicules motorisés il y a environ 130 ans a conduit à des changements radicaux non seulement dans le secteur des transports, mais aussi dans la façon dont nous façonnons nos vies. Cela a considérablement élargi notre champ d'action car la mobilité individuelle sur de longues distances est devenue disponible et abordable.

Aujourd'hui, la majorité des kilomètres parcourus, sont parcourus par des véhicules privés tandis que le reste est couvert par le bus, le tramway, le trafic ferroviaire et aérien. (International Transport Forum, 2010) [18]. Cette répartition montre l'importance et la nécessité des véhicules motorisés. Dans le même temps, le nombre de personnes vivant dans les zones urbaines a considérablement augmenté. Avec plus de la moitié de la population mondiale vivant dans les zones urbaines (55%, contre 30% en 1950), l'urbanisation détermine la répartition spatiale de la population mondiale et est l'une des quatre méga-tendances démographiques. (Nations Unies) [27]. Ce changement, associé à une population mondiale croissante, signifie qu'il existe de plus en plus de zones dans le monde avec une forte densité de population et de véhicules.

Cependant, l'invention des véhicules motorisés n'a pas seulement apporté des avantages. L'utilisation des combustibles fossiles qui en résulte a des impacts négatifs notamment sur l'environnement. Les problèmes environnementaux actuels dus au trafic sont principalement liés à l'utilisation du pétrole brut. Le pétrole brut est une ressource fossile et donc finie utilisée pour la production de diesel et d'essence. La production et la combustion de ces carburants entraînent deux défis environnementaux majeurs : l'émission de gaz à effet de serre (GES) et la pollution atmosphérique locale, en particulier dans les grandes villes.

En fait, le transport est l'une des principales causes des émissions anthropiques de GES. La figure 1 montre la contribution du secteur des transports en référence aux secteurs de l'électricité et du chauffage, de l'industrie, des résidences et autres. 22% des émissions anthropiques mondiales de GES peuvent être attribuées au transport. La majorité de ces émissions provient du transport routier tandis que le reste provient du transport maritime, de l'aviation et autres. Dans le même temps, le trafic entraîne une pollution atmosphérique importante, en particulier dans les grandes villes. Les particules, une forme de pollution de l'air, peuvent avoir des effets négatifs sur la santé humaine comme les maladies cardiovasculaires ou le cancer du poumon [25]. Les estimations suggèrent qu'en 2010, environ 3,2 millions de personnes sont décédées prématurément en raison de l'exposition aux particules [39].

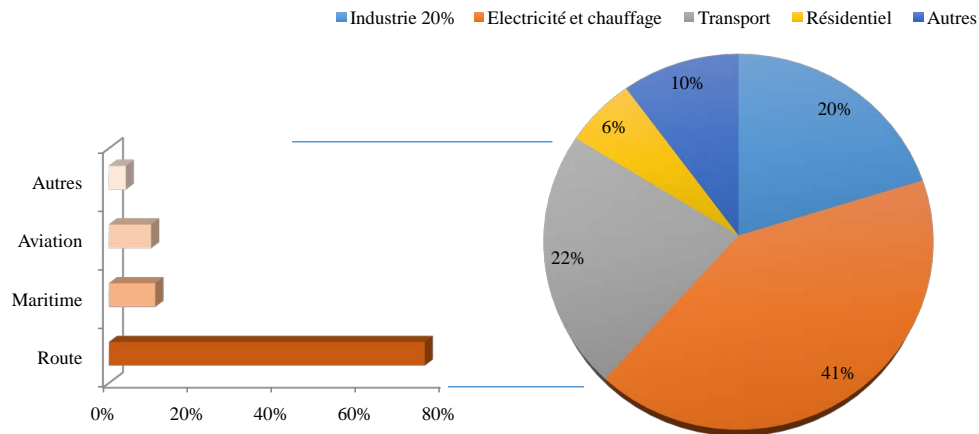


FIGURE 1: Émissions anthropiques de gaz à effet de serre par secteur en 2010 [données de l'AIE (2012)]

À l'avenir, nous pouvons nous attendre à ce que ces défis deviennent de plus en plus graves. La disponibilité des véhicules dans un pays est étroitement liée à la croissance économique du pays. Un revenu plus élevé incite les voyageurs à se tourner vers des modes de transport plus rapides et plus énergivores. Alors que les pays développés ont atteint un point proche de la saturation de la possession de véhicules, les pays émergents possèdent un fort potentiel de croissance. Par conséquent, le nombre de véhicules et leurs incidences sur l'environnement augmenteront à mesure que le PIB des pays en développement et émergents du monde comme la Chine, l'Inde et le Brésil augmentera [36].

Compte tenu de l'importance et du potentiel de croissance des véhicules motorisés ainsi que de leurs enjeux environnementaux, il devient évident qu'il est nécessaire de prendre des mesures qui réduisent l'impact environnemental de ces véhicules. Une option qui peut offrir des avantages par rapport aux véhicules conventionnels est l'introduction de véhicules électriques (VE) [36]. Les véhicules électriques résolvent le défi des émissions locales des véhicules. Ceci est particulièrement important pour les zones urbaines. En outre, les trains d'entraînement électriques composés d'un moteur électrique et d'une batterie peuvent atteindre des rendements plus élevés que le train d'entraînement des véhicules conventionnels. Un groupe motopropulseur électrique permet également l'utilisation de l'électricité provenant de sources renouvelables avec de faibles impacts environnementaux par rapport aux combustibles fossiles. La fabrication de véhicules électriques (VE) conduit potentiellement à des économies d'impacts environnementaux encore plus importantes par rapport aux solutions conventionnelles. Cependant, des aspects tels que l'utilisation de matériaux différents et des processus de production plus énergivores par rapport aux véhicules conventionnels peuvent également entraîner des impacts environnementaux plus élevés. La production des composants de la chaîne cinématique électrique - en particulier la batterie - est énergivore et utilise des assemblages qui nécessitent des processus de recyclage complexes. De même, les matériaux légers sont généralement plus énergivores que l'acier conventionnel et peuvent être moins adaptés au recyclage [40].

D'autre part, pour un véhicule donné, l'impact environnemental de la phase d'utilisation n'est pas une valeur globalement valable. Le produit des kilomètres parcourus, de l'impact environnemental de la source d'énergie par unité et de la consommation d'énergie du véhicule, détermine principalement l'impact environnemental de la phase d'utilisation. Ces paramètres sont influencés par les conditions d'utilisation. Par exemple, la consommation d'énergie pour le chauffage et le refroidissement d'un VE dépend de la température ambiante. La température ambiante dépend du type de climat ainsi que de l'heure du jour et de l'année. Le temps de conduite dépend du modèle d'utilisation [4]. Par conséquent, il est nécessaire de considérer l'ensemble de ces facteurs - pour répondre à la question de savoir si les VE sont un bon choix environnemental.

Suite à cette introduction, nous allons tenter de répondre à cette question à partir des études d'ACV publiées sur les véhicules électrique. Le document est organisé en cinq chapitre. L'introduction présente la motivation de l'analyse de cycle de vie (ACV) sur les véhicules électrique. Cette partie souligne la pertinence du transport en véhicule privé et les impacts environnementaux qui y sont liés. Les véhicules électriques sont présentés comme une solution pour atténuer ces impacts. Au Chapitre 1, les principaux composants et le fonctionnement des véhicules électriques ainsi que la composition de leur consommation d'énergie sont présentés et la question des impacts environnementaux liées à leur déploiements. Dans le chapitre 2, nous décrivons la méthode ACV - l'outil d'évaluation environnementale des produits. L'état des recherches sur le sujet est réalisé au Chap. 3. Les directives ACV des véhicules ainsi que les études ACV sur les véhicules électriques.

Chapitre 1

Introduction à l'Analyse de Cycle de Vie (ACV)

Ce chapitre décrit la méthodologie et les aspects organisationnels de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV)

Aujourd'hui et dans les années à venir, l'industrie doit jouer un rôle primordial vis-à-vis de l'environnement, non seulement comme l'une des principales sources d'impact environnemental, mais aussi comme l'un des principaux acteurs de la proposition de nouvelles solutions. La politique environnementale liée à l'industrie visait à l'origine à contrôler les émissions dans divers environnements. Il a été largement estimé que des mesures techniques correctives à l'extrémité de la conduite réduiraient suffisamment l'impact environnemental. Cependant, comme nous l'avons vu au fil des ans, cela est insuffisant pour arrêter la dégradation progressive de l'environnement et manque également de flexibilité pour une industrie en évolution. D'une part, il est nécessaire de faire un saut quantitatif dans cette approche, y compris l'expression du risque ; d'autre part, les considérations environnementales doivent être incluses dans toute la gamme de la gestion industrielle. Cela signifie que nous devons tenir compte de l'impact sur l'environnement à toutes les étapes de la production, de la commercialisation, de l'utilisation et de la fin de vie une fois la vie d'un produit terminée. La figure [38] présente un aperçu de ces méthodes conceptuellement liées à la gestion environnementale.

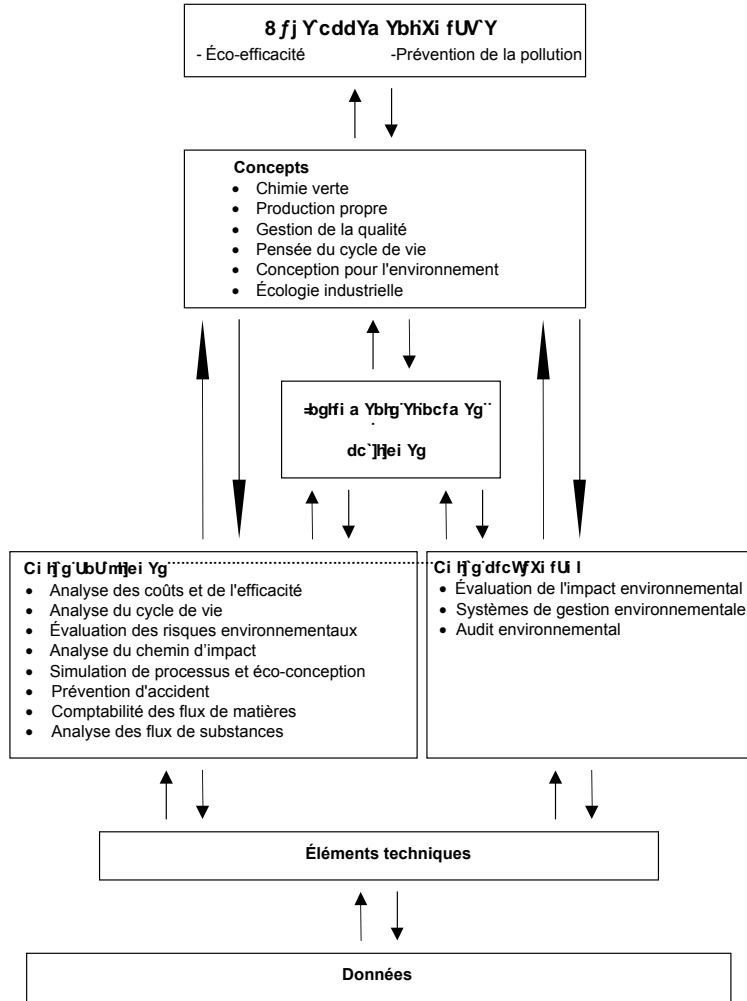


FIGURE 1.1: Méthodes conceptuellement liées dans la gestion de l'environnement.[38]

1.1 Bref historique de l'ACV

L'ACV a été proposée pour la première fois en Europe et aux États-Unis à la fin des années 60 et au début des années 70, concernant principalement les effets environnementaux des contenants de boissons. Par la suite, des applications pratiques majeures ont été apportées par les industries chimiques visant l'examen des substances toxiques et la réduction de la pollution. Plus tard, des efforts importants pour élargir l'application de l'ACV sont venus de la Société de Toxicologie et Chimie de l'Environnement (SETAC) en 1990 pour promouvoir l'ACV dans le monde et étendre la définition de l'ACV. De nos jours, l'ACV a évolué pour

devenir un outil quantitatif efficace et dominant pour mesurer les impacts environnementaux

1.2 Analyse de cycle de vie ; définition

L'analyse du cycle de vie (ACV) est une technique permettant d'évaluer les aspects environnementaux associés à un produit tout au long de son cycle de vie. Elle est aussi considérée un outil utilisé pour évaluer les impacts environnementaux associés à un produit, un service ou un système en relation à une fonction particulière en considérant toutes les étapes de son cycle de vie. Les applications les plus importantes sont :

- Analyse de la contribution des étapes du cycle de vie à la charge environnementale globale, généralement dans le but de prioriser les améliorations sur les produits ou les processus. Autrement dit, elle permet l'identification des points sur les quelles un produit peut être amélioré.
- L'application de l'ACV et les pratiques de minimisation des déchets associées par la gestion, la conception et la fabrication peuvent également conduire à des produits meilleurs et moins polluants.
- Une étude intéressante sur la manière dont l'ACV est utilisée [19] montre que les raisons les plus courantes pour l'application de l'ACV sont à des fins internes, comme l'amélioration des produits, le soutien aux choix stratégiques et l'analyse comparative.

Comme le montre la figure 1.2, le cycle de vie d'un produit peut commencer par l'extraction des matières premières des ressources naturelles du sol et par la production d'énergie. Les matériaux et l'énergie font alors partie de la production, de l'emballage, de la distribution, de l'utilisation, de la maintenance et éventuellement du recyclage, de la réutilisation, de la récupération ou de l'élimination finale. À chaque étape du cycle de vie, il est possible de réduire la consommation de ressources et d'améliorer les performances du produit [35].

1.3 Développement durable et ACV

Le lien entre l'ACV et développement durable est étroit. Une définition largement utilisée du développement durable est : un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures et la capacité des générations futures de

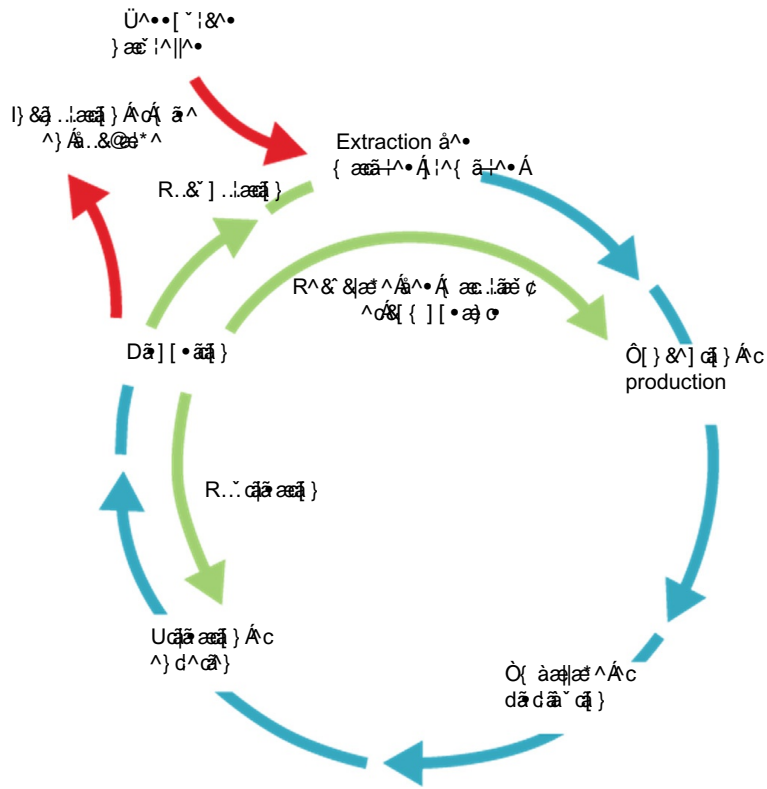


FIGURE 1.2: Un diagramme typique du cycle de vie du produit [35].

répondre à leurs besoins. Pour que le développement soit durable, il doit intégrer la gérance de l'environnement, le développement économique et le bien-être de tous. Le développement durable est le but ultime de l'application de toutes les approches du cycle de vie. D'une part, la durabilité qui suppose d'accorder une priorité absolue aux besoins essentiels de manière cohérente avec les limites environnementales, les technologies disponibles et le contexte socioculturel, d'un autre côté, l'ACV vise à considérer tous les impacts associés au cycle de vie d'un produit afin d'indiquer la priorité des interventions les plus pratiques et utiles. La figure 1.3 montre le lien possible entre l'ACV et le développement durable à travers les trois piliers de la durabilité.

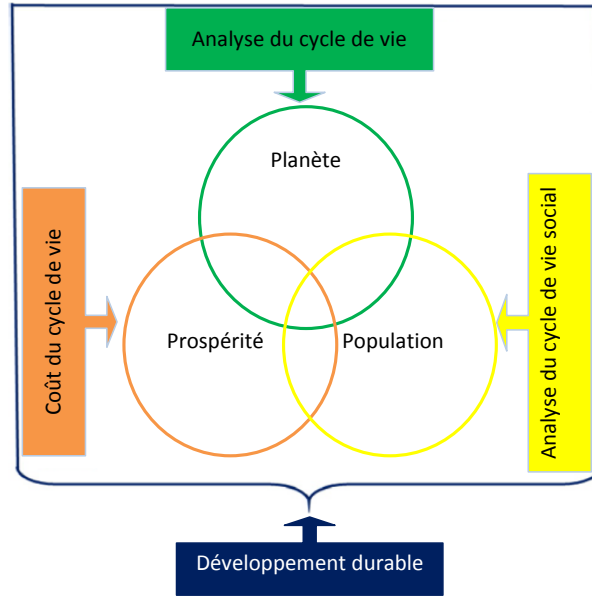


FIGURE 1.3: Lien possible entre l'ACV et le développement durable dans la perspective du triple résultat.[35].

1.4 Les étapes de l'ACV

L'ISO a normalisé le cadre technique de la méthodologie d'analyse du cycle de vie dans les années 90. Sur cette base, selon ISO 14040 (1997), l'ACV comprend les étapes suivantes (Figure 1.4)

- Définition de l'objectif et du champ de l'étude
- Analyse d'inventaire de tous les flux entrants et sortants. Cet effort de collecte de données est généralement appelé l'étape de l'inventaire du cycle de vie (LCI).
- Évaluation de l'impact, il s'agit de comprendre la pertinence environnementale de tous les flux entrants et sortants.
- Interprétation

Les étapes de l'ACV sont réparties selon des modèles ISO. Par exemple, ISO 14040 (1997) fournit le cadre général de l'ACV. L'ISO 14041 (1998) fournit des lignes directrices pour la détermination de l'objectif et de la portée d'une étude ACV et pour la réalisation d'un inventaire du cycle de vie (LCI). L'ISO 14042 (2000) traite de l'étape d'analyse d'impact sur le cycle de vie (ACVI) et l'ISO 14043 (2002) fournit des énoncés pour l'interprétation

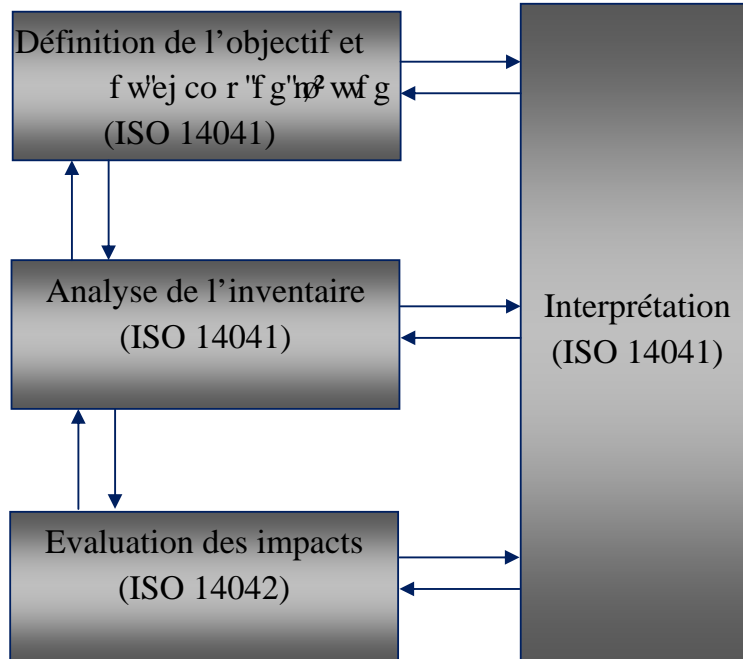


FIGURE 1.4: Lien possible entre l'ACV et le développement durable dans la perspective du triple résultat.[35].

des résultats produits par une ACV. De plus, des directives techniques illustrent comment appliquer les normes [34].

1.4.1 Définition de l'objectif et du champ de l'étude

Il est important de définir soigneusement un objectif et une portée de l'étude ACV au tout début car il a une forte influence sur les étapes ultérieures [2]. Les choix les plus importants (souvent subjectifs) sont décrits, tels que :

- La raison de l'exécution de l'ACV et les questions auxquelles il faut répondre.
- Une définition précise du produit, de son cycle de vie et de la fonction qu'il remplit.
- Dans le cas où des produits doivent être comparés, une base de comparaison est définie (unité fonctionnelle).
- Une description des limites du système.
- Hypothèses et limites.
- Les exigences relatives à la procédure d'analyse d'impact et l'interprétation ultérieure à utiliser.

- Les publics visés et la manière dont les résultats seront communiqués.
- Le type et le format du rapport requis pour l'étude.

1.4.1.1 La fonction du système. Une fois que l'objectif est défini, les produits ou les systèmes être comparés sur la base d'une fonction commune. Des scénarios, qui représentent les différentes alternatives, sont choisis pour satisfaire la même fonction. Cette fonction de système doit être clairement définie, car elle est à la base de la détermination de deux éléments essentiels de l'ACV : l'unité fonctionnelle et les frontières du système. Pour examiner chaque option de la manière la plus objective possible, la fonction doit être déterminée avant de définir l'unité fonctionnelle ou les limites du système [29, 34].

1.4.1.2 L'unité fonctionnelle et flux de référence. L'unité fonctionnelle ou la base de comparaison est une question particulièrement importante dans les comparaisons de produits. Dans de nombreux cas, on ne peut pas simplement comparer les produits A et B, car ils peuvent avoir des caractéristiques de performance différentes. Selon ISO, l'unité fonctionnelle c'est une performance quantifiée d'un système de produits, d'un service offert, destinée à être utilisée comme unité de référence dans une analyse du cycle de vie. C'est un élément de mesure qui permet de quantifier la fonction remplie par le produit étudié. La détermination de l'unité fonctionnelle offre une référence à laquelle tous les flux de l'inventaire sont rapportés [14]. Par exemple, un carton de lait ne peut être utilisé qu'une seule fois, tandis qu'une bouteille de lait consigné peut être utilisée dix fois ou plus. Si le but de l'ACV est de comparer les systèmes de conditionnement du lait, on ne peut pas comparer une brique de lait avec une bouteille. Une bien meilleure approche consiste à comparer deux modes d'emballage et de livraison de 1 000 litres de lait. Dans ce cas, on comparerait 1000 cartons de lait avec environ 100 bouteilles et 900 lavages (en supposant 9 allers-retours pour chaque bouteille) [34].

Lorsque la fonction, l'unité fonctionnelle et le flux de référence sont déterminés, le système peut être modélisé. En effet, le système peut être défini comme un ensemble d'éléments en interaction dynamique z , les éléments étant des procédés (par exemple : des procédés industriels). La démarche de modélisation consiste donc en la mise en interrelation de différents

procédés unitaires, chacun accomplissant une activité unique ou un groupe d'opérations, reliés entre eux par des flux de produits intermédiaires ou de déchets à traiter. De plus, le système échange des flux de matières et d'énergie avec l'environnement (et des flux de produits avec l'économie). Dans la modélisation, les procédés unitaires sont donc reliés à l'environnement par des flux élémentaires (et à l'économie par des flux de produits). Les flux élémentaires entrants sont typiquement l'utilisation des sols, l'extraction de matières et l'extraction d'énergie primaire. Les flux élémentaires sortants correspondent aux émissions, polluantes ou non, dans l'eau, l'air et le sol [34].

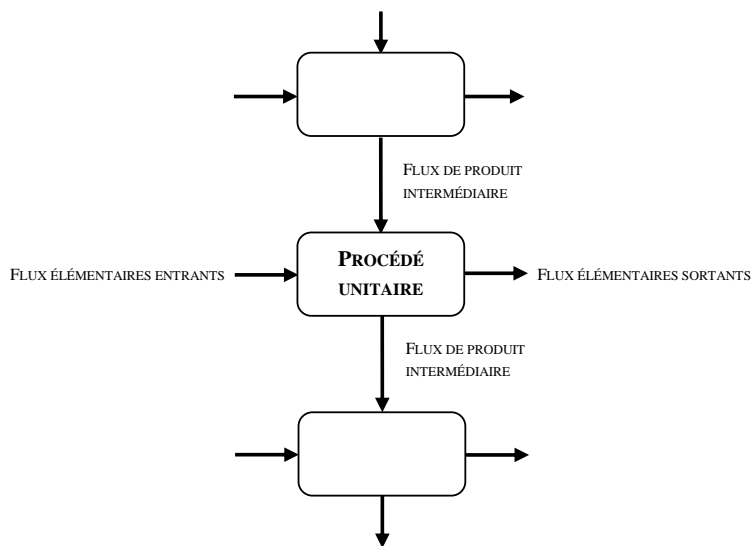


FIGURE 1.5: Exemple d'un procédé unitaire dans un système (selon ISO 14 041) [30]

Lorsque tous les procédés unitaires ont été identifiés et schématisés, on obtient un diagramme général de tous les flux échangés dans le système, appelé arbre des procédés (ú flow chart z en anglais), qui permet de visualiser les différentes alternatives ou scénarios étudiés dans l'analyse du cycle de vie.

1.4.1.3 Les limites du système. Enfin, il convient de fixer les limites du système, c'est-à-dire déterminer les modules ou procédés à considérer ou à exclure pour la modélisation et l'inventaire qui suivra. Par définition, tous les procédés nécessaires à la réalisation de la fonction doivent être pris en compte dans l'ACV, du berceau à la tombe. Idéalement, la

sélection se fait grâce à l'analyse de l'arbre des procédés et doit couvrir l'ensemble du cycle de vie : extraction des matières premières, fabrication des équipements et des infrastructures, la production du produit proprement dit, l'utilisation du produit et le traitement des déchets (réutilisation, recyclage ou élimination). Cependant, dans certains cas, un ou plusieurs procédés unitaires peuvent être exclus. Par exemple, les systèmes de produits ont tendance à être interdépendants de manière très complexe. Par exemple, dans une ACV sur des cartons de lait, des camions sont utilisés. Cependant, les camions sont également des produits avec un cycle de vie. Pour produire un camion, de l'acier est nécessaire, pour produire de l'acier, il faut du charbon, pour produire du charbon, des camions sont nécessaires, etc. Il est clair que l'on ne peut pas retracer tous les intrants et extrants vers un système de produits, et qu'il faut définir des limites autour du système. Il est également clair qu'en excluant certaines parties car elles sont en dehors des limites du système, les résultats peuvent être faussés[34].

Il est utile de dessiner un diagramme du système et d'identifier les limites de ce diagramme. Les choix importants dans ce domaine sont :

- La production et l'élimination des biens d'équipement (camions, machines de moulage par injection, etc.) seront-elles incluses? Comme dans l'analyse énergétique, on peut distinguer trois ordres :
 1. Première commande : seuls la production des matériaux et le transport sont inclus (cela est rarement utilisé en ACV).
 2. Deuxième ordre : tous les processus au cours du cycle de vie sont inclus, mais les biens d'équipement sont laissés de côté.
 3. Troisième ordre : maintenant les biens d'équipement sont inclus. Habituellement, les biens d'équipement ne sont modélisés que dans un mode de premier ordre, de sorte que seule la production des matériaux nécessaires à la production des biens d'équipement est incluse.
- Quelle est la frontière avec la nature? Par exemple, dans une ACV sur papier, il est important de décider si la croissance d'un arbre est incluse. Si c'est le cas, on peut inclure l'absorption de CO₂ et l'effet d'utilisation des terres. Dans les systèmes agricoles, il est important de décider si les zones agricoles sont considérées comme faisant partie de la nature ou comme un système de production (technosphère). Si cela est considéré

comme la nature, tous les pesticides appliqués doivent être considérés comme une émission. Si les zones agricoles sont considérées comme un système économique, on peut exclure les pesticides qui restent dans la zone, et n'inclure que les pesticides qui lessivent, s'évaporent ou qui sont accidentellement pulvérisés à l'extérieur du champ.

La définition des limites du système peut être effectuée selon les critères suivants : limites du cycle de vie, limites géographiques et limites de charge environnementale.

1. Limites du cycle de vie

Supposons que la durée du cycle de vie d'un produit se compose des étapes illustrées à la figure 1.6. Différentes limites du système peuvent être définies en fonction de l'étape du cycle de vie ; si elle est considérée comme toute la durée de vie depuis l'extraction des matières premières jusqu'à l'élimination finale, les limites seront définies comme du berceau à la tombe. Lorsque la destination d'un produit n'est pas connue, l'analyse sera arrêtée après la fabrication et les limites seront du berceau à la porte 3. D'autres études concernant la responsabilité du produit prendront en charge le produit de la fabrication à l'élimination, définissant la porte 3 à la tombe. Dans une situation de pratiques ACV matures, chaque étape du cycle de vie effectuera sa propre analyse porte-à-porte et l'ensemble du processus du berceau à la tombe sera le résultat de la composition d'un ensemble de systèmes porte-à-porte.

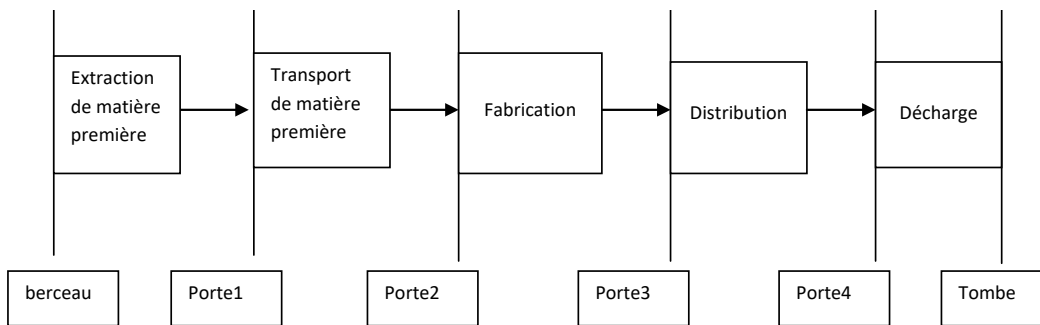


FIGURE 1.6: Étapes du cycle de vie du produit. [29]

2. Limites géographiques

Ces limites tiennent compte des limites géographiques pour établir les limites du système de produits. Ils peuvent être considérés comme des limites du cycle de vie lorsque les différentes étapes du cycle de vie sont confinées dans une région. Ces critères sont bien recommandés dans les cas d'études d'ACV spécifiques à un site.

3. Limites de charge environnementale

Les différents types de charge environnementale sont les matières premières renouvelables et non renouvelables, les émissions atmosphériques et liquides, les déchets solides, les pertes d'énergie, les rayonnements et le bruit. L'ACV peut être réalisée en considérant la liste complète des entrées et sorties (ACV complète) ou en tenant compte des émissions atmosphériques et liquides (ACV partielle). Dans la figure 1.7, l'ACV partielle 1 ne considère que les émissions atmosphériques et liquides et est réalisée du début (berceau) jusqu'à la porte 2. L'ACV partielle 2 ne prend en compte que les déchets solides et les pertes d'énergie et va de la porte 1 à la fin de vie la tombe).

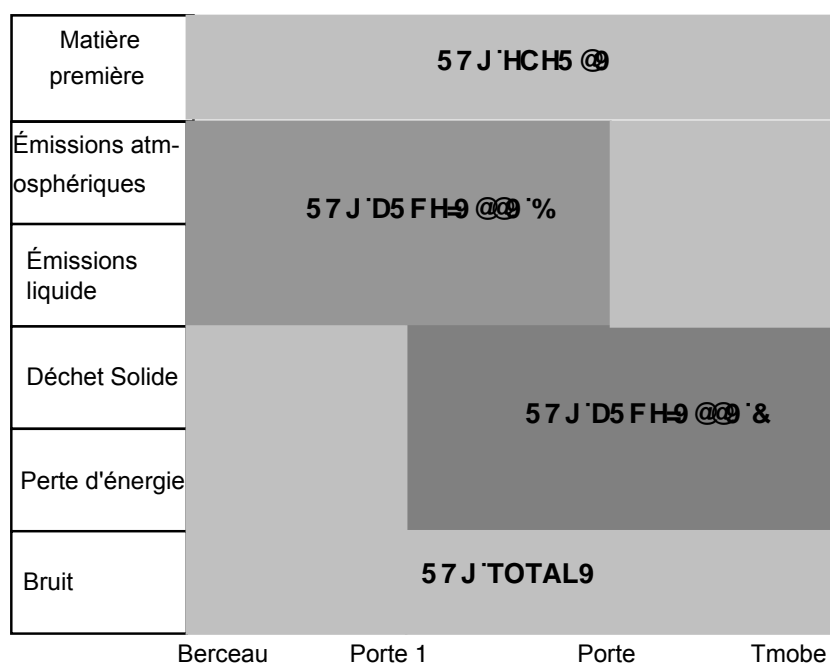


FIGURE 1.7: Limites de l'ACV. [29]

1.4.2 Analyse d'inventaire (LCI)

Dans l'ACV, l'inventaire du cycle de vie est considéré comme l'étape au cours de laquelle toutes les charges environnementales ou tous les effets environnementaux générés par un produit ou une activité au cours de son cycle de vie sont identifiés et évalués. Les charges environnementales sont définies ici comme la quantité de substances, de rayonnements, de bruits ou de vibrations émis ou retirés de l'environnement qui provoquent des effets nocifs

potentiels ou réels. Dans cette définition se trouvent : les matières premières et la consommation d'énergie, les émissions dans l'air et l'eau, la production de déchets, les radiations, le bruit, les vibrations, les odeurs, etc. - ce que l'on appelle communément la pollution de l'environnement. Les charges environnementales doivent être quantifiables [2].

Pour préparer une LCI, chaque charge environnementale (CE) générée par le procédé doit être ajoutée aux CE en raison des apports de matière et d'énergie et du résultat attribué au produit. Ainsi, l'inventaire consiste essentiellement en un bilan de charge environnemental dans lequel les CE attribuées à un produit sont la somme des CE attribuées aux intrants plus celles générées par le processus. Pour illustrer cette procédure, le CO₂ attribué au produit de la figure 1.8 est la somme du CO₂ émis par le procédé plus le CO₂ produit lors de la production des matières premières d'entrée et de la génération de l'apport d'énergie [2].

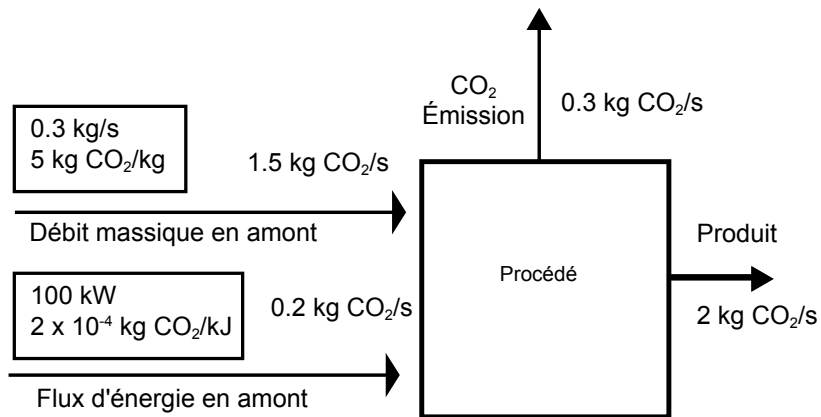


FIGURE 1.8: CO₂ affecté à un processus du cycle de vie d'un produit. [38]

Le développement d'un LCI peut être divisé en collecte de données, application de critères d'allocation et calcul des charges environnementales.

1.4.2.1 Collecte de données. La collecte de données est la tâche la plus longue dans une étude ACV ; l'établissement d'informations qualitatives et quantitatives concernant le processus et ses flux élémentaires demande beaucoup de travail. La collecte de données peut

s'appuyer sur des données provenant de différents types de sources de données, qui peuvent être divisées en quatre catégories principales, comme présenté dans le tableau 1.1.

TABLE 1.1: Différents types de sources de données [20]

Bases de données électroniques	Plusieurs bases de données fournies par des logiciels commerciaux et publics et Internet
Données de la littérature	Articles scientifiques, rapports publics et études ACV existantes
Données non déclarées	Fourni par des entreprises, des laboratoires, des autorités et des sources associées
Mesures et / ou calculs	Calculé ou estimé lorsque les données sont inexistantes ou devraient être améliorées

1.4.2.2 Application des critères d'allocation. Dans l'ACV, le terme 'allocation' signifie la répartition des charges environnementales (ou impacts environnementaux). Si l'on considère un procédé de fabrication pour un seul produit, il n'y a pas de problème d'allocation car toutes les charges environnementales doivent être attribuées à ce produit. Dans un cas très courant dans les industries, le même procédé fournit plusieurs produits, des critères d'allocation doivent donc être créés afin de répartir la charge environnementale.

1.4.2.3 Base de données d'inventaire de cycle de vie. Il existe de nombreuses bases de données d'ICV à travers le monde, l'Europe étant historiquement le continent plus actif dans ce domaine. Il existe également des bases de données élaborées par des universités ou des sociétés de consultance, certaines concernant des secteurs industriels particuliers. Ainsi, l'association PlasticsEurope publie des ACV qu'elle met périodiquement à jour et dispose d'une banque de données concernant les principales familles de plastiques. En Europe, la base de données Ecoinvent est probablement la plus reconnue et la plus complète. Elle est le fruit de la collaboration entre plusieurs institutions fédérales et instituts de recherche, rassemblés autour du projet Ecoinvent 2000, ayant pour but de combiner différentes banques de données existantes et de les enrichir www.ecoinvent.ch.

1.4.2.4 Calcul des charges environnementales. Après la collecte des données et la sélection des critères d'allocation, un modèle de calcul des charges environnementales est

mis en place pour le système de produits. Selon Castells et al. (1995) [11], dans l'analyse LCI, l'attribution des charges environnementales aux différents flux d'un processus et la réalisation du bilan correspondant sont réalisées par une méthodologie basée sur un éco-vecteur. L'éco-vecteur (v) est un opérateur mathématique multidimensionnel dans lequel chaque dimension ou élément correspond à un CE spécifique. Dans une étude d'ACV, chaque flux élémentaire est associé à un éco-vecteur avec des informations sur l'épuisement des ressources naturelles et / ou les rejets de déchets générés le long du système de produits à l'étude.

Dans ce cadre, chaque débit massique du système (kg/s) est associé à un écovecteur (v) dont les éléments sont exprimés en bases de masse spécifiques. Les unités alternatives les plus courantes sont les kilogrammes de polluant par kilogramme de produit dans le cas d'unités de masse et le *kilo.Joule par kilogramme* de produit en ce qui concerne les unités d'énergie. Les CE qui ne peuvent pas être exprimées en termes de masse ou d'énergie (par exemple, rayonnement ou intensité acoustique) sont transduites en termes d'éco-vecteur en tant que CE par unité de masse de produit (CE/kg de produit). Un aspect important de l'utilisation des éco-vecteurs pour le calcul de la charge environnementale est que chaque éco-vecteur doit être exprimé en unités qui peuvent être accumulées afin de réaliser des bilans matériels et énergétiques.

$$v_m = \begin{pmatrix} (kg/kg) \text{ or } (CE/kg) \\ \text{Matière première renouvelable} \\ \text{Matière première non renouvelable} \\ \text{Émissions atmosphériques} \\ \text{Émissions liquides} \\ \text{Déchets solides} \\ \text{Pertes d'énergie} \\ \text{Radiation} \\ \text{Bruit} \\ \text{Autres impacts environnementaux} \end{pmatrix}$$

Cette matrice montre un éco-vecteur de masse (v_m) dans lequel différents types de charges environnementales sont regroupés. Le produit de tout débit massique de procédé $M [kg/s]$ et de son éco-vecteur correspondant ($v_{m,M}$) donne le taux de polluants (P) - exprimé en kg/s généré par ce débit massique qui est illustré dans l'expression 1.1 :

$$P = M \times v_{m,M} \quad (1.1)$$

En parallèle, un éco-vecteur (v_e) est défini pour les flux d'énergie. Les éléments de (v_e), à leur tour, sont exprimés en bases énergétiques spécifiques, par exemple, *kilogrammes de polluant par kiloJoule*. Les lignes de (v_e) ont des éléments analogues par rapport à ceux de l'éco-vecteur de masse, comme présenté par la matrice ci-dessous :

$$v_e = \begin{pmatrix} (kg/kg) \text{ or } (CE/kg) \\ Matière première renouvelable \\ Matière première non renouvelable \\ Émissions atmosphériques \\ Émissions liquides \\ Déchets solides \\ Pertes d'énergie \\ Radiation \\ Bruit \\ Autres impacts environnementaux \end{pmatrix}$$

Le produit d'un flux d'énergie $E [kW]$ et de son vecteur correspondant ($v_{e,M}$) donne le flux de polluant (P_e) par rapport à un flux énergétique du système étudié. L'équation à calculer (P_e) est représentée dans l'expression 1.2 :

$$P = E \times v_e \quad (1.2)$$

L'utilisation des expressions 1.1 et 1.2 permet de traiter ensemble des charges environnementales du flux massique et énergétique, toutes deux mesurées dans les mêmes unités, une fois que les flux polluants obtenus par ces traitements sont exprimés respectivement en termes de consommation de ressources naturelles et rejet des déchets.

Dans ce cadre, chacun des intrants du système a un éco-vecteur associé et son contenu doit être distribué à la sortie du système. L'équilibre de chacun des éléments de l'éco-vecteur doit être clos. Cela signifie que la quantité totale de sortie d'un processus est égale à la quantité de polluant qui est entrée avec les entrées plus la quantité de polluant généré pendant son fonctionnement. Pour activer cet équilibre, la production est divisée en produits et en déchets.

Afin de différencier les deux classes, une convention établit que les flux de déchets ont des éco-vecteurs avec des éléments négatifs correspondant aux polluants qu'ils contiennent. La charge environnementale des flux d'intrants et de déchets doit être répartie entre les produits du procédé.

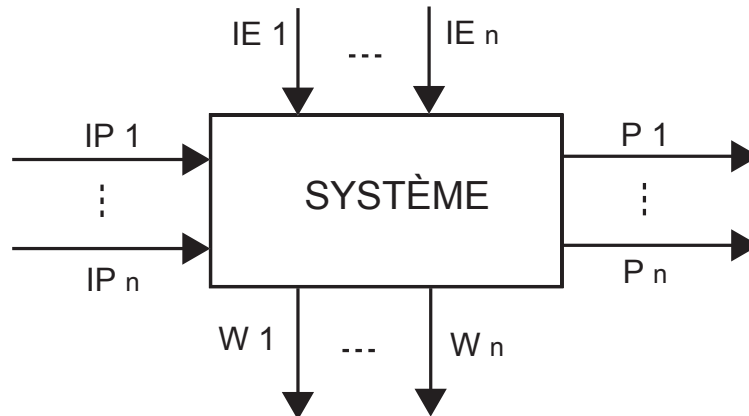


FIGURE 1.9: Représentation d'un système de produits génériques. [38]

De cette manière, l'ICV ou le bilan des charges environnementales du système de produits étudié est réalisé de manière similaire à un bilan matière. Ainsi, dans le cas de l'installation entière et complexe, celle-ci peut être divisée en ses unités ou sous-systèmes, et le système d'équations obtenu pour chacun d'eux est résolu afin de calculer le éco-vecteurs pour chaque produit intermédiaire ou final. La solution des systèmes d'équation permet une connaissance détaillée de l'origine de la pollution, qui peut être attribuée à chaque produit d'une usine.

Les bilans sont effectués de manière similaire pour les processus discontinus, ne changeant que la base du calcul. Par exemple, au lieu de considérer un taux de polluant, les calculs sont effectués en masse de polluant par masse de produit obtenu. Une illustration d'un système discontinu générique pris avec n entrées de matières premières et d'énergie et n sorties de produits et rejets de déchets est présentée à la figure 1.9. L'algorithme résultant de l'équilibre global de CE est donné comme suit :

$$\sum_{i=1}^n (P_i \cdot v_{m,pi}) = \sum_{i=1}^n (IP_i \cdot v_{m,IP_i}) + \sum_{i=1}^n (IE_i \cdot v_{e,E_i}) - \sum_{i=1}^n (W_i \cdot v_{m,wi}) \quad (1.3)$$

où :

- IP_i = entrées de masse
- IE_i = entrées d'énergie
- P_i = extrants (produits et sous-produits)
- W_i = déchets
- $v_{m,e}$ = éco-vecteurs masse et énergie des flux

Les seules inconnues dans l'expression 1.3 sont les éco-vecteurs associés aux produits. Si un seul produit est supposé, l'éco-vecteur correspondant sera calculé par :

$$v_{m,e} = \frac{\sum_{i=1}^n IP_i \cdot v_{m,IP_i} + \sum_{i=1}^n IE_i \cdot v_{i,E_i} - \sum_{i=1}^n W_i \cdot v_{m,wi}}{p} \quad (1.4)$$

1.4.3 Analyse d'impacts

L'inventaire du cycle de vie offre des informations environnementales liées au produit consistant essentiellement en une liste quantifiée des charges environnementales (consommation de matières premières, émissions dans l'air et l'eau, déchets, etc.) qui donnent la quantité de polluants à attribuer au produit. Cependant, les dommages environnementaux qui leur sont associés ne sont pas encore connus.

Prenons, par exemple, des polluants atmosphériques bien connus tels que le dioxyde de soufre, le SO_2 , le dioxyde d'azote, le NO_2 et le chlorure d'hydrogène, HCl , qui génèrent un impact environnemental connu sous le nom de pluies acides. La capacité de ces polluants à acidifier l'atmosphère peut être mesurée par le potentiel de générer des protons H^+ , de sorte que la concentration d'acide pourrait être multipliée par un facteur correspondant pour obtenir une valeur globale d'équivalent protons H^+ . De cette manière, une catégorie d'impact environnemental a été mesurée sur la base des données d'inventaire. Il en va de même pour les émissions atmosphériques : le dioxyde de carbone, le méthane, les oxydes d'azote, les halocarbures, etc. contribuent au réchauffement de la planète et provoquent l'effet de serre bien connu, mesuré en équivalents CO_2 . Ainsi, un nouveau type de catégorie d'impact, le

potentiel de réchauffement climatique, est introduit à partir des données d'inventaire.

Ainsi, l'analyse d'impact est introduite comme la troisième étape de l'analyse du cycle de vie (ACV), décrite dans l'ISO 14042 et plus en détail dans l'ISO 14047 (2002). Le but de cette étape est d'évaluer l'inventaire d'un système de produits pour mieux comprendre son importance environnementale. Ainsi, elle fournit des informations pour l'interprétation - l'étape finale de la méthodologie d'ACV. L'analyse d'impact attribue les résultats de l'inventaire aux catégories d'impact. Pour chaque catégorie d'impact, les potentiels d'impact sont sélectionnés et les résultats des indicateurs de catégorie sont calculés. D'autre part, pour comparer les potentiels d'impacts différents, il est nécessaire d'évaluer la gravité des catégories d'impacts les unes par rapport aux autres. Cela peut être exprimé par un ensemble de facteurs de pondération - un facteur par catégorie d'impact dans chacun des principaux groupes de catégories. Le potentiel d'impact pondéré, $WP(j)$, peut être calculé en multipliant le potentiel d'impact normalisé ou la consommation de ressources, $NP(j)$, par le facteur de pondération, $WF(j)$, associé à la catégorie d'impact.

1.4.3.1 Phases d'analyse d'impacts. Le cadre général de la phase d'analyse d'impact est composé de plusieurs éléments obligatoires qui convertissent les résultats de l'inventaire en résultats d'indicateurs. En outre, il existe des éléments facultatifs pour la normalisation, le regroupement et la pondération des résultats des indicateurs et des techniques d'analyse de la qualité des données. Un aperçu des éléments obligatoires de l'analyse d'impact est donné à la Figure 1.10.

L'utilisation de modèles est nécessaire pour dériver les facteurs de caractérisation, ils reflètent la chaîne de cause à effet, également appelée mécanisme environnemental ou voie d'impact, en décrivant la relation entre les résultats de l'inventaire, les indicateurs et, si possible, les paramètres de catégorie ou les indicateurs de dommages. Pour chaque catégorie d'impact, la procédure suivante est proposée dans l'ISO 14042 (2002) :

1. Identification des paramètres de catégorie
2. Définition de l'indicateur pour des paramètres de catégorie donnés

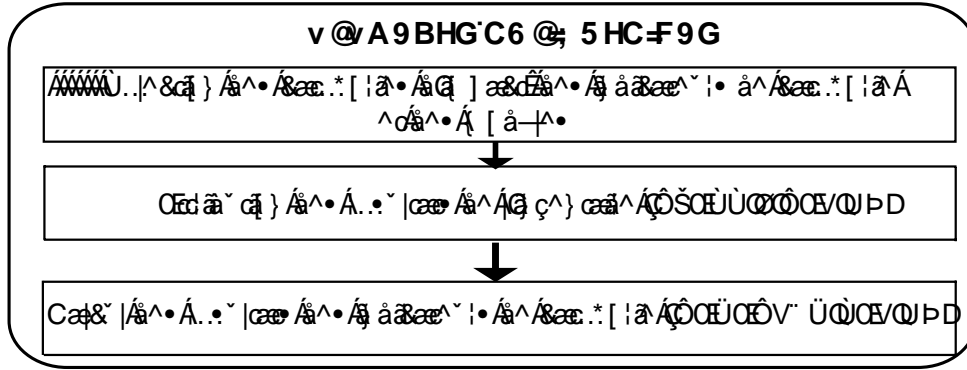


FIGURE 1.10: Éléments obligatoires de l'analyse d'impact selon ISO 14042 (2002).

3. Identification des résultats de l'inventaire appropriés pouvant être attribués à la catégorie d'impact, en tenant compte de l'indicateur choisi et des paramètres de catégorie identifiés
4. Identification du modèle et des facteurs de caractérisation

La figure 1.11 illustre la relation entre les résultats de l'analyse de l'inventaire, les indicateurs et les paramètres de catégorie pour une catégorie d'impact pour l'exemple de l'acidification. Il montre clairement où un modèle est nécessaire.

1.4.3.2 catégories d'impact. Une catégorie d'impact est définie comme une classe représentant des problèmes environnementaux préoccupants dans laquelle les résultats de l'inventaire peuvent être attribués. Udo de Haes et al. (1999), [42] ont proposé de classer les impacts en catégories liées aux intrants et aux extrants. Les intrants font référence aux impacts environnementaux associés aux intrants matériels ou énergétiques du système et les extrants correspondent aux dommages dus aux émissions ou aux polluants, aux vibrations ou au rayonnement. Les catégories d'impacts sont mentionnées dans le tableau 1.2. Il est à noter que le changement climatique et l'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique, ont un effet global; d'autres, comme la formation de photo-oxydants ou l'acidification, ont un effet local. Cela met en évidence la nécessité d'une différenciation spatiale dans l'analyse du devenir et de l'exposition dans différentes catégories d'impact.

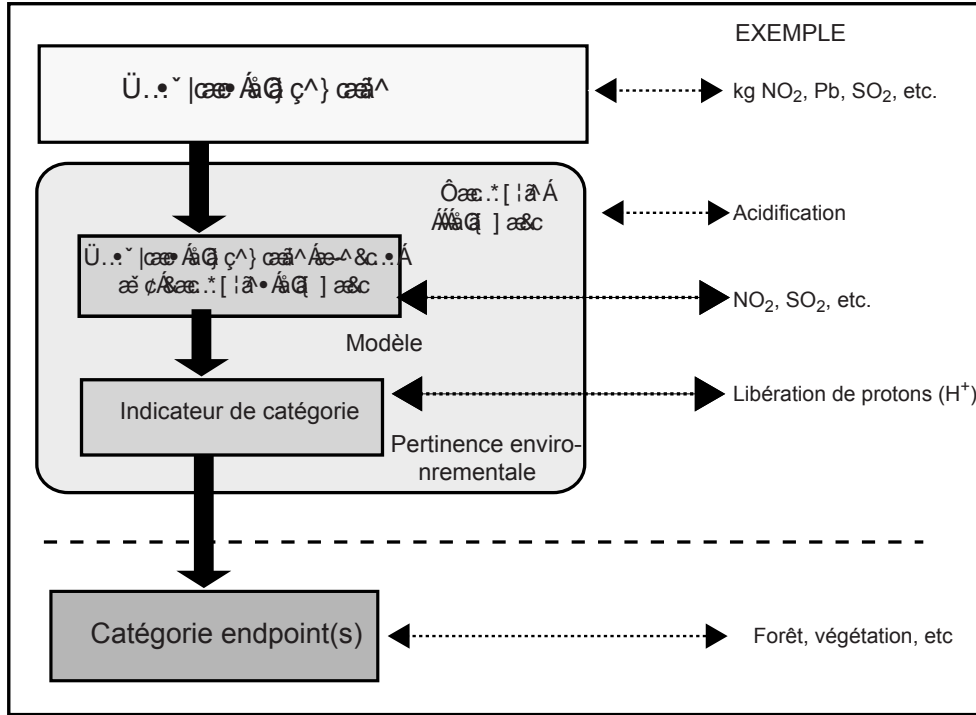


FIGURE 1.11: Le concept d'indicateurs (ISO 14042, 2000).

1.4.3.3 Caractérisation. L'équation 1.5 fournit un exemple de données d'émissions sur la manière dont les indicateurs pour chaque catégorie d'impact peuvent être facilement calculés à partir des données d'inventaire d'un produit à l'aide de facteurs de caractérisation. Ces facteurs sont généralement le résultat des modèles de caractérisation. Les facteurs sont mis à la disposition des praticiens dans la littérature, sous forme de bases de données, ainsi que dans les outils d'ACV [31].

$$\text{Indicateur de catégorie} = \sum_s \text{Facteur}(s) \text{ de caractérisation} \times \text{Inventaire}(s) \text{ des émissions} \quad (1.5)$$

où l'indice s désigne le produit chimique. Les données de l'inventaire des émissions sont exprimées en termes de masse rejetée dans l'environnement - par exemple 1 kg - par unité fonctionnelle. Les facteurs de caractérisation de l'équation.1.5 expriment donc linéairement la contribution à une catégorie d'impact d'une unité de masse (1 kg) d'une émission dans l'environnement. À titre d'exemple, les contributions relatives de différents gaz au change-

TABLE 1.2: Catégories d'impact et indicateurs possibles

Catégories d'impact	Indicateur possible
	Catégories liées aux entrées
Extraction de ressources abiotiques	• Vitesse d'épuisement des ressources
Extraction de ressources biotiques	• Vitesse de réapprovisionnement
	Catégories liées aux extrants
Changement climatique	• kg CO ₂ comme unité d'équivalence
Appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique	• kg CFC-11 comme unité d'équivalence
Toxicité humaine	• Potentiel de toxicité humaine
Écotoxicité	• Potentiel d'écotoxicité aquatique
Formation de photo-oxydant	• kg d'éthène comme unité d'équivalence pour le potentiel de création photochimique d'ozone
Acidification	• Libération de H ⁺ comme unité d'équivalence
Nitrification	• Somme stoechiométrique des macronutriments comme unité équivalente pour le potentiel de nitrification

ment climatique sont généralement comparées en termes d'équivalents de dioxyde de carbone en utilisant les potentiels de réchauffement planétaire (PRP). Un PRP₅₀₀ de 100 implique que 1 kg de la substance a le même effet cumulatif sur le changement climatique que 100 kg de dioxyde de carbone sur une période de 500 ans [31]

1.4.3.4 Cadre méthodologique de base. Premièrement, il convient de rassembler les résultats de l'inventaire ayant des effets identiques ou similaires dans des catégories intermédiaires d'impact. Par exemple, on peut regrouper toutes les émissions qui ont une incidence sur la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre et qui sont donc de potentiels vecteurs de changement climatique. Ainsi, le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), l'hémioxyde d'azote (N₂O), le trichlorofluorométhane (CFCl₃) et de nombreux autres gaz appartiennent à cette catégorie de substances, appelée **catégorie**. Cette première étape est appelée **classification**. Elle consiste donc en la définition d'une série de catégories d'impacts dites intermédiaires dans lesquelles on classe les différentes les extractions et émissions. Il est à noter qu'une émission peut se retrouver dans plusieurs catégories, si les impacts qu'elle engendre sont multiples. En tant que catégories intermédiaires, on peut citer le changement climatique, l'acidification terrestre, l'eutrophisation aquatique, la toxicité pour l'homme, etc.

Différentes listes existent et leur composition varie en fonction des méthodes.

La deuxième étape de la méthodologie est la **caractérisation**, qui consiste en la pondération de chaque substance au sein de sa (ses) catégorie(s) respective(s), c'est-à-dire l'expression de cette substance en fonction d'une **substance de référence**. Pour cela, on utilise des **facteurs de caractérisation (F)**, qui déterminent donc le poids relatif d'une substance émise ou extraite dans le cadre d'une catégorie d'impact spécifique. Les masses des substances sont ainsi multipliées par ces facteurs puis sommées pour obtenir un **score d'impact (SI)** qui, mathématiquement, peut s'exprimer comme suit :

$$SI_i = \sum_s FI_{s,i} \cdot M_s \quad (1.6)$$

où :

- SI_i = score de caractérisation pour la catégorie i ;
- $FI_{s,i}$ = facteur de caractérisation de la substance s dans la catégorie i ;
- M_s = masse extraite ou émise de la substance s .

Enfin, la troisième étape est celle de la caractérisation des dommages. Elle permet d'évaluer la contribution des catégories à une ou plusieurs catégories de dommages sur une entité vulnérable (par exemple, l'équilibre climatique, la santé humaine, la qualité des écosystèmes). Pour ce faire, on multiplie les scores d'impact (SI) par un facteur de caractérisation de dommages qui quantifie les dommages générés par une unité de chaque substance de référence (par exemple, par unité de CO₂ équivalente). Ainsi, plusieurs catégories peuvent contribuer de manière plus ou moins significative à des dommages sur la qualité des écosystèmes. Les produits de la multiplication pour chaque catégorie sont sommés pour obtenir le **score de caractérisation des dommages (SD)** pour chaque catégorie de dommages, qui, mathématiquement, s'exprime comme suit :

$$SD_d = \sum_i FD_{i,d} \cdot SI_i \quad (1.7)$$

où :

- SD_d = score de caractérisation de dommages pour la catégorie de dommage d
- $FD_{i,d}$ = facteur de caractérisation de dommage entre la catégorie i et la catégorie de dommage d
- Sl_i = score de caractérisation pour la catégorie i

La figure 1.12 résume l'abstraction générale de la méthodologie d'analyse de l'impact environnemental [24].

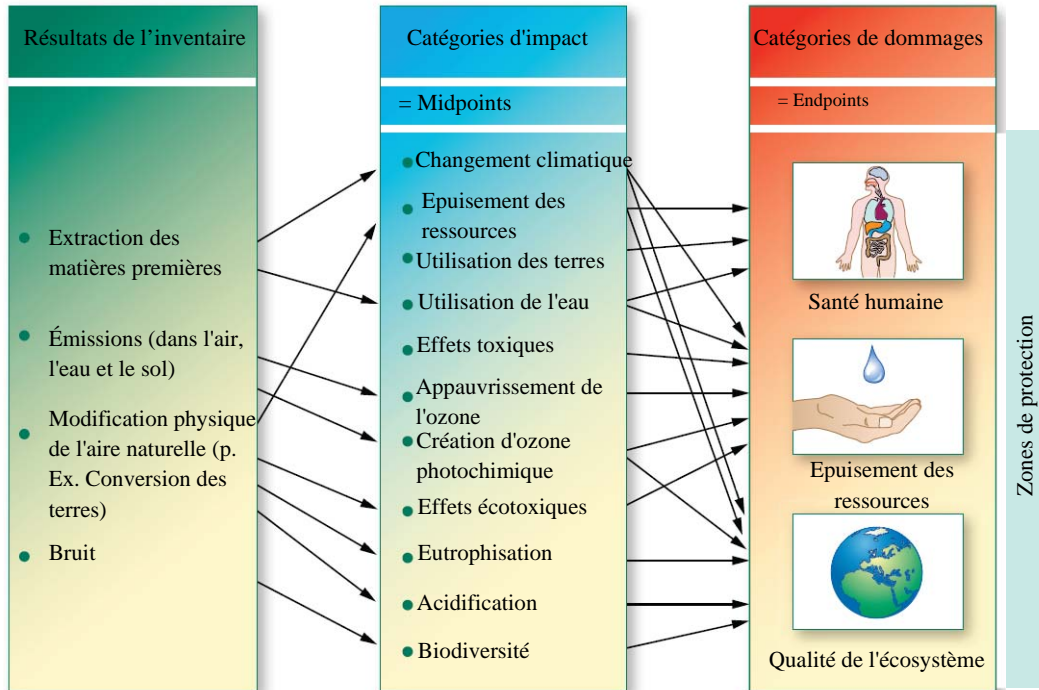


FIGURE 1.12: Schéma global selon PNUE/SETAC du cadre méthodologique de l'analyse des impacts reliant les résultats de l'inventaire via les catégories d'impacts aux catégories de dommages [24].

1.4.3.5 Méthodes d’analyse de l’impact environnemental. Plusieurs méthodes ont été développées par différents organismes et chercheurs. Les principales d’entre elles sont le Dutch Handbook on LCA, Ecoindicateur 99 et Impact 2002+. La principale différence entre ces méthodes se situe au niveau des catégories retenues à chaque palier. Comme expliqué supra, les scores de caractérisation (catégories d’impact) sont calculés grâce à des facteurs de caractérisation basés sur un principe d’équivalence. Ils sont exprimés pour la plupart en kg-équivalents d’une substance de référence. Les facteurs de caractérisation sont issus de différents modèles et d’autres méthodes d’analyse de l’impact. Le tableau 1.3 récapitule les différentes catégories intermédiaires et substances de référence utilisées dans Impact 2002+ et le tableau 1.4 décrit les facteurs de caractérisation de dommages pour chaque catégorie intermédiaire ainsi que les unités correspondant aux catégories de dommages :

TABLE 1.3: Catégories intermédiaires et substances de référence utilisées dans Impact 2002+

Catégorie intermédiaire	Substance de référence intermédiaire
Toxicité humaine (cancérogène)	kg chlorure de vinyle éq. dans l’air
Toxicité humaine (non cancérogène)	kg chlorure de vinyle éq. dans l’air
Effets respiratoires	kg PM _{2,5} éq. dans l’air
Destruction de la couche d’ozone	kg CFC-11 éq. dans l’air
Radiations ionisantes	Bq Carbone-14 éq. dans l’air
Formation de photo-oxydants	kg éthylène éq. dans l’air
Ecotoxicité aquatique	kg triéthylène glycol éq. dans l’eau
Ecotoxicité terrestre	kg triéthylène glycol éq. dans l’eau
Acidification/eutrophisation terrestre	kg SO ₂ éq. dans l’air
Acidification aquatique	kg SO ₂ éq. dans l’air
Eutrophisation aquatique	kg PO ₄ ³⁻ éq. dans l’eau
Occupation des sols	m ² terre éq.
Changement climatique	kg CO ₂ éq. dans l’air
Extraction de minerais	MJ d’énergie supplémentaire ou kg Fe éq. (mineral)
Energie non renouvelable	MJ totaux d’énergie non renouvelable ou kg pétrole brut éq.

TABLE 1.4: Catégories intermédiaires et substances de référence utilisées dans Impact 2002+

Catégorie intermédiaire	Facteur de dommages	Unité de dommages	Catégorie de dommages
Toxicité humaine (cancérogène)	1,45E-6	[DALY/kg chlorure de vinyle]	
Toxicité humaine (non cancérogène)	1,45E-6	[DALY/kg chlorure de vinyle]	
Formation de photo-oxydants	2,13E-6	[DALY/kg éthylène]	Santé humaine
Effets respiratoires	7,00E-4	[DALY/kg PM _{2.5}]	
Destruction de la couche d'ozone	1,05E-3	[DALY/kg CFC-11]	
Radiations ionisantes	2,10E-10	[DALY/Bq Carbone-14]	
Ecotoxicité aquatique	5,02E-5	[PDF.m ² .an/kg triéthylène glycol]	
Ecotoxicité terrestre	7,91E-3	[PDF. m ² .an/kg triéthylène glycol]	Qualité des écosystèmes
Acidification/Eutrophisation terrestre	1,04	[PDF. m ² .an/kg SO ₂]	
Acidification aquatique	/	/	
Eutrophisation aquatique	/	/	
Occupation des sols	1,09	[PDF.m ² .an/m ² terre arable organique]	
Changement climatique	1,00	[kg CO ₂ /kg CO ₂]	Changement climatique
Extraction de minerais	5,10E-2	[MJ/kg Fe]	Ressources
Energie non renouvelable	4,65E+1	[MJ/kg pétrole brut]	

Nous terminons cette section avec un exemple. La figure 1.13 montre un exemple de résultats de l'inventaire de cycle de vie d'un véhicule à essence et diesel pour la catégorie changement climatique. Il ressort que qu'environ 80% des émissions de GES sont associées à la phase d'utilisation. Le reste est presque entièrement lié à la phase de production tandis que l'impact de la phase de fin de vie est mineur.

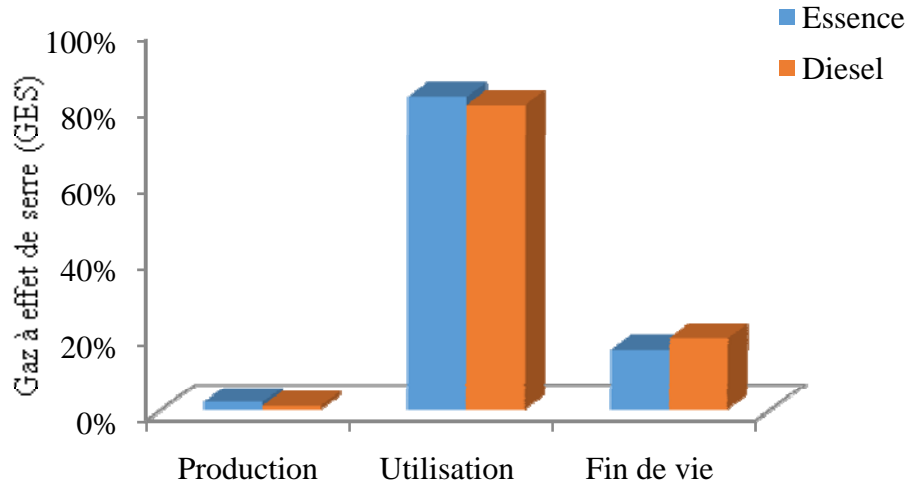


FIGURE 1.13: Exemple de résultats LCIA de véhicules conventionnels [21]

1.4.4 Interprétation

L'interprétation est la dernière étape d'une ACV. Il permet d'identifier les points chauds issus de l'analyse d'inventaire et de l'évaluation d'impact [3]. En outre, les résultats sont vérifiés pour leur exhaustivité, leur sensibilité et leur cohérence. En outre, les limitations sont décrites. Enfin, des conclusions et recommandations peuvent être tirées (ISO 14043 : 2000). Une type d'analyse est l'analyse du seuil de rentabilité (break-even). Elle est utilisée pour analyser les compromis entre les produits et calculer le point où les produits qui ont le même impact dans une catégorie d'impact. À ce stade, la préférence change d'un produit à l'autre. La figure 1.14 montre une analyse simple et schématique du seuil de rentabilité d'un véhicule électrique et conventionnel sur les kilomètres parcourus au cours de leur durée de vie. Le seuil de rentabilité est atteint à mi-parcours. Le VE a un impact environnemental plus élevé pour la production que le véhicule conventionnel. Cependant, son impact au kilomètre est plus faible [16].

Les deux étapes, inventaire et analyse des impacts, conduisent à une vaste collecte et calcul de données. À mesure que la complexité du produit augmente, la quantité de données générées devient également plus étendue. Même si les tableaux contiennent toutes les informations requises, les graphiques sont beaucoup plus faciles à comprendre que la présen-

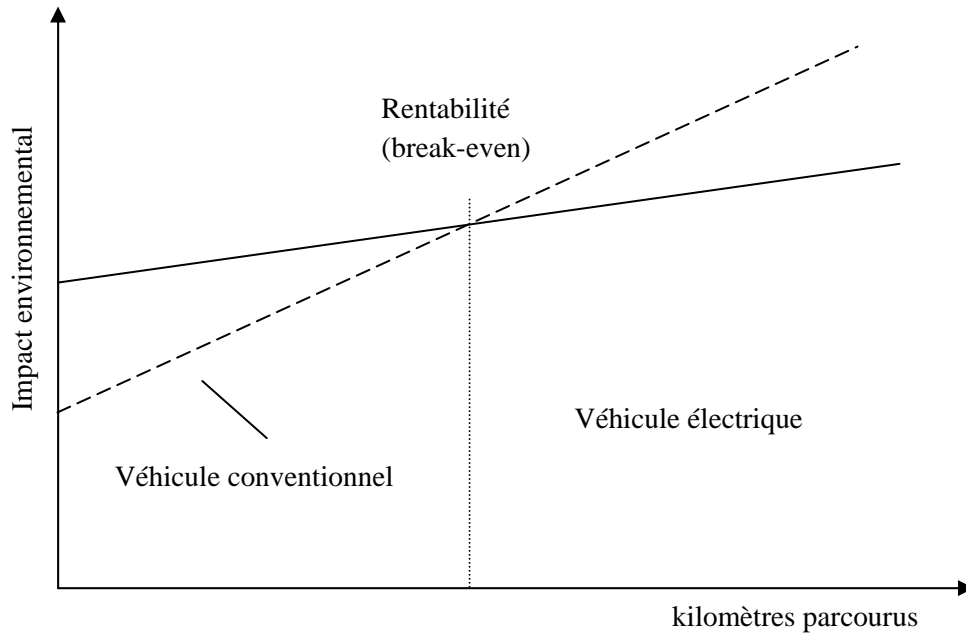


FIGURE 1.14: Analyse simple du seuil de rentabilité d'un véhicule électrique et conventionnel [16]

tation de simples chiffres. L'utilisation de différentes couleurs, formes et textures simplifie le traitement des données. Par conséquent, une bonne visualisation est essentielle lors de la transmission des résultats de l'ACV. En particulier parce que les résultats générés sont pertinents pour les experts non-ACV tels que les politiciens et les décideurs des entreprises, il est important de traduire les données numériques en graphiques utiles qui soutiennent le message et facilitent l'accès au sujet et aux résultats [16].

Chapitre 2

Introduction aux véhicules électriques

Ce chapitre fournit le contexte théorique nécessaire pour comprendre les impacts environnementaux des VE. À cette fin, le chapitre est divisé en deux parties. Tout d'abord, les aspects pertinents des véhicules électriques sont présentés. Ensuite, les impacts environnementaux sont discutés.

Ces derniers temps, les véhicules électriques (VE) gagnent en popularité, et les raisons en sont nombreuses. Le plus important est leur contribution à la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES). On s'attend à ce que les véhicules électriques, avec une pénétration suffisante dans le secteur des transports, réduisent cette pollution, mais ce n'est pas la seule raison qui redonne vie à ce concept centenaire et autrefois mort, cette fois en tant que produit commercialement viable et disponible. En tant que véhicule, un véhicule électrique est silencieux, facile à utiliser et n'a pas les coûts de carburant associés aux véhicules conventionnels. En tant que mode de transport urbain, il est très utile. Il n'utilise aucune énergie emmagasinée et ne provoque aucune émission au ralenti, il fournit le couple total dès le démarrage et ne nécessite pas de déplacements vers la station-service. Le silence et la faible signature infrarouge le rendent également utile pour un usage militaire.

D'autre part, le secteur de l'électricité traverse une phase de changement où les sources renouvelables prennent de l'ampleur. Le réseau électrique de nouvelle génération, appelé réseau intelligent, est également en cours de développement. Les VE sont considérés comme

un contributeur majeur à ce nouveau système électrique composé d'installations de production d'énergie renouvelable et de systèmes de réseau avancés. Tout cela a conduit à un regain d'intérêt et de développement pour ce mode de transport.

2.1 Historique

L'idée d'employer des moteurs électriques pour conduire un véhicule est apparue après l'innovation du moteur lui-même. De 1897 à 1900, les véhicules électriques représentaient 28% du total des véhicules. Mais les véhicules aux moteurs à combustion interne (VCI) ont pris de l'ampleur par la suite, et avec des prix du pétrole très bas, ils ont rapidement conquis le marché, et sont devenus beaucoup plus matures et avancés, et les véhicules électriques ont été perdus dans l'oubli. L'autre raison est que les premiers véhicules électriques des années 1830 utilisaient des batteries non rechargeables. La figure 2.1, montre un taxi électrique New-Yorkais datant d'environ 1901.

Une chance de résurrection est apparue sous la forme du concept EV1 de General Motors, qui a été lancé en 1996, et est rapidement devenu très populaire. D'autres grands constructeurs automobiles, dont Ford, Toyota et Honda, ont également sorti leurs propres véhicules électriques. Le très populaire Prius de Toyota, le premier véhicule électrique hybride (HEV) commercial, a été lancé au Japon en 1997, avec 18 000 unités vendues au cours de la première année de production. Aujourd'hui, le marché est dominé par Nissan, Chevrolet Volt et Tesla Model S [43].

2.2 Les différentes configuration des véhicules électrique

Il existe de nombreuses configurations et options pour créer un véhicule électrique. Les véhicules électriques peuvent être entraînés uniquement avec de l'énergie électrique stockée, certains peuvent générer cette énergie à partir d'un moteur à combustion interne, et il existe également des véhicules qui utilisent à la fois un moteur à combustion interne et les moteurs électriques. Les véhicule électrique (VE) utilisent différents types de stockage d'énergie pour stocker leur énergie. Bien que les batteries soient les plus utilisées, les ultracondensateurs, les



FIGURE 2.1: Un véhicule électrique à batterie de 1901

volants d'inertie et les piles à combustible sont également en train de devenir des systèmes de stockage d'énergie potentiels. Les véhicules électriques peuvent être classés comme suit :

1. Véhicule électrique à batterie (EV)
2. Véhicule électrique hybride (HEV)
3. Véhicule électrique hybride rechargeable (PHEV)
4. Véhicule électrique à pile à combustible (FCEV)

2.3 Le véhicule électrique

Dans ce qui suit, le terme *véhicule électrique* est utilisé pour décrire les véhicules électriques à batterie complète. Les VE doivent compter uniquement sur l'énergie stockée dans leurs batteries ; par conséquent, l'autonomie de ces véhicules dépend directement de la capacité de la batterie. En général, ils peuvent parcourir 100 à 250 km avec une seule charge,

alors que les modèles haut de gamme peuvent aller beaucoup plus loin, de 300 km à 500 km. Ces plages dépendent des conditions et du style de conduite, des configurations du véhicule, des conditions routières, du climat, du type de batterie et de l'âge. Une fois épuisé, le chargement de la batterie prend beaucoup de temps par rapport au ravitaillement d'un véhicule conventionnel. Cela peut prendre jusqu'à 36 h pour remplir complètement les batteries, il y en a beaucoup moins de temps aussi, mais aucune n'est comparable au peu de temps nécessaire pour remplir un réservoir de carburant.

2.3.1 Composants et fonctionnement des véhicules électriques

La figure 2.2 montre l'image schématique d'un véhicule électrique constitué de la carrosserie, des roues et des pneus, de l'intérieur, du système de direction, de freinage et de suspension, du système électrique sans propulsion. L'élément central des VE qui les distingue des véhicules conventionnels est la transmission électrique qui a une batterie comme stockage d'énergie et utilise un moteur électrique pour transformer l'énergie embarquée en énergie mécanique. Les composants restants ne sont pas nécessairement spécifiques aux VE (bien qu'ils puissent être adaptés pour répondre aux exigences spécifiques d'un VE). Par conséquent, ces composants - moteur électrique et batterie - sont décrits plus en détail après une brève explication du fonctionnement du VE.

2.3.2 Fonctionnement

Les véhicules électriques (VE), également appelés véhicules électriques à batterie, ont un moteur électrique au lieu d'un moteur à combustion interne. Le véhicule utilise une grande batterie de traction pour alimenter le moteur électrique et doit être branché à une prise murale ou à un équipement de charge, également appelé équipement d'alimentation de véhicule électrique. Parce qu'il fonctionne à l'électricité, le véhicule n'émet aucun échappement d'un tuyau d'échappement et ne contient pas les composants de carburant liquide typiques, tels qu'une pompe à carburant, une conduite de carburant ou un réservoir de carburant [12].

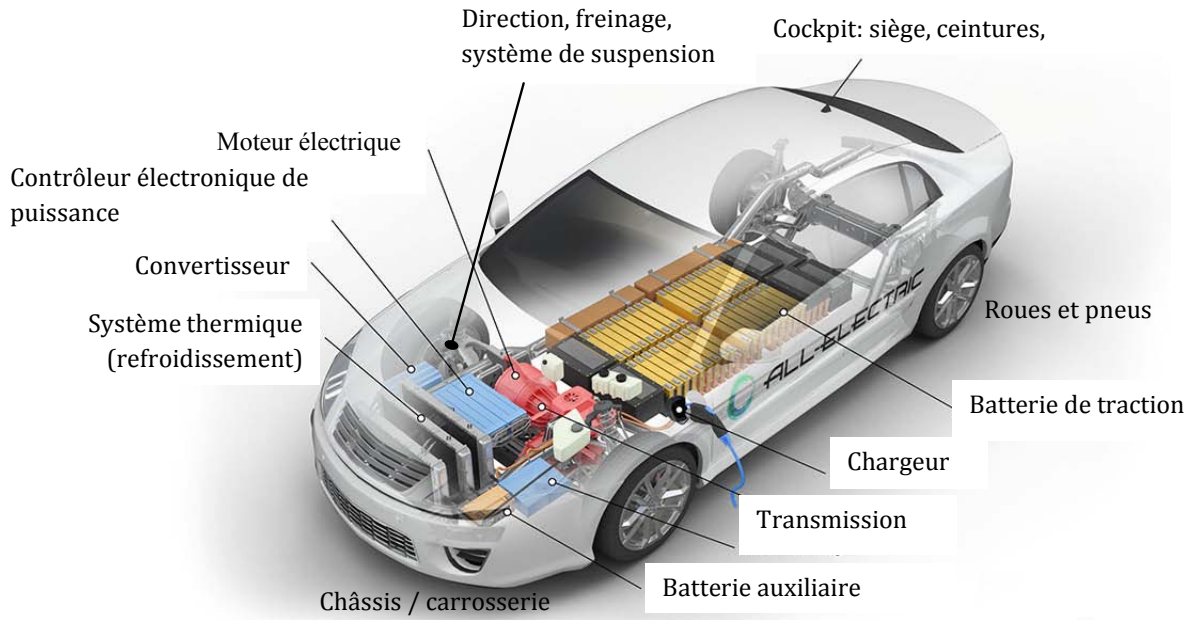


FIGURE 2.2: Composants de véhicule électrique [12]

La version de base d'une transmission électrique se compose de la batterie, d'un onduleur (électronique de puissance) et du moteur électrique. La batterie fournit un courant continu qui est transmis à l'onduleur. L'onduleur transforme le courant continu en courant alternatif et le fournit au moteur électrique. Ensuite, le moteur électrique transforme l'énergie électrique en énergie mécanique (c'est-à-dire en un couple avec une vitesse de rotation spécifique). Ce processus peut être inversé et le moteur électrique peut servir de frein électrique. Le moteur électrique fonctionne alors comme un générateur et transforme l'énergie de freinage en énergie électrique qui est stockée dans la batterie via l'onduleur. Ce processus est appelé récupération. Pour le système électrique non propulsif, une branche haute tension et une branche basse tension peuvent être distinguées. Les auxiliaires de chauffage et de refroidissement sont connectés à la branche haute tension. La branche basse tension est alimentée par un convertisseur. Il assure une charge suffisante de la batterie 12 V ainsi que l'alimentation en énergie de tous les auxiliaires 12 V comme l'éclairage, la radio et la navigation [16].

2.3.3 Moteur électrique

Les moteurs électriques sont généralement constitués d'un composant mobile (c'est-à-dire rotor) et stationnaire (c'est-à-dire stator). Ils génèrent un mouvement par l'interaction d'un champ magnétique et de conducteurs qui transportent du courant, en utilisant la force dite de Lorentz. Différents types de moteurs électriques existent : les moteurs à courant continu (DC) et asynchrones et synchrones à courant alternatif (AC). Les noms sont dérivés du courant d'entrée requis. Dans les moteurs à courant continu, le rotor porte les conducteurs et tourne dans le champ magnétique d'un aimant permanent (stator). Dans les moteurs à courant alternatif, le stator crée un champ magnétique rotatif dans lequel le rotor se déplace. En raison de leurs constructions, le rotor des moteurs synchrones se déplace avec la vitesse du champ magnétique (synchrone), dans les moteurs asynchrones, le rotor se déplace plus lentement (asynchrone). Selon la conception, les moteurs à courant alternatif synchrones peuvent contenir des aimants permanents. Les moteurs à courant continu sont simples et bien développés. Les véhicules électriques d'aujourd'hui sont généralement équipés de moteurs à courant alternatif. Les moteurs AC asynchrones sont plus simples et donc moins chers que les moteurs AC synchrones. Cependant, l'efficacité de ce dernier est plus élevée. la figure 2.3, montre une vue en coupe d'un moteur d'entraînement et de la transmission de base constituée d'un engrenage à rapport fixe, du différentiel et des brides d'arbre de transmission.

2.3.4 Batterie

Les batteries lithium-ion sont à la pointe de la technologie pour les véhicules électriques. Le terme décrit un groupe de batteries qui possède une puissance spécifique élevée et une énergie spécifique élevée. En fonction du véhicule, la batterie a généralement une capacité de 15 à 25 kWh qui fournit une autonomie d'environ 100 à 150 km. En général, une batterie se compose de cellules (la batterie proprement dite se compose de 200 à 300 cellules), d'un système de gestion de batterie, d'un emballage et d'un système de refroidissement (Fig.2.4).

La construction de base (système de batterie avec modules et cellules) et le fonctionnement d'une batterie sont illustrés à la Fig. 2.5. Les cellules sont l'élément le plus déterminant

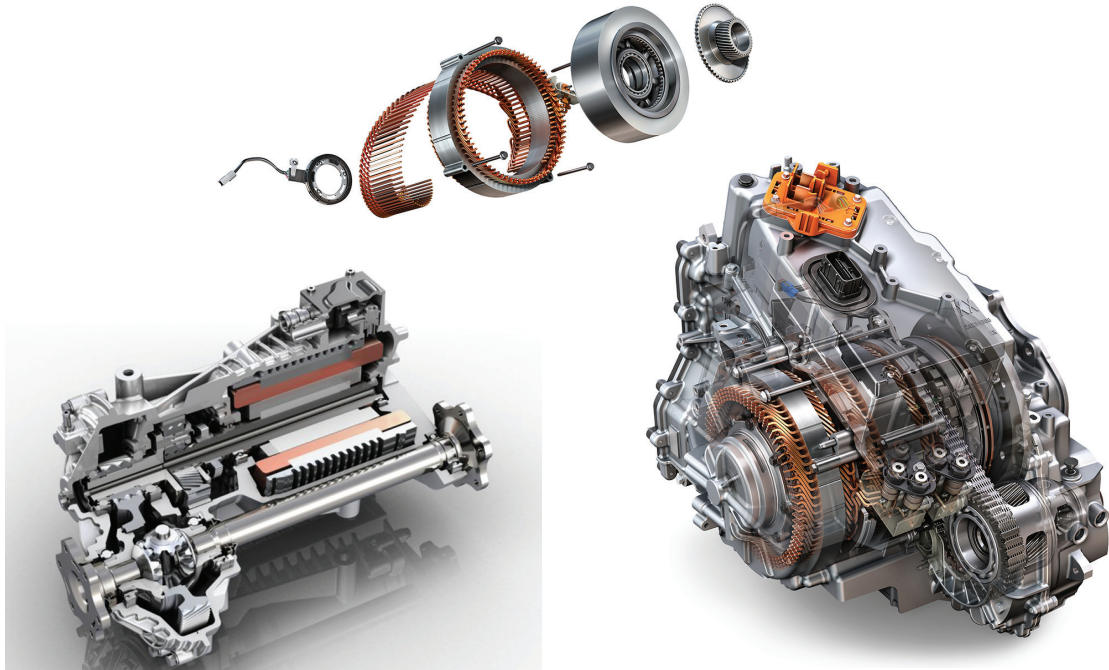


FIGURE 2.3: Moteur, Coupe transversale d'un moteur de véhicule électrique, moteurs et unité de transmission

de la batterie. Ils sont disponibles sous différentes formes : poches, cellules prismatiques et cylindriques. La cellule contient l'anode (électrode négative), la cathode (électrode positive), le séparateur et l'électrolyte. L'anode est souvent constituée de graphite. La cathode est constituée d'un oxyde lithium-métal ou d'un phosphate métallique. Les matériaux de cathode courants sont l'oxyde de lithium-cobalt, le phosphate de fer lithium ou l'oxyde de lithium-manganèse. La direction dans laquelle les ions lithium traversent le séparateur dépend du fait que la batterie est en cours de charge ou de décharge. La durée de vie est principalement définie par deux paramètres : le temps et le nombre de cycles de charge et de décharge. Les durées de vie typiques varient de 8 à 12 ans et sont proches de 3000 cycles..

2.3.5 Consommation d'énergie des véhicules électriques en phase d'utilisation

L'autonomie des VE est déterminée par l'état de charge de la batterie et la consommation d'énergie du véhicule. Même si l'état de charge de la batterie est connu au début de chaque

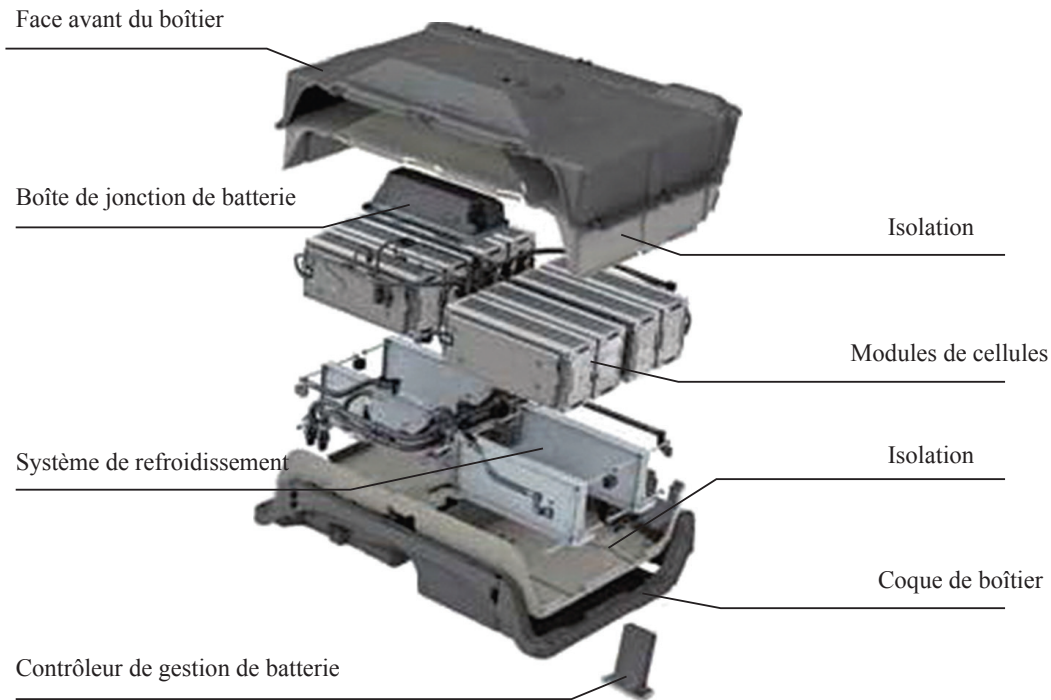


FIGURE 2.4: Batterie

trajet, l'autonomie du véhicule est incertaine car elle dépend de la consommation énergétique à venir et incertaine. La consommation d'énergie dépend du véhicule lui-même et de variables comme la température ambiante et le comportement de conduite, par conséquent, il est variable. La consommation d'énergie des véhicules électriques est influencée par cinq aspects :

- Les résistances motrices doivent être surmontées pour mettre le véhicule en mouvement.
- De l'énergie est perdue lors du processus de transformation de l'énergie électrique de la batterie en énergie mécanique au niveau des roues du véhicule. Par conséquent, chaque transmission a une efficacité spécifique.
- Les auxiliaires à bord du véhicule ont besoin d'énergie. Il s'agit notamment des appareils haute tension pour le chauffage et le refroidissement mais aussi des auxiliaires basse tension tels que l'éclairage, la radio ou la navigation.
- Le processus de charge est affecté par les pertes d'énergie.

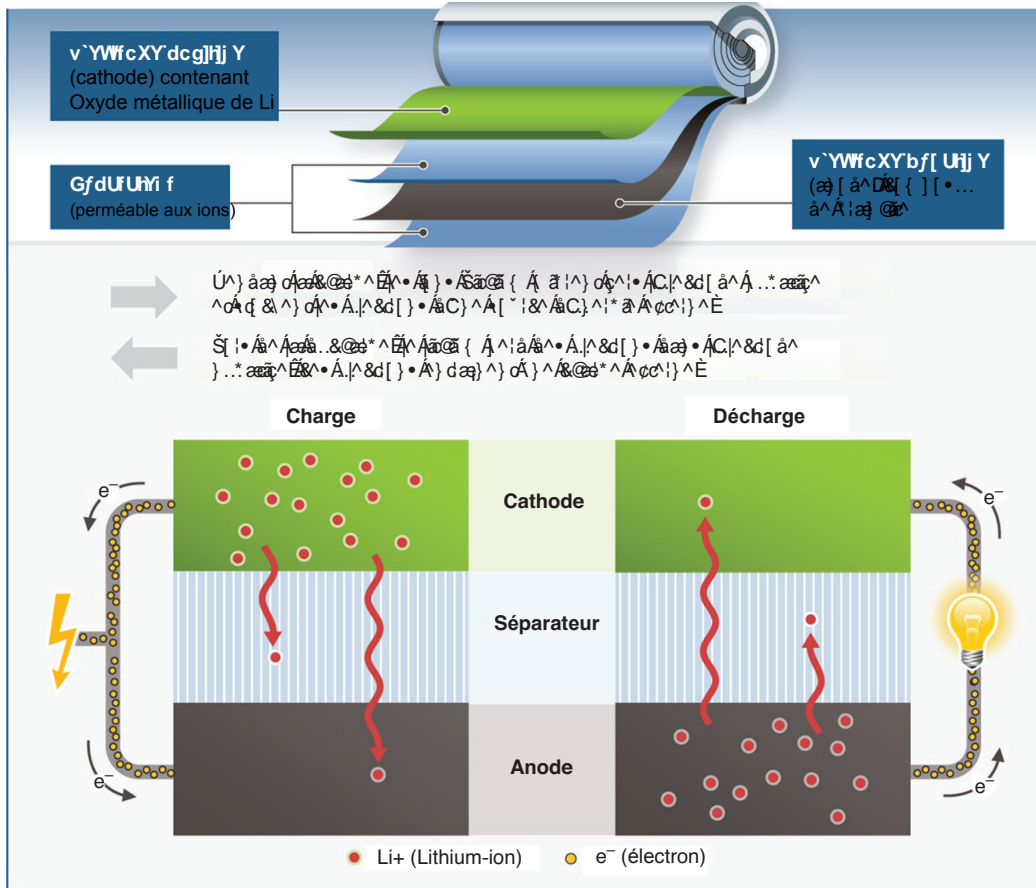


FIGURE 2.5: Fonctionnement de base d'une batterie lithium-ion

2.3.6 Impacts du déploiement des véhicules électriques

Des recherches extensives ont été menées pour évaluer le déploiement des véhicules électriques. Les attentions ont été placées sur trois impacts majeurs, qui concernent l'impact économique, l'impact environnemental et l'impact sur le réseau électrique. Les principales conclusions de ces trois catégories sont ci-dessous.

2.3.6.1 Impact économique. L'impact économique du déploiement des véhicules électriques (VE) peut être évalué à partir de deux perspectives, qui sont du point de vue du réseau électrique et du point de vue des propriétaires de VE. Du point de vue du réseau électrique, les VE sont des charges supplémentaires qui doivent être connectées au réseau électrique pour être rechargées. Afin de faire face à ces charges supplémentaires massives de

VE, le coût du système augmentera en raison de l'augmentation du carburant utilisé pour produire plus d'électricité. Il y a également plus de pertes de puissance pendant le transfert d'énergie à travers le réseau électrique pour alimenter ces VE. Cependant, cette situation peut être complètement modifiée en gérant la charge du VE. L'intégration des ressources énergétiques renouvelables dans le réseau électrique, peut réduire considérablement le coût du système.

Du point de vue des propriétaires de VE, les VE ont un faible coût d'exploitation en raison de l'utilisation d'un moteur électrique efficace et d'une électricité bon marché. Cependant, le VE a un coût d'achat initial plus élevé que les véhicules conventionnels en raison du composant de batterie coûteux. Un terme appelé période de récupération des VE est introduit pour estimer la durée nécessaire pour récupérer le coût d'investissement d'un VE. De nombreuses actions peuvent être mises en œuvre pour atténuer le coût d'achat initial élevé des VE, comme la production de masse de VE, mettre en œuvre une politique d'échange d'énergie et adopter des stratégies de tarification appropriées [8, 37].

À première vue, l'impact économique du déploiement des VE sur le réseau électrique et les propriétaires de VE n'est pas positif. Le réseau électrique doit avoir plus de capacité de production pour la demande de charge supplémentaire de VE, tandis que les propriétaires de VE doivent payer le coût d'achat initial élevé des VE à l'heure actuelle.

2.3.6.2 Impact sur le réseau électrique. Le déploiement des VE suscite des inquiétudes quant à l'effet de la recharge des VE sur le réseau électrique. L'inter-connexion de grandes flottes de véhicules électriques au réseau électrique pour recevoir la charge peut introduire des impacts négatifs sur le réseau électrique, tels que des harmoniques, des pertes du système, une chute de tension, un déséquilibre de phase, une augmentation de la demande de puissance, une surcharge de l'équipement et des problèmes de stabilité. Les divers vitesses de charge possibles et le comportement dynamique des VE compliquent même les impacts potentiels [13].

De nombreuses études ont été menées pour étudier l'impact du déploiement des VE sur le réseau électrique. Les résultats montrent que si les propriétaires de véhicules électriques sont autorisés à charger leurs véhicules électriques n'importe où et à tout moment, la charge

des véhicules électriques augmentera la charge aux heures de pointe et en fin d'après-midi, qui sont respectivement l'heure d'arrivée au travail et l'heure d'arrivée à la maison après le travail [10].

Une autre étude est réalisée pour étudier l'impact de la recharge des VE sur le profil de charge du réseau allemand en 2030 [26]. Il révèle que la charge incontrôlée d'un million de VE a un léger impact sur la charge de pointe quotidienne. Cependant, si tous les véhicules conventionnels en Allemagne (environ 42 millions d'unités) sont remplacés par des VE, alors la charge des VE augmentera la charge de pointe d'environ deux fois. L'impact du déploiement des VE sur le profil de charge du réseau électrique coréen en 2020 [23]. Le document montre que des charges des VE supplémentaires peuvent affecter la fiabilité du réseau électrique

Les grandes flottes de véhicules électriques rechargés à partir du réseau électrique nécessitent une énorme quantité d'énergie à transmettre des centrales électriques à ces charges. Cette situation peut surcharger les composants du système existants, car ces composants peuvent ne pas être conçus pour répondre aux nouvelles charges EV supplémentaires. La surcharge des composants du réseau électrique, tels que le transformateur et le câble, peut être la principale restriction pour les VE plus larges

2.3.6.3 Impacts environnementaux des véhicules électriques . Les véhicules électriques offrent une gamme d'avantages environnementaux par rapport aux véhicules conventionnels. Par conséquent, ils peuvent réduire les impacts négatifs des véhicules sur l'environnement et améliorer les conditions de vie, en particulier dans les grandes villes.

- L'énergie de propulsion provient de l'énergie électrique qui est transformée en énergie mécanique. Par conséquent, les véhicules électriques n'émettent aucune émission sur leur lieu d'utilisation. Cela les rend attractifs pour les grandes villes qui souffrent d'une grave pollution atmosphérique.
- Les VE peuvent utiliser de l'électricité produite à partir de sources renouvelables. Cela conduit à un faible impact environnemental de la phase d'utilisation et soulage la pression sur les ressources fossiles.

Dans le même temps, les véhicules électriques présentent des inconvénients environnementaux. La production des composants du véhicule a généralement des impacts environ-

nementaux plus élevés que les véhicules conventionnels et surtout la batterie qui contribue fortement à ces effets. De plus, les VE utilisent l'électricité produite à partir du réseau électrique pour recharger leurs batteries et le processus de production d'électricité produit des émissions de GES. Afin de comparer le niveau d'émissions des VE aux véhicules conventionnels, un paramètre appelé *wells to wheels emissions* est introduit. Elles prennent en compte les émissions sur toute la durée de vie d'un véhicule, ce qui comprend l'énergie et les matériaux utilisés pour propulser un véhicule ainsi que les émissions directes à l'échappement. De nombreuses recherches concluent que les véhicules électriques ont les émissions les plus faibles [6, 8].

Cependant, la recharge des VE à partir d'un réseau électrique avec le charbon et d'autres combustibles polluants peut entraîner des émissions plus élevées que les véhicules à combustion. Par exemple, il a été démontré que le réseau électrique du Texas, qui a un mélange de production de charbon et de gaz naturel, produit des émissions plus élevées des VE que des véhicules à combustion. De même, le réseau électrique de l'Ohio avec une production au charbon génère des émissions de SO_2 et de NO_x plus élevées avec l'utilisation des VE, bien qu'une réduction des émissions de CO_2 allant jusqu'à 24% des VE par rapport aux véhicules à combustion. Ces résultats montrent que les véhicules électriques pourraient ne pas être respectueux de l'environnement si les véhicules électriques étaient chargés à partir d'un réseau électrique sale. Cependant, avec le large emploi des sources d'énergie renouvelables vertes ces derniers temps, cela rendra le réseau électrique plus vert. Par conséquent, les émissions des véhicules électriques seront réduites [32].

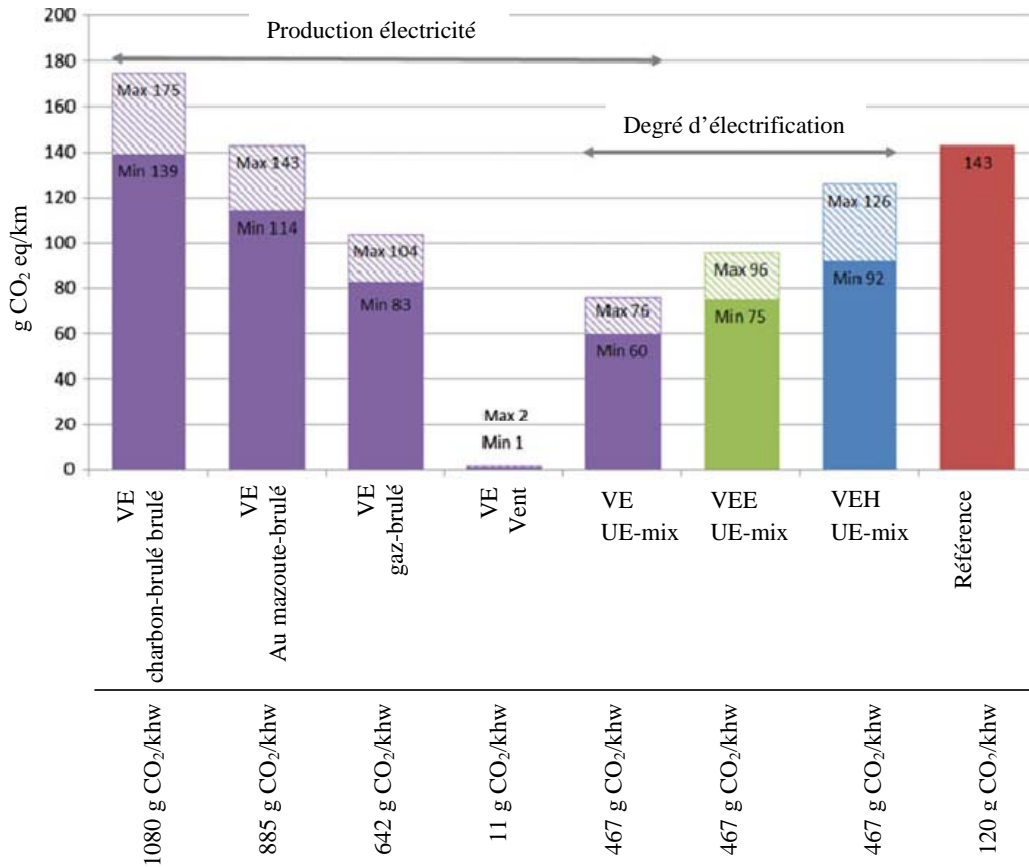


FIGURE 2.6: Émissions de GES pour différents types de production d'électricité et différents types de véhicules

De plus, le mix électrique utilisé pour la charge de la batterie est l'un des facteurs les plus pertinents pour l'impact environnemental des VE. La figure 2.6 montre les fourchettes d'émissions de GES par km (g CO₂-éq / km) pour différents mélanges électriques appliqués à l'utilisation des VE. Les émissions de GES du mix électrique sont affichées sous chaque barre. Un mix électrique à base de charbon conduit aux résultats les plus élevés, un mix électrique à base éolienne aux résultats les plus bas. L'impact se situe entre 1 et 175 g CO₂-eq / km. Cela reflète l'opinion générale selon laquelle les VE n'offrent un avantage environnemental satisfaisant que lorsqu'ils sont chargés d'énergie renouvelable. Par conséquent, la sélection du mix électrique pour une ACV est cruciale pour le résultat et doit être bien considérée et argumentée [10].

Chapitre 3

Cycle de vie des véhicules électriques

Toutes nos activités sont liées à l'environnement qui nous entoure. Tout au long du cycle de vie d'un produit comme un véhicule, les flux de matière et d'énergie entraînent des impacts environnementaux. Par conséquent, ce chapitre traite le cycle de vie des véhicules électriques. Une revue de la littérature est entreprise pour comprendre dans quelle mesure les études existantes sur le cycle de vie complet des véhicules électriques (VE). Les résultats des études sont synthétisés

De nombreux gouvernements encouragent l'adoption des véhicules électriques (VE) en tant qu'élément important du portefeuille de technologies nécessaires pour réduire les émissions de GES et la consommation d'énergie. L'intérêt récent pour la politique climatique a conduit bon nombre des plus grands constructeurs automobiles à augmenter la production de véhicules électriques notamment Mitsubishi, Nissan, Renault, Ford et Tesla.

L'intérêt pour les véhicules électriques provient de leur émissions à l'échappement faibles ou nulles. Cependant, les émissions au tuyau d'échappement ne sont qu'un aspect des impacts environnementaux des véhicules électriques. Pour s'assurer que la promotion des véhicules électriques pour réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) n'entraîne pas d'autres conséquences indésirables, il est essentiel de mener des évaluations environnementales rigoureuses, basées sur des scénarios, des technologies proposées avant leur adoption généralisée. L'analyse du cycle de vie (ACV) est l'outil de choix pour comparer les impacts environnementaux des options de transport, car elle quantifie explicitement l'utilisation des ressources

et les rejets dans l'environnement tout au long du cycle de vie d'un produit.

Dans les années 1990, plusieurs études ont été menées en se concentrant sur la qualité de l'air et les impacts et bénéfices environnementaux des véhicules électriques. Ces études ont mis en évidence des préoccupations concernant les émissions supplémentaires associées à l'augmentation de la production des batteries. Des études ACV plus complètes des véhicules électriques et des batteries de voitures ont été entreprises récemment [4, 40, 16, 21, 17]. Nous décrivons ici l'état de l'art du cycle de vie des véhicules électriques. Nous présentons ici ce que nous croyons être un cycle de vie complet.

3.1 Etat de l'art de l'ACV des véhicules électriques

Une ACV complète d'un véhicule électrique devrait évaluer tous les processus directs et indirects ou en amont liés à sa production, son utilisation et sa fin de vie. Dans les lignes directrices ISO 14040 et 14041 pour l'inventaire du cycle de vie [1, 2], les exigences en matière de données sont traitées dans le cadre de l'objectif et de la définition de la portée de l'étude. Une limite de système est définie dans laquelle les données de procédé sont collectées pour atteindre l'objectif de l'étude.

Les véhicules électriques sont des produits durables avec une durée de vie d'environ 10 à 15 ans et une distance totale de conduite de 100 000 à 250 000 km [41]. La figure 3.1 montre un organigramme simplifié d'une ACV pour les véhicules électriques, divisé en huit étapes. Après leur extraction, les matières premières sont traitées et envoyées à une fabrication ultérieure. Les matériaux sont ensuite utilisés pour la production des composants du véhicule ; le moteur électrique, la transmission, la batterie, l'électronique, les condensateurs, le système de freinage, les composants structurels, les roues et les pneus et le véhicule de base. Ces pièces sont assemblées au produit final. La phase d'utilisation comprend la chaîne d'approvisionnement en électricité et l'entretien du véhicule. Il est caractérisé par le mode de conduite et de la charge. En fin de vie, le véhicule est démonté et les pièces qui en résultent

sont soit mises en décharge, valorisées ou réutilisées pour entrer dans un nouveau cycle de vie.

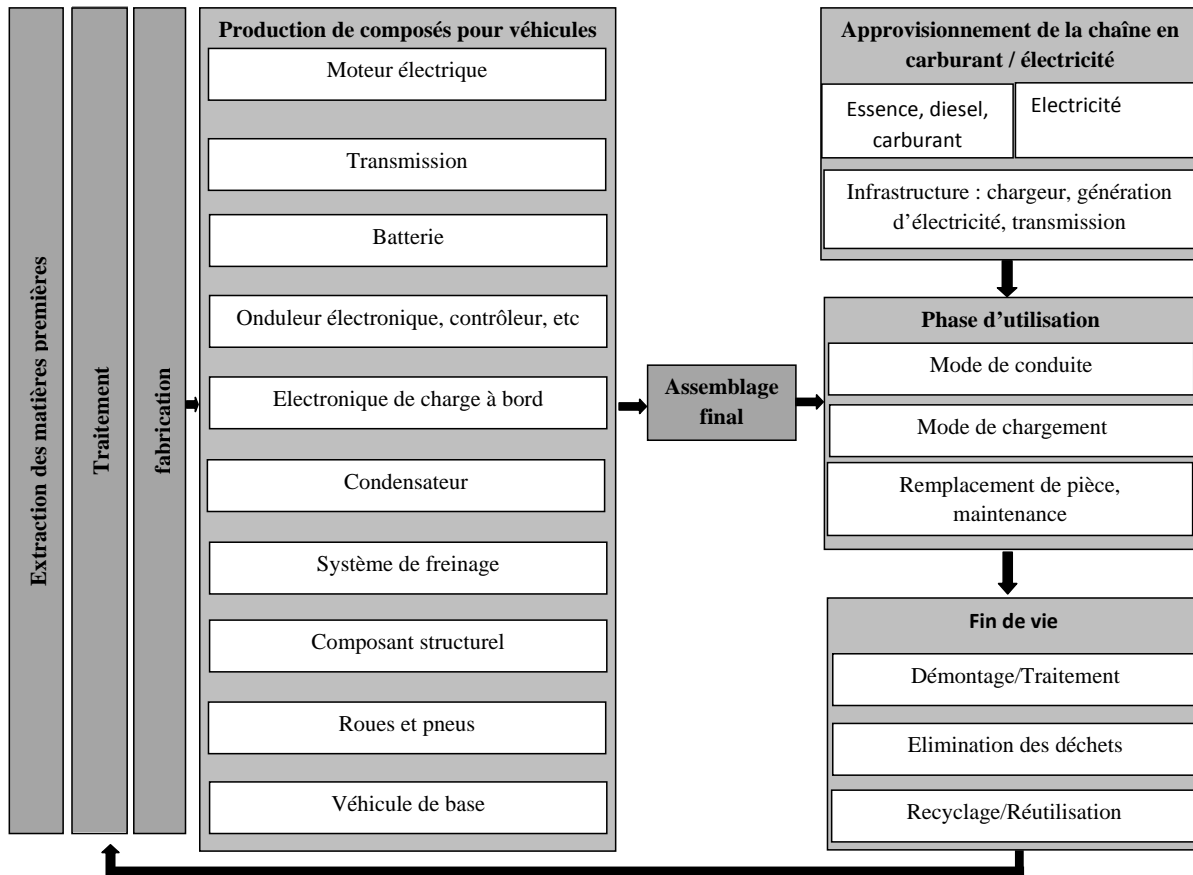


FIGURE 3.1: Organigramme simplifié du cycle de vie d'un véhicule électrique

Dans l'inventaire des véhicules électrique, il suffit de supposer que de nombreux composants du véhicule ne diffèrent pas significativement de ceux des véhicules à carburant fossile [9]. Dans le cas des VE, plusieurs ajustements sont effectués, les réservoirs de carburant sont remplacés par des batteries et des systèmes de contrôle de la température, les conduites de carburant sont remplacées par des câbles, le moteur à combustion est remplacé par un moteur électrique, les systèmes de contrôle de combustion électroniques sont remplacés par des commandes de système électrique, et un Un système de freinage régénératif peut être ajouté au système conventionnel. Dans certains cas, la masse de la batterie nécessite des

modifications de la structure du véhicule elle-même. Les pneus sont également inclus explicitement car la masse de la batterie peut avoir un effet sur les spécifications, la résistance et l'usure des pneus. L'extraction, le traitement et la fabrication des matières premières sont représentés à gauche, étant entendu que ces étapes s'appliquent à tous les composants du véhicule. En outre, il existe des sous-procédés tels que le transport des matériaux tout au long des chaînes d'approvisionnement.

Lors l'inventaire des véhicules électrique, le mode de conduite en phase d'utilisation doit aussi être pris en compte pour déterminer la consommation d'électricité et de carburant. La fréquence de recharge de la batterie est importante car elles détermine la durée de vie et l'efficacité de la batterie. Les besoins énergétiques du véhicule dépendent également de sa charge, en termes de passagers ou de marchandises, et des modèles d'accélération. L'accélération soumet les batteries à une forte consommation d'énergie. Les véhicules conçus pour des accélérations de plus en plus élevées nécessitent de plus grandes quantités de batteries pour répondre aux demandes élevées de puissance et d'énergie. L'entretien du véhicule doit également être inclus dans la phase d'utilisation. L'alimentation dans la phase d'utilisation est l'électricité. L'inventaire doit inclure l'extraction, le traitement, le transport, la distribution et l'infrastructure des matériaux associés à cette source d'énergie [21].

La fin de vie des véhicules joue un rôle important dans le résultat de l'ACV des VE. Les études supposent souvent que certains effets de la production de matériaux peuvent être compensés par le recyclage de ces matériaux. Le processus de recyclage du véhicule comprend plusieurs étapes. Un démontage est d'abord effectué. Il sépare les pièces réutilisables ainsi que les matériaux et les pièces qui nécessitent un traitement de recyclage spécial comme la batterie de la carrosserie résiduelle. La carrosserie résiduelle est ensuite déchiquetée et le mélange de matériaux est séparé. Certains matériaux sont recyclés (par exemple les déchets métalliques) tandis que d'autres sont transférés au traitement des déchets. Les pièces réutilisables sont reconditionnées si nécessaire. La batterie nécessite un traitement spécial pour récupérer les matériaux précieux qu'elle contient. En fonction de la composition de la batterie lithium-ion, différents procédés de recyclage peuvent être adaptés pour obtenir les meilleurs

résultats de récupération de matière. Dans de nombreux pays, les quotas de recyclage sont définis par la réglementation. Par exemple, dans l'Union européenne, la directive 2000/53 / EG régleme le recyclage des véhicules hors d'usage. Cependant, cela ne signifie pas que chaque véhicule qui atteint la fin de sa vie dans l'UE est recyclé selon ces normes. Pour des raisons économiques, les véhicules sont exportés vers des pays en développement avec des normes et des technologies de recyclage beaucoup plus faibles [33].

3.2 Lignes directrices pour l'ACV des véhicules électrique

L'ACV des véhicules électriques est une tâche difficile. Ces dernières années, un certain nombre d'ACV ont été publiés sur les véhicules électriques [17]. Hawkins et al. [21] ainsi que Nordelöf et al. [28] ont fourni des examens complets sur les ACV des véhicules électriques. Ils ont rapportés respectivement 55 et 79 études, y compris des rapports, des articles de journaux et des articles de conférence. Ces auteurs ont font état des différences dans les choix méthodologiques et des résultats très divergents [17].

D'autre part, un petit nombre de directives ACV aborde le thème spécifique des véhicules électrique. Les lignes directrices pour l'ACV des véhicules électriques "eLCAr" ont été élaborées par Del Duce et al [5] et issues d'un projet financé par la Commission européenne. L'élaboration des lignes directrices suit les étapes d'une ACV et présente un ensemble de paramètres communs pour les valeurs clés des véhicules électriques. Chaque phase est décrite en détail et des conseils spécifiques sont fournis sur la manière de modéliser ces phases dans une ACV.

3.2.1 Cadre méthodologique de la définition de l'objectif et la détermination de l'unité fonctionnelle

Nous rapportons deux exemples proposés en e qui concerne la définition de l'objectif et la détermination de l'unité fonctionnelle, d'une ACV des voitures électriques, rapportées par Del Duce et al [5].

Exemple : définition de l'objectif [5]

"Une entreprise qui produit des batteries au lithium-ion avec une densité d'énergie de 100Wh / kg est intéressée par un nouveau type de technologie de batterie avec une densité d'énergie de 120Wh / kg. L'unité de recherche et développement de l'entreprise souhaite examiner si cette nouvelle technologie pourrait conduire à un produit susceptible de substituer celui actuellement vendu. Dans l'analyse, les aspects technologiques et environnementaux doivent être pris en compte, car la durabilité est un trait clé de l'entreprise. Après avoir identifié un procédé de production viable, elle a décidée de procéder à une première évaluation des impacts environnementaux que cette nouvelle technologie peut apporter afin d'envisager de continuer ou non de y investir et, éventuellement, de construire le système de production requis. L'unité de recherche et développement confie à un praticien ACV interne du groupe d'évaluation de la durabilité la conduite de l'analyse. En guise d'étude préalable, le praticien décide de limiter l'analyse à l'empreinte carbone. De plus, reconnaissant les interactions système pièces entre batteries et véhicule et considérant que le client principal de l'entreprise de batteries est un constructeur d'un type de véhicule spécifique, le praticien décide de réaliser l'ACV analysant l'empreinte carbone globale des deux batteries fonctionnant dans le véhicule de leur client principal (également appelé Client X Vehicle) avec une autonomie de 120 km. Les résultats seront présentés à l'unité de recherche et développement de l'entreprise."

Application envisagée : Affirmation comparative des émissions de GES associées à la conduite sur 1 km d'un véhicule électrique du client X ayant (a) : une batterie lithium-ion de type A de 100 Wh / kg ou (b) : une batterie lithium-ion de type B de 120Wh / kg et une autonomie totale de 120 km.

Limitations : Étant donné que l'étude se concentre sur la batterie, les données sur la production de véhicules sont plutôt grossières, sauf pour les composants et les phases où une différence significative entre un véhicule avec batterie A et un véhicule avec batterie B est attendue. Ainsi, l'empreinte carbone totale des véhicules présente des incertitudes importantes tandis que la différence causée par les différentes batteries est modélisée de manière assez précise. L'analyse se concentre uniquement sur l'empreinte carbone car elle se veut une étude préliminaire. Ainsi, les compromis potentiels dans d'autres aspects environnementaux

tels que les dommages à la santé ou aux ressources non fossiles ne peuvent être identifiés. Les données de la batterie B sont basées sur la production à l'échelle du laboratoire et ni l'apprentissage ni les effets d'échelle ne sont considérés comme extrapolant à une future production à grande échelle.

Raisons de la réalisation de l'étude et contexte de décision : si les résultats préliminaires montrent qu'une amélioration supérieure à X% en termes d'empreinte carbone peut être obtenue avec la batterie de type B, alors des ressources supplémentaires seront investies afin de réaliser une ACV détaillée, couvrant les dommages à la santé humaine, à l'écosystème et à la consommation des ressources. Si l'étude préliminaire montre qu'aucune ou seulement des améliorations mineures seront apportées, alors la possibilité de passer à la technologie alternative sera abandonnée. L'analyse sera réalisée en supposant que la décision découlant des résultats aura un impact négligeable sur les chaînes d'approvisionnement impliquées dans le cycle de vie des produits, relevant donc d'une étude de type Situation A.

Public cible : Les résultats sont destinés à un personnels technique.

Commissaire de l'étude : L'étude a été commandée par l'unité de recherche et développement de l'entreprise et sera réalisée par Mr... ,du groupe d'évaluation interne de la dura

Exemple : détermination de l'unité fonctionnelle

Objectif : Les impacts environnementaux causés par le cycle de vie du berceau à la tombe de deux batteries pour véhicules électriques doivent être comparés.

Description de la batterie :

- Batterie A - Batterie Li-ion pour voiture compacte ; densité d'énergie 100 Wh / kg, durée de vie 2000 cycles, capacité à vie 200 kWh / kg, capacité par durée de vie 5,00 g / kWh
- Batterie B - Batterie Li-ion pour voiture compacte ; densité d'énergie 120 Wh / kg, durée de vie 1500 cycles, capacité à vie 180 kWh / kg, capacité par capacité à vie 5,56 g / kWh

Les batteries A et B de 1 kg n'ont évidemment pas les mêmes propriétés (capacité énergétique, durée de vie) et ne peuvent donc pas être utilisées comme flux de référence. Mais, aussi, la capacité de vie de 1 kWh des batteries A et B ont des masses différentes. Ainsi, pour comparer ces deux batteries, il faut identifier le plus petit dénominateur commun en termes de fonction. Les batteries doivent être utilisées dans les véhicules électriques qui ont pour fonction de fournir des services de transport. Il faut donc comparer les véhicules utilisant la batterie A aux véhicules utilisant la batterie B. Ces deux véhicules n'auront jamais des propriétés identiques du fait des différences introduites par les batteries. Les véhicules pourraient, par exemple, être conçus pour avoir la même masse, mais auraient alors une autonomie différente par charge ou vice versa. Ainsi, les propriétés considérées comme pertinentes doivent être définies. Cette définition ne peut pas être complètement objective car la pertinence est un concept fondé sur des valeurs.

Description du véhicule : Dans cet exemple, nous supposons que la taille et le confort, le mode de conduite (accélération, vitesse maximale et autonomie par charge) et la durée de vie de la voiture sont des propriétés pertinentes. Par conséquent, nous définissons les aspects suivants des véhicules à comparer :

- Classe compacte, 5 places ; masse sans batterie : 1 200 kg ; autonomie par charge : 120 km ; vitesse de pointe : 140 km / h ; accélération de 0 à 100 km / h en 8 s ; durée de vie : 240000 km

La masse de la batterie dépend de la densité d'énergie de la batterie nécessaire pour atteindre l'autonomie. Cependant, il faut faire attention car la masse totale du véhicule influence la consommation d'énergie, qui renvoie à nouveau à la gamme. Les calculs de la quantité de batterie nécessaire et de la consommation d'énergie lors de l'utilisation sont donc itératifs.

- Véhicule avec batterie A : Masse de la batterie pour atteindre une autonomie réelle de 120 km : 350 kg ; demande d'énergie à la prise : 22,7 kWh / km ; durée de vie avec 1 batterie : 240000 km
- Véhicule avec batterie B : Masse de la batterie pour atteindre une autonomie réelle de 120 km : 280 kg ; demande d'énergie à la prise : 22,0 kWh / km ; durée de vie avec 1 batterie : 180000 km. Ce véhicule a besoin de 1,33 batteries pour atteindre la durée de vie souhaitée.

Unité fonctionnelle : 240000 km de conduite dans une voiture électrique compacte à cinq places de 1200 kg (sans masse de batterie) d'une batterie, alimentée en électricité européenne moyenne produite entre 2012 et 2022, avec une batterie A ou B et une autonomie de 120 km par charge "**serait une unité fonctionnelle utilisable**". Pour les deux véhicules, il faudrait tenir compte des différents niveaux de consommation d'électricité. Cette différence est la raison pour laquelle la source d'électricité doit être spécifiée.

Flux de référence :

Plusieurs flux de référence pourraient être définis dans cet exemple, par ex. 1 km en voiture, 240000 km en voiture, 10 ans en voiture, 1 an en voiture. Il n'est cependant pas possible d'utiliser la batterie ou l'une de ses propriétés comme flux de référence même si le but de l'étude est de comparer deux batteries. En fonction de l'objectif de l'étude, certains flux de référence pourraient être plus appropriés et d'autres moins appropriés. Cependant, le choix du flux de référence n'est pas une question critique car, tant que l'unité fonctionnelle est bien définie, les flux de référence peuvent être facilement convertis.

3.2.2 Cadre de modélisation de l'inventaire du cycle de vie

Dans la phase de l'analyse de l'inventaire du cycle de vie (LCI), la collecte de données de tous les flux d'entrée et de sortie a lieu. Il s'agit des intrants énergétiques et matériels, des produits, des déchets, des émissions dans l'air et des rejets dans l'eau ou le sol (ISO 14040 : 2006) [1]. Le résultat de l'analyse des stocks est un bilan avec tous les flux entrants et sortants. Bon nombre des études n'incluaient pas l'inventaire du cycle de vie complet des voitures électriques, avec seulement l'inventaire de la production de batteries. Notter et al. [7] ont rapportés les détails de l'inventaire de la production de batteries. La figure 3.2 représente les étapes de production requises pour la batterie Li-ion allant de l'extraction du lithium et de la production d'électrodes à la batterie. Pour toutes les étapes de production, l'énergie thermique et électrique nécessaire pour produire une batterie Li-ion de 1 kg est indiquée. La masse utilisée pour le calcul est basée sur une batterie de marque Kokam et le matériau de la cathode est supposé être LiMn_2O_4 .

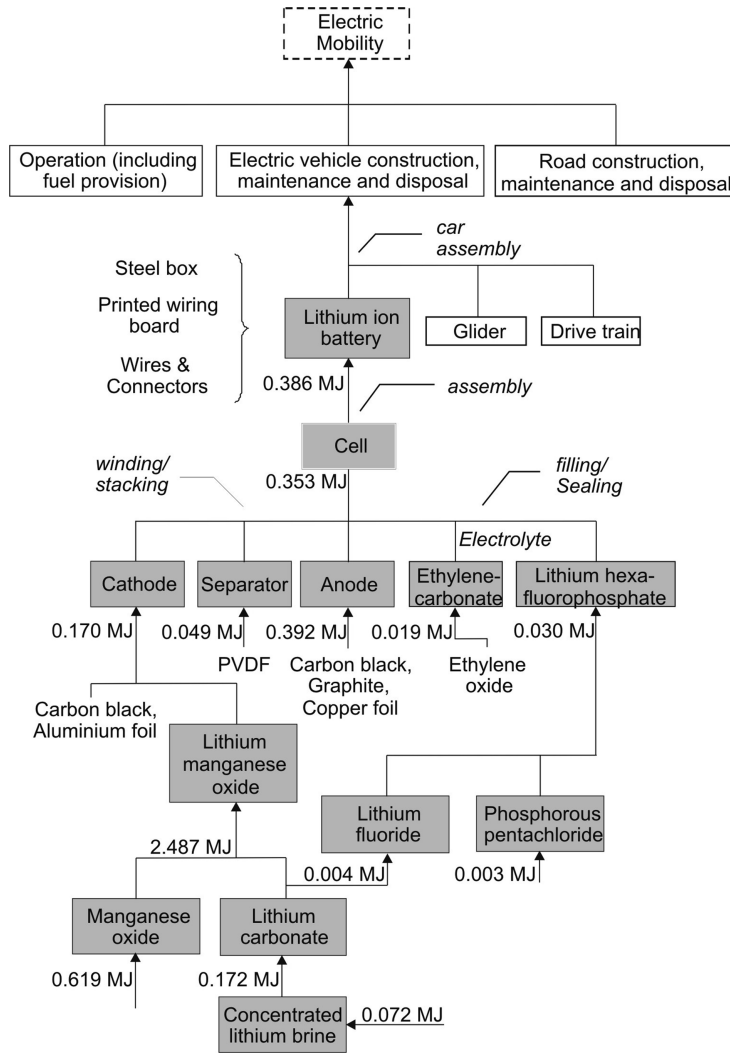


FIGURE 3.2: Etapes requises pour la production de la batterie Li-ion [7]

Or l'inventaire du cycle de vie complet consiste à identifier tous les processus pertinents impliqués dans la production d'un véhicule électrique. Pour simplifier, la figure 3.4 résume les principales étapes, entrées et sorties. Comme schématisé sur la figure 3.4(a), le véhicule n'est pas fabriqué en un seul procédé mais assemblé après que ses différents composants ont été produits (figure 3.4(bs))

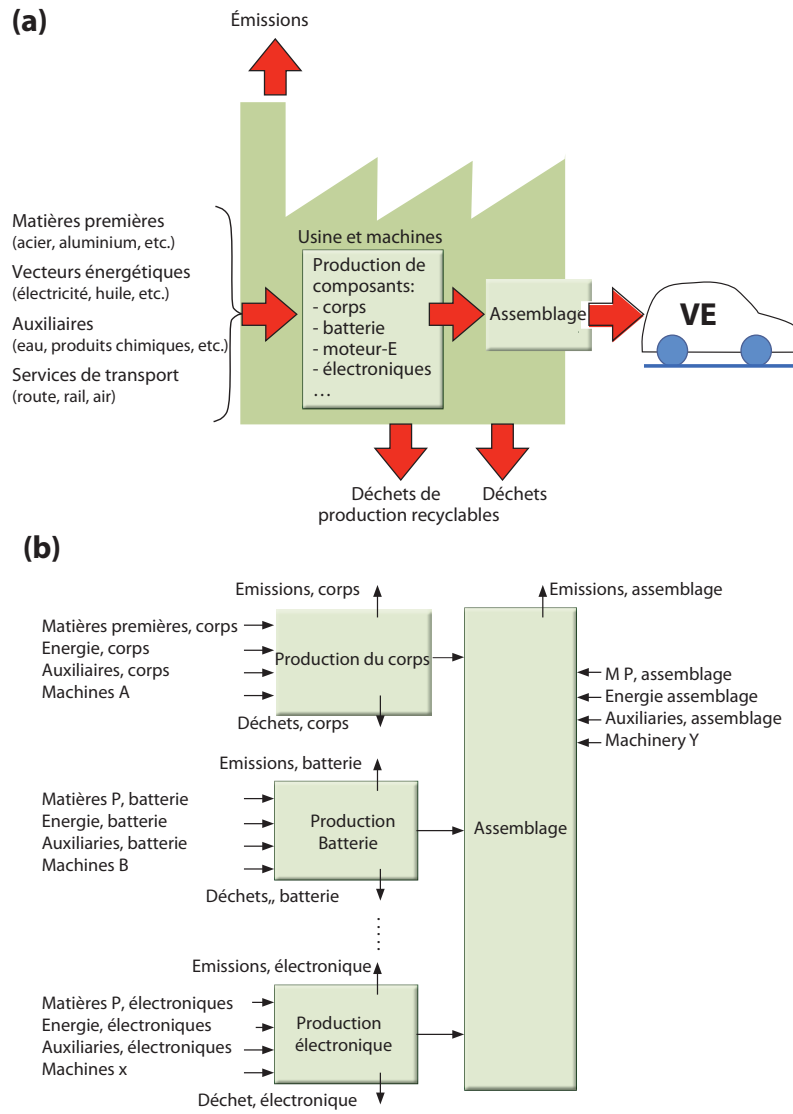


FIGURE 3.3: Principaux procédés impliqués dans la production de véhicules électrique

Afin de pouvoir comprendre d'où proviennent les principaux impacts de l'objet étudié, la subdivision représentée sur la figure ?? doit se poursuivre, au sein du système et avec tous les sous-composants et sous-procédés, jusqu'à ce qu'un niveau de détail soit atteint dans lequel un procédé de production décrit un procédé unitaire unique (c'est-à-dire qui ne peut pas être subdivisé en étapes de fabrication distinctes) et dans lequel les entrées ne sont pas une caractéristique spécifique de l'objet d'intérêt et peuvent être extraites du système..

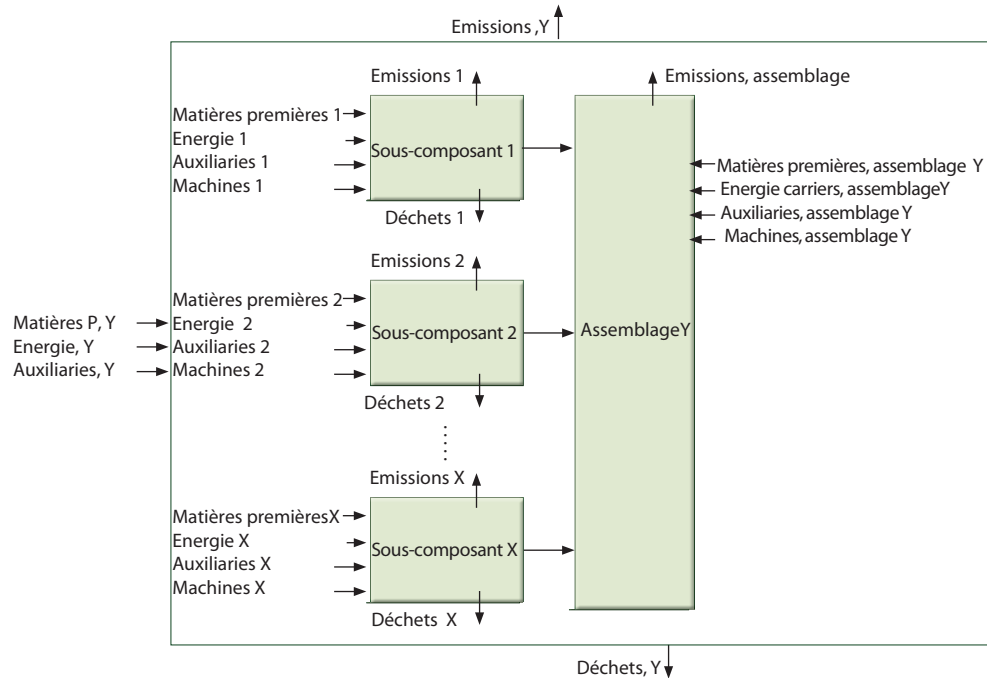


FIGURE 3.4: Principaux procédés impliqués dans la production de véhicules électrique

Il convient de rappeler que le niveau de détail ultime dépend également de l'objectif et de la portée de l'étude. Si le véhicule entier est au premier plan et si le but est d'identifier les contributions relatives des différents composants, décomposer chaque composant en ses sous-composants puis en sous-processus respectifs et en processus unitaires serait très difficile. en raison du très grand nombre d'étapes, et peut-être même pas nécessaire pour répondre à la question à la base de l'analyse. En raison de la vaste collecte de ces données, l'analyse de l'inventaire décrit généralement l'étape la plus gourmande en ressources de l'ACV. Les données primaires et secondaires peuvent être utilisées. La base de donnée ELCD (Commission européenne - Centre commun de recherche) a été utilisée par Del Duce et al [5] pour réaliser leur étude and Ecoinvent 3.01 par Egede et al. (2015) [17]

3.3 Etudes ACV sur les véhicules électrique

Comme décrit la section précédente, des études avec une limite de système limitée, peuvent être menées. Cependant, une ACV doit inclure le cycle de vie complet. De plus, les

ACV analysent tout le spectre de l'impact environnemental des produits. Par conséquent, l'exigence minimale est la prise en compte d'au moins deux catégories d'impact. Comme indiqué ci-dessus, les méthodes à score unique sont critiquées car elles ne décrivent pas la complexité d'un problème. Très souvent, seul le réchauffement climatique est analysé dans les études. Cependant, la concentration sur une seule catégorie d'impact est une simplification majeure qui ne répond pas aux exigences d'une ACV [10].

Des études ACV complètes ont été néanmoins réalisées. Les catégories d'impact signalées sont principalement l'acidification de l'air, l'eutrophisation, la santé humaine et l'effet de serre. Les résultats varient selon les études. En général, on peut dire que dans toutes les études, les VE fonctionnent mieux que les autres solutions (véhicules hybrides, à carburant alternatif et conventionnels). Ceci est même vrai pour les VE fonctionnant à l'électricité à base de charbon [10].

L'analyse de Notter et al. (2010) [7] se concentre sur la contribution des batteries lithium-ion à l'impact environnemental des véhicules électriques. Par conséquent, l'ensemble du véhicule est analysé grossièrement. Le mix électrique européen est appliqué. La consommation d'énergie est basée sur le NEDC. Le potentiel d'épuisement abiotique, la demande d'énergie cumulée non renouvelable, le potentiel de réchauffement planétaire ont été évalués. L'EV est plus performant dans toutes les catégories, le véhicule conventionnel affichant des résultats environ 25 à 65% plus élevés. Les auteurs trouvent que les résultats sont sensibles au mix électrique mais pas à la consommation d'énergie.

Szczechowicz et al. (2012) [15] ont réalisés une ACV complète pour un véhicule électrique, hybride et conventionnel. L'inventaire des véhicules ont été tirés des autres études. Le NEDC est appliqué pour calculer la consommation d'énergie des véhicules. Le document contient la liste la plus complète de catégories d'impact avec un total de 22 pour l'ACV complète. Les véhicules électriques fonctionnent mieux dans environ la moitié des catégories.

Hawkins et al. (2013) [40] comparent les véhicules électriques et conventionnels. Les auteurs publient un inventaire détaillé d'un VE basé sur des données de la base de données Ecoinvent v2.2 pour la phase de production et de fin de vie. La phase d'utilisation est basée sur le NEDC. Dix catégories d'impacts ont été présentées (réchauffement climatique, acidification terrestre, formation de particules, formation d'oxydation photochimique, toxicité humaine, écotoxicité des eaux douces et terrestres, eutrophisation de l'eau douce, ressources minérales et épuisement des fossiles). Les auteurs trouvent que les résultats dépendent de manière significative de la source d'électricité, de l'utilisation de la consommation d'énergie de phase, de la durée de vie du véhicule et des horaires de remplacement des batteries (par ordre décroissant). En outre, on constate que l'impact environnemental de la production de véhicules électriques a des impacts environnementaux plus élevés que la production de véhicules conventionnels. Les auteurs introduisent l'idée que les véhicules électriques sont moins performants dans les catégories d'impact de l'eutrophisation de l'eau douce, de la toxicité humaine, de l'écotoxicité de l'eau douce et de l'épuisement des ressources minérales. Les résultats sont présentés sur la figure 3.5.

L'étude de Bartolozzi et al. (2013) [22] compare l'utilisation de véhicules à pile à combustible avec les véhicules conventionnels et les véhicules électriques en Toscane, en Italie. L'étude se concentre sur les véhicules à pile à combustible et les différentes méthodes de production d'hydrogène. Trois scénarios de référence différents de VE avec différents mix électriques ont été calculés (électricité éolienne, électricité issue de la gazéification de la biomasse, mix électrique italien). Les résultats sont présentés pour dix catégories d'impact : appauvrissement abiotique, acidification, eutrophisation, réchauffement de la planète, appauvrissement de la couche d'ozone, écotoxicité aquatique, marine aquatique et terrestre, toxicité humaine et oxydation photochimique. Les auteurs concluent qu'en général, les véhicules électriques fonctionnent mieux que les véhicules à pile à combustible.

Enfin, Girardi et al. (2015) réalisent une évaluation comparative d'un véhicule électrique et conventionnel dans les conditions italiennes en se concentrant sur le mix électrique. Les

résultats ont été rapportés pour la demande d'énergie primaire, le changement climatique, la formation photochimique, l'acidification, l'eutrophisation, l'épuisement des ressources, la toxicité humaine et les particules. La consommation d'énergie supposée a été dérivée des données italiennes. Deux scénarios ont été envisagés : une faible consommation et une longue durée de vie de la batterie et une consommation plus élevée et une durée de vie plus courte de la batterie. Les auxiliaires ne sont pas considérés séparément. Le VE fonctionne mieux dans presque toutes les catégories d'impact, à l'exception de la toxicité humaine et de l'eutrophisation.

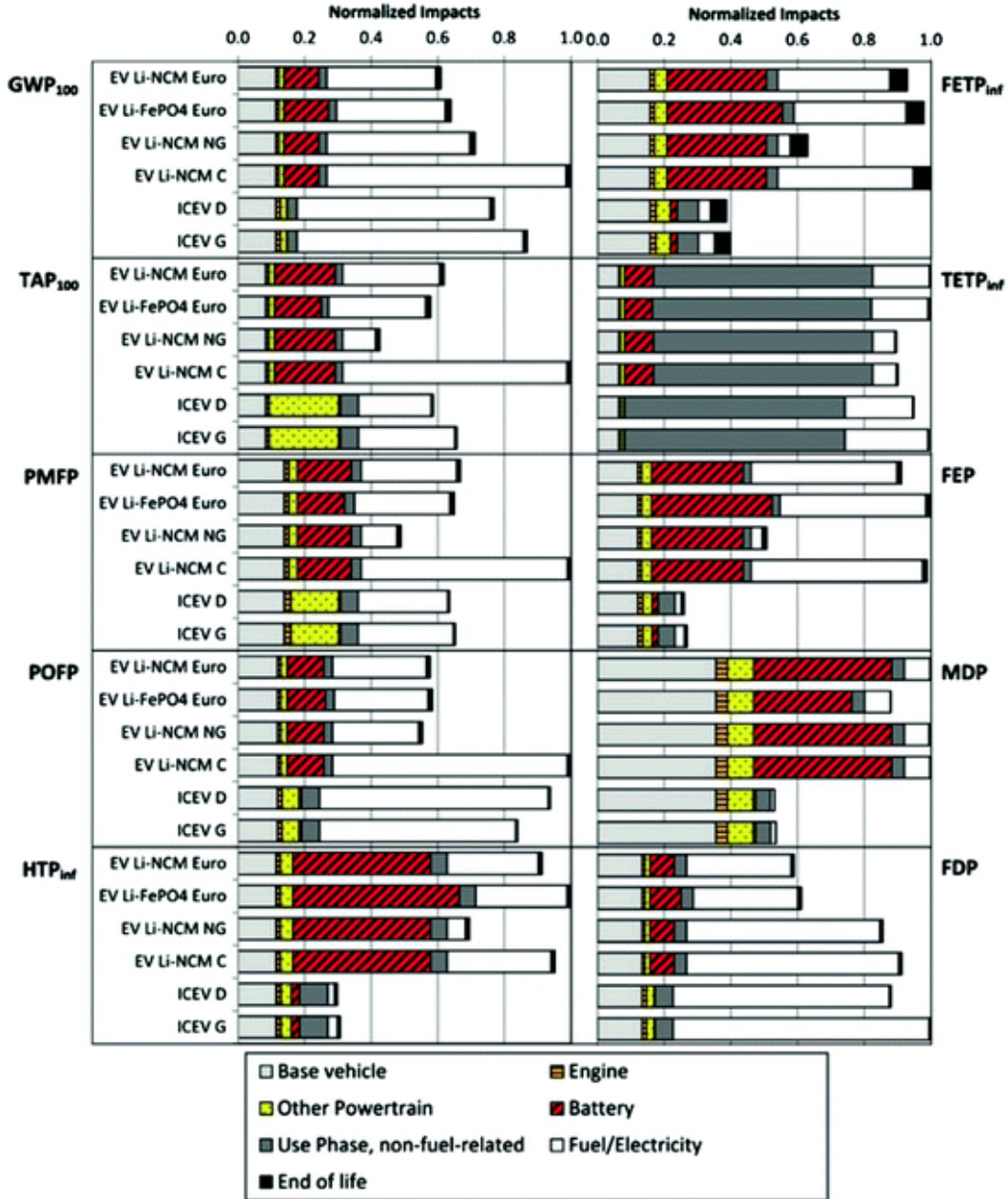


FIGURE 3.5: Impacts normalisés des VE et des véhicules conventionnels [40]; réchauffement climatique (GWP), acidification terrestre (TAP), formation de particules (PMFP), formation d'oxydation photochimique (POFP), toxicité humaine (HTP), écotoxicité de l'eau douce (FETP), écotoxicité terrestre (TETP), eutrophication de l'eau douce (FEP), épuisement des ressources minérales (MDP), potentiel d'épuisement des fossiles (FDP), véhicule à moteur à combustion interne (ICEV), diesel (D), essence (G), véhicule électrique (EV), lithium fer phosphate (LiFePO₄), lithium nickel cobalt manganèse (LiNCM), charbon (C), gaz naturel (GN), mix électrique européen (Euro)

Chapitre 4

Conclusion

Les défis environnementaux actuels des véhicules motorisés - les émissions de gaz à effet de serre (GES), la pollution atmosphérique locale et l'utilisation des ressources fossiles - ont conduit au développement de technologies visant à réduire ces impacts environnementaux. La mise en oeuvre des véhicules électriques (VE) est l'une de ces options. Cependant, si les véhicules électriques fonctionnent réellement mieux que les véhicules conventionnels classiques, elle dépend des conditions d'utilisation (le mix électrique, la température ambiante et le modèle d'utilisation)

L'analyse de l'état de la recherche a montré que de nombreux aspects pertinents pour l'évaluation des véhicules électriques, ont été couverts par différentes publications. Cependant, sur la base des critiques de quelques auteurs [21], aucune étude ne contient une évaluation complète des véhicules électriques. En général, plus d'études incluent l'analyse de l'inventaire des carburants et de l'électricité que l'analyse de l'inventaire du véhicule lui-même. Les détails relatifs aux composants clés du véhicule tels que la batterie ou la transmission sont encore moins documentés. Les effets de l'acidification (SO_2 , NO_x), du smog (CH_4) et de la toxicité, sont les résultats le plus fréquemment rapporté. Compte tenu de la complexité de la chaîne d'approvisionnement des véhicules, il existe peu de données pour l'analyse de l'inventaire bien transparent pour les véhicules électriques, une situation qui est susceptible de provoquer des erreurs importantes associées à une omission ou à une représentation insuffisante des processus de production.

Références

- [1] ISO 14040. *Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework*. INTERNATIONAL STANDARD, 2006.
- [2] ISO 14041. *Environmental management - Life cycle assessment - Goal and scope definition and inventory analysis*. INTERNATIONAL STANDARD, 1998.
- [3] ISO 14043. *Environmental management - Life cycle assessment - Life cycle interpretation*. INTERNATIONAL STANDARD, 2000.
- [4] Del Duce A, Egede P, Öhlschläger G, Dettmer T, Althaus H, Bütler T, and Szczechowicz E. Guidelines for the lca of electric vehicles. Technical report, eLCAr, European Green Cars Initiative, LCA,, 2013.
- [5] Del Duce A, Egede P, Öhlschläger G, Dettmer T, Althaus H, Bütler T, and Szczechowicz E. Guidelines for the lca of electric vehicles. Technical report, European Union, 2013.
- [6] Nanaki E A and Koroneos C J. Comparative economic and environmental analysis of conventional ,hybrid and electric vehicles the case study of greece. *J Clean Prod*, 53 :261–266, 2013.
- [7] Notter D A, Gauch M, Widmer R, Wäger P, Stamp A, Zah R, and Althaus H. Contribution of li-ion batteries to the environmental impact of electric vehicles. *Environ Sci Technol*, 44(17) :6550–6556, 2010.
- [8] Windecker A and Ruder A. Fuel economy, cost, and greenhouse gas results for alternative fuel vehicles in 2011. *Transp Res Part D : Transp Environ*, 23 :34–40, 2013.
- [9] Samaras C and Meisterling K. Life cycle assessment of greenhouse gas emissions from plug-in hybrid vehicles : Implications for policy. *Environ Sci Technol*, 42(9) :3170–3176, 2008.

- [10] Weiller C. Plug-in hybrid electric vehicle impacts on hourly electricity demand in the united states. *Energy Policy*, 39(6) :66–78, 2011.
- [11] F. Castells, V. Aelion, K.G. Abeliotis, and D.P. Petrides. An algorithm for life-cycle inventory. *AICHE Sym. Series Pollut. Prev. via Process Prod. Modifications*, 90(303) :151–160, 1995.
- [12] Alternative Fuels Data Center. How do all-electric cars work? Technical report, U.S. Department of Energy’s Office of Energy Efficiency and Renewable Energy’s, 2020.
- [13] C. H. Dharmakeerthi, N. Mithulananthan, and T. Saha. Overview of the impacts of plug-in electric vehicles on the power grid. *IEEE*, pages 1–8, 2011.
- [14] Meissner Schau E. and Magerholm F A. Lca studies of food products as background for environmental product declarations. *Environmental Product Declarations*, 2008.
- [15] Szczechowicz E, Dederichs T, and Schnettler A. Regional assessment of local emissions of electric vehicles using traffic simulations for a use case in germany. *Int J Life Cycle Assess*, 17(9) :1131–1141, 2012.
- [16] Patricia Egede. *Environmental Assessment of Lightweight Electric Vehicles*. Springer, 2017.
- [17] Patricia Egede, Tina Dettmer, and Christoph Herrmann and Sami Kara. Life cycle assessment of electric vehicles - a framework to consider influencing factors. *Procedia CIRP*, 29 :233–238, 2015.
- [18] International Transport Forum. Reducing transport greenhouse gas emissions : trends and data. Technical report, <https://www.itf-oecd.org/all-transport>, 2010.
- [19] Paolo Frankl and Frider Rubik. *Life Cycle Assessment in Industry and Business*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2000.
- [20] M. Hauschild and H. Wenzel. *Environmental Assessment of Products - Scientific Background*. Chapman & Hall, London., 1998.
- [21] Troy R. Hawkins, Ola Moa Gausen, and Anders Hammer Strømman. Environmental impacts of hybrid and electric vehicles - a review. *Int J Life Cycle Assess*, 17 :997–1014, 2012.
- [22] Bartolozzi I, Rizzi F, and Frey M. Comparison between hydrogen and electric vehicles by life cycle assessment : a case study in tuscany, italy. *Appl Energy*, 101 :103–111, 2013.

- [23] Park W J, Song K B, and Park J W. Impact of electric vehicle penetration-based charging demand on load profile. *J Electr Eng Technol*, 8(2) :244–251, 2013.
- [24] O. Jolliet, R. Müller-Wenk, and J. et al. Bare. The lcia midpoint-damage framework of the unep/setac life cycle initiative. *Int J LCA*, 9 :394–404, 2004.
- [25] Straif K, Cohen A, and Samet J. *Air pollution and cancer*, volume 161. IARC Scientific Publication, 2013.
- [26] Hartmann N and Özdemir ED. Impact of different utilizations cenarios of electric vehicles on the german grid in 2030. *J Power Sources*, 196(4) :2311–2318, 2011.
- [27] ST/ESA/SER.A/420 Nations Unies. World urbanization prospects : the 2018 revision. Technical report, <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Report.pdf>, 2020.
- [28] Anders Nordelöf, Maarten Messagie, Anne-Marie Tillman, Maria Ljunggren Söderman, and Joeri Van Mierlo. Environmental impacts of hybrid, plug-in hybrid, and battery electric vehicles - what can we learn from life cycle assessment? *Int J Life Cycle Assess (2014) 19 :1866–1890*, 19 :1866–1890, 2014.
- [29] Jolliet O., Saadé M., Crettaz P., and Shaked S. *Environmental Life Cycle Assessment*. Taylor and Francis Group, 2016.
- [30] Jolliet O., Saade M., and Crettaz P. *Analyse du cycle de vie : comprendre et réaliser un écobilan*. Presses polytechniques et universitaires romandes, 2005.
- [31] D.W. Pennington, J. Potting, G. Finnveden, E. Lindeijer, O. Jolliete, T. Rydberg, and G. Rebitzere. Life cycle assessment part 2 : Current impact assessment practice. *Environment International*, 30 :721–739, 2004.
- [32] Sioshansi R and Miller J. Plug-in hybrid electric vehicles can be cleanand economical indirty power systems. *Energy Policy*, 39(10) :6151–6161, 2011.
- [33] Zoboli R, Barbiroli G, Leoncini R, and Mazzanti Ma nd Montresor S. Regulation and innovation in the area of end-of-life vehicles. Technical report, European Commission, Institute for Prospective Technology Studies, 2000.
- [34] G. Rebitzer, T. Ekvall, R. Frischknecht, D. Hunkeler, G. Norris, T. Rydberg, W.-P. Schmidt, S. Suh, B.P. Weidema, and D.W. Pennington. Life cycle assessment part 1 : Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. *Environment International*, 30 :701–720, 2004.

- [35] Jingzheng Ren and Sara Toniolo. *Life cycle sustainability assessment for decision-making*. Elsevier Inc., 2020.
- [36] Kahn Ribeiro S, Kobayashi S, Beuthe M, Gasca J, Greene D, Lee DS, Muromachi P, Newton J, Plotkin S, Sperling D, Wit R, and Zhou PJ. *Climate change 2007 : mitigation : contribution of working group III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, chapter Transport and its infrastructure. Cambridge University Press, 2007.
- [37] Gass V Schmidt and Schmid E. J. Analysis of alternative policy instruments to promote electric vehicles in austria. *Renew Energy*, 61 :96–101, 2014.
- [38] Guido Sonnemann, Francesc Castells, and Marta Schuhmacher. *Integrated life-cycle and risk assessment for industrial processes*. CRC Press LLC, 2004.
- [39] Lim SS, Vos T, Flaxman A D, Danaei G, Shibuya K, Adair-Rohani H, AlMazroa MA, Amann M, Anderson HR, Andrews KG, and Aryee M. (2012) a comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990-2010 : a systematic analysis for the global burden of disease study. *The Lancet*, 380(9859) :2224–2260, 2010.
- [40] Hawkins TR, Singh B, Majeau-Bettez G, and Strømman AH. Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles. *J Ind Ecol*, 17(1) :53–64, 2013.
- [41] Hawkins TR, Gausen OM, and Strømman AH. Environmental impacts of hybrid and electric vehicles-a review. *Int J Life Cycle Assess*, 17(8) :997–1014, 2012.
- [42] H.A. Udo de Haes, O. Joillet, G. Finnveden, M. Hauschild, and R. Krewitt, W. and Mueller-Wenk. Best available practice regarding categories and category indicators in lifecycle impact assessment, background document for the second working group on lcia of setac-europe. *Int. J. LCA*, 4(66-74) :167–174, 1999.
- [43] V.K. ; Tan K.M. ; Mithulananthan N. A Yong, J.Y. ; Ramachandaramurthy. Review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects. *renew. Sustain. Energy Rev.*, 49 :365–385, 2015.

Résumé :

L'analyse du cycle de vie (ACV) est un outil qui peut être utilisé pour évaluer la charge environnementale d'un produit, processus ou activité tout au long de son cycle de vie. Les utilisateurs actuels de l'ACV sont un mélange d'individus ayant des compétences dans diverses disciplines qui souhaitent évaluer leurs produits, processus ou activités dans le contexte du cycle de vie. Cette étude tente de présenter quelques études d'évaluation du cycle de vie des produits alimentaires agricoles et industriels. Les impacts environnementaux des véhicules électriques (VE) dépendent en partie des paramètres de leur site d'exploitation. Les différences dans les habitudes de conduite moyennes selon les lieux géographiques, l'utilisation du chauffage et de la climatisation en raison des conditions climatiques locales affectent la consommation d'énergie des véhicules électriques. Les véhicules électriques ont été proposés comme une option de transport plus durable; Cependant, la performance environnementale et économique des véhicules électriques (VE) tout au long de leur cycle de vie par rapport aux véhicules à combustion interne conventionnels (PCI) est controversée. Analyse intégrée des coûts énergétiques, des gaz à effet de serre et des véhicules électriques à cycle de vie. Un inventaire modèle et cycle de vie de deux technologies pour les véhicules électriques: les véhicules électriques à batterie (BEV) et les véhicules connectés électriquement (PHEV40 et PHEV20) ont été réalisés, comparés aux véhicules à moteur à combustion interne classiques (essence et diesel) pour deux types de véhicules (compact et compact). Exigences d'alimentation primaire

تلخيص

تقييم دورة الحياة (LCA) هو أداة يمكن استخدامها لتقييم الحمل البيئي لمنتج أو عملية أو نشاط طوال دورة حياته. مستخدمو (LCA) الحاليون هم مزيج من الأفراد ذوي المهارات في مختلف التخصصات الذين يرغبون في تقييم منتجاتهم أو عملياتهم أو أنشطتهم في سياق دورة الحياة. تحاول هذه الدراسة تقييم دورة الحياة للمنتجات الغذائية الزراعية والصناعية. تعتمد التأثيرات البيئية للسيارات الكهربائية جزئياً على معايير موقع التشغيل الخاص بها. تؤثر الاختلافات في متوسط عادات القيادة حسب الموقع الجغرافي استهلاك الطاقة للمركبات الكهربائية. تم اقتراح السيارات الكهربائية كخيار نقل أكثر استدامة؛ ومع ذلك، فإن الأداء البيئي والاقتصادي مثير للجدل. التحليل المتكامل (PCI) طوال دورة حياتها مقارنة بمركبات الاحتراق الداخلي التقليدية (EVs) للسيارات الكهربائية لتكاليف الطاقة والغازات الدفينة والمركبات الكهربائية ذات دورة الحياة. تم إجراء جرد نموذج ودورة حياة لتقنيتين للمركبات، مقارنة (PHEV40 و PHEV20) والمركبات المتصلة كهربائياً (BEV) الكهربائية: المركبات الكهربائية ذات البطاريات بالمركبات ذات محركات الاحتراق الداخلي التقليدية (البنزين والديزل) (لنوعين من المركبات (مدمجة ومدمجة). متطلبات الطاقة الأولية

Abstract

Life cycle assessment (LCA) is a tool that can be used to evaluate the environmental load of a product, process or activity throughout its life cycle. Current users of LCA are a mix of individuals with expertise in various disciplines who wish to assess their products, processes or activities in the life cycle context. This study attempts to present some life cycle assessment studies of agricultural and industrial food products. The environmental impacts of electric vehicles (EVs) depend in part on the parameters of their operating site. Differences in average driving habits according to geographical location and the use of heating and air conditioning due to local climatic conditions affect the energy consumption of electric vehicles. Electric cars have been proposed as a more sustainable transportation option; however, the lifecycle environmental and economic performance of electric vehicles (EVs) compared to conventional internal combustion vehicles (ICEs) is controversial. Integrated Analysis of Energy Costs, Greenhouse Gases and Life-Cycle Electric Vehicles. A model and life-cycle inventory of two electric vehicle technologies: Battery Electric Vehicles (BEVs) and Electrically Connected Vehicles (PHEV40 and PHEV20), compared to vehicles with conventional internal combustion engines (gasoline and diesel), has been carried out for two types of vehicles (compact and compact). Primary power supply requirements