



HAL
open science

Evaluation environnementale du véhicule électrique : méthodologies et application

Marie-Lou Picherit

► **To cite this version:**

Marie-Lou Picherit. Evaluation environnementale du véhicule électrique : méthodologies et application. Autre. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2010. Français. NNT : 2010EMSE0578 . tel-00666955

HAL Id: tel-00666955

<https://theses.hal.science/tel-00666955>

Submitted on 6 Feb 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



N° d'ordre : 2010 EMSE 0578

THÈSE

présentée par

Marie-Lou PICHERIT

Pour obtenir le grade de
Docteur de l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne
Spécialité : Sciences et génie de l'environnement

***Evaluation environnementale du véhicule électrique :
Méthodologies et application***

Soutenue au centre EDF R&D les Renardières, Ecuelles, le 27 septembre 2010

Membres du jury

| | | |
|----------------------|---|---|
| Président : | Denis ABLITZER | Professeur, Ecole des Mines de Nancy |
| Rapporteurs : | Marie-Noëlle PONS Michel ANDRE | Directeur de recherche, Université de Nancy Directeur de recherche, INRETS, Bron |
| Examineur(s) : | Valérie LAFOREST Isabelle BLANC Denis LE BOULCH | Maître de recherche, Ecole des Mines de Saint Etienne Maître de recherche, MINES ParisTech Ingénieur Expert / EDF R&D, Ecuelles |
| Directeur de thèse : | Jacques BOURGOIS | Professeur / Ecole des Mines de Saint-Etienne |

Spécialités doctorales :

SCIENCES ET GENIE DES MATERIAUX
 MECANIQUE ET INGENIERIE
 GENIE DES PROCÉDES
 SCIENCES DE LA TERRE
 SCIENCES ET GENIE DE L'ENVIRONNEMENT
 MATHEMATIQUES APPLIQUEES
 INFORMATIQUE
 IMAGE, VISION, SIGNAL
 GENIE INDUSTRIEL
 MICROELECTRONIQUE

Responsables :

J. DRIVER Directeur de recherche – Centre SMS
 A. VAUTRIN Professeur – Centre SMS
 G. THOMAS Professeur – Centre SPIN
 B. GUY Maître de recherche – Centre SPIN
 J. BOURGOIS Professeur – Centre SITE
 E. TOUBOUL Ingénieur – Centre G2I
 O. BOISSIER Professeur – Centre G2I
 JC. PINOLI Professeur – Centre CIS
 P. BURLAT Professeur – Centre G2I
 Ph. COLLOT Professeur – Centre CMP

Enseignants-chercheurs et chercheurs autorisés à diriger des thèses de doctorat (titulaires d'un doctorat d'État ou d'une HDR)

| | | | | |
|-------------------|----------------|-------------|-------------------------------------|------|
| AVRIL | Stéphane | MA | Mécanique & Ingénierie | CIS |
| BATTON-HUBERT | Mireille | MA | Sciences & Génie de l'Environnement | SITE |
| BENABEN | Patrick | PR 1 | Sciences & Génie des Matériaux | CMP |
| BERNACHE-ASSOLANT | Didier | PR 0 | Génie des Procédés | CIS |
| BIGOT | Jean-Pierre | MR | Génie des Procédés | SPIN |
| BILAL | Essaïd | DR | Sciences de la Terre | SPIN |
| BOISSIER | Olivier | PR 1 | Informatique | G2I |
| BOUCHER | Xavier | MA | Génie Industriel | G2I |
| BOUDAREL | Marie-Reine | PR 2 | Génie Industriel | DF |
| BOURGOIS | Jacques | PR 0 | Sciences & Génie de l'Environnement | SITE |
| BRODHAG | Christian | DR | Sciences & Génie de l'Environnement | SITE |
| BURLAT | Patrick | PR 2 | Génie industriel | G2I |
| COLLOT | Philippe | PR 1 | Microélectronique | CMP |
| COURNIL | Michel | PR 0 | Génie des Procédés | SPIN |
| DAUZERE-PERES | Stéphane | PR 1 | Génie industriel | CMP |
| DARRIEULAT | Michel | IGM | Sciences & Génie des Matériaux | SMS |
| DECHOMETTS | Roland | PR 1 | Sciences & Génie de l'Environnement | SITE |
| DESRAYAUD | Christophe | MA | Mécanique & Ingénierie | SMS |
| DELAFOSSSE | David | PR 1 | Sciences & Génie des Matériaux | SMS |
| DOLGUI | Alexandre | PR 1 | Génie Industriel | G2I |
| DRAPIER | Sylvain | PR 2 | Mécanique & Ingénierie | SMS |
| DRIVER | Julian | DR 0 | Sciences & Génie des Matériaux | SMS |
| FEILLET | Dominique | PR 2 | Génie Industriel | CMP |
| FOREST | Bernard | PR 1 | Sciences & Génie des Matériaux | CIS |
| FORMISYN | Pascal | PR 1 | Sciences & Génie de l'Environnement | SITE |
| FORTUNIER | Roland | PR 1 | Sciences & Génie des Matériaux | SMS |
| FRACZKIEWICZ | Anna | DR | Sciences & Génie des Matériaux | SMS |
| GARCIA | Daniel | MR | Génie des Procédés | SPIN |
| GIRARDOT | Jean-Jacques | MR | Informatique | G2I |
| GOEURIOT | Dominique | MR | Sciences & Génie des Matériaux | SMS |
| GRAILLOT | Didier | DR | Sciences & Génie de l'Environnement | SITE |
| GROSSEAU | Philippe | MR | Génie des Procédés | SPIN |
| GRUY | Frédéric | MR | Génie des Procédés | SPIN |
| GUY | Bernard | MR | Sciences de la Terre | SPIN |
| GUYONNET | René | DR | Génie des Procédés | SPIN |
| HERRI | Jean-Michel | PR 2 | Génie des Procédés | SPIN |
| INAL | Karim | PR 2 | Microélectronique | CMP |
| KLÖCKER | Helmut | DR | Sciences & Génie des Matériaux | SMS |
| LAFORREST | Valérie | CR | Sciences & Génie de l'Environnement | SITE |
| LERICHE | Rodolphe | CR CNRS | Mécanique et Ingénierie | SMS |
| LI | Jean-Michel | EC (CCI MP) | Microélectronique | CMP |
| LONDICHE | Henry | MR | Sciences & Génie de l'Environnement | SITE |
| MALLIARAS | George Grégory | PR 1 | Microélectronique | CMP |
| MOLIMARD | Jérôme | MA | Mécanique et Ingénierie | SMS |
| MONTHEILLET | Frank | DR 1 CNRS | Sciences & Génie des Matériaux | SMS |
| PERIER-CAMBY | Laurent | PR 2 | Génie des Procédés | SPIN |
| PIJOLAT | Christophe | PR 1 | Génie des Procédés | SPIN |
| PIJOLAT | Michèle | PR 1 | Génie des Procédés | SPIN |
| PINOLI | Jean-Charles | PR 0 | Image, Vision, Signal | CIS |
| STOLARZ | Jacques | CR | Sciences & Génie des Matériaux | SMS |
| SZAFNICKI | Konrad | MR | Sciences & Génie de l'Environnement | SITE |
| THOMAS | Gérard | PR 0 | Génie des Procédés | SPIN |
| TRIA | Assia | | Microélectronique | CMP |
| VALDIVIESO | François | MA | Sciences & Génie des Matériaux | SMS |
| VAUTRIN | Alain | PR 0 | Mécanique & Ingénierie | SMS |
| VIRICELLE | Jean-Paul | MR | Génie des procédés | SPIN |
| WOLSKI | Krzysztof | DR | Sciences & Génie des Matériaux | SMS |
| XIE | Xiaolan | PR 1 | Génie industriel | CIS |

Glossaire :

PR 0 Professeur classe exceptionnelle
 PR 1 Professeur 1^{ère} catégorie
 PR 2 Professeur 2^{ème} catégorie
 MA(MDC) Maître assistant
 DR Directeur de recherche
 Ing. Ingénieur
 MR(DR2) Maître de recherche
 CR Chargé de recherche
 EC Enseignant-chercheur
 IGM Ingénieur général des mines

Dernière mise à jour le : 9 mars 2010

Centres :

SMS Sciences des Matériaux et des Structures
 SPIN Sciences des Processus Industriels et Naturels
 SITE Sciences Information et Technologies pour l'Environnement
 G2I Génie Industriel et Informatique
 CMP Centre de Microélectronique de Provence
 CIS Centre Ingénierie et Santé

Remerciements

Je voudrais exprimer ici toute ma gratitude envers Mary-Ann EVANS, Denis LEBOULCH, Vanessa REGAUDIE et Thierry BRINCOURT, pour m'avoir encadrée pendant cette thèse, et pour le temps qu'ils ont su me consacrer et leurs observations toujours enrichissantes.

Je remercie également le Professeur Jacques BOURGOIS qui a dirigé mes travaux.

Je tiens également à remercier les membres du jury. Merci d'avoir accepté de juger ce travail de thèse : Denis ABLITZER, Marie-Noëlle PONS, Michel ANDRE, Valérie LAFOREST et Isabelle BLANC.

Je remercie tout particulièrement MICROCAR, pour nous avoir prêté des prototypes de véhicules électriques pour la réalisation des essais, et l'équipe du Laboratoire Transport et Environnement de l'INRETS, dans lequel les véhicules ont été expérimentés.

Je tiens aussi à remercier tous les membres du groupe « Evaluation Environnementale et expertise déchet » pour leur accueil chaleureux. Merci de m'avoir accompagnée pendant ces années....

Merci enfin à mes proches, dont j'apprécie, chaque jour, le soutien constant.

Un grand merci à tous !!

SOMMAIRE

| | |
|---|-----------|
| SOMMAIRE | 1 |
| Glossaire | 7 |
| | |
| INTRODUCTION | 9 |
| | |
| Partie 1 : Choix de l'ACV comme outil d'évaluation environnementale du véhicule électrique | 13 |
| | |
| 1. De la nécessité d'évaluer les performances environnementales du véhicule électrique | 15 |
| 1.1. Contexte et enjeux multiples du secteur du transport | 15 |
| 1.1.1. La croissance de la mobilité..... | 15 |
| 1.1.2. La croissance de la demande en énergie..... | 16 |
| 1.1.3. Le contexte environnemental | 17 |
| A. Les émissions de gaz à effet de serre..... | 17 |
| B. Les gaz d'échappement automobiles : composition et législation | 18 |
| C. Les émissions hors échappement | 21 |
| 1.1.4. Bilan | 23 |
| 1.2. Problématiques spécifiques au véhicule électrique..... | 24 |
| 1.2.1. Le véhicule électrique : un vieux candidat en plein essor | 24 |
| 1.2.2. Les aspects liés au stockage d'énergie | 25 |
| A. Rappels : structure et principes de bases | 25 |
| B. Caractéristiques nécessaires pour l'application automobile | 26 |
| C. Les différentes technologies de batteries envisageables | 27 |
| D. Bilan récapitulatif : comparaison des technologies existantes | 29 |
| 1.2.3. Les aspects liés à la consommation | 30 |
| | |
| 2. L'ACV pour l'évaluation environnementale des véhicules électriques | 32 |
| 2.1. Méthodes d'évaluations environnementales dans le secteur automobile | 32 |
| 2.1.1. Mesure d'émissions directes | 32 |
| A. Principes..... | 32 |
| B. Limites de l'approche..... | 35 |
| 2.1.2. L'analyse de cycle de vie..... | 36 |

SOMMAIRE

| | | |
|--|--|-----------|
| 2.2. | Analyse et choix | 38 |
| 2.3. | Présentation de la méthode ACV | 38 |
| 2.3.1. | Description de l'ACV | 38 |
| 2.3.2. | Les étapes de l'ACV..... | 39 |
| A. | Etape 1 : Définition des objectifs et du système (Goal & Scope)..... | 39 |
| B. | Etape 2 : L'inventaire | 41 |
| C. | Etape 3 : L'interprétation d'inventaire, les indicateurs d'impacts potentiels ACV | 43 |
| D. | Etape 4 : L'interprétation | 46 |
| 2.3.3. | Les limites de l'ACV..... | 47 |
| 2.3.4. | Les ACV dans le secteur automobile | 48 |
| A. | Utilisation générale de l'ACV | 48 |
| B. | Les premières ACV appliquées au VE : convergences et divergences | 49 |
| 3. | Problématiques et questions de recherche | 54 |
| | | |
| Partie 2 : Spécificités de l'évaluation environnementale du VE - Usages, consommations et batteries | | |
| 57 | | |
| 1. | Spécificités de l'ACV du VE..... | 59 |
| 1.1. | Nature du service rendu..... | 59 |
| 1.1.1. | Réflexion sur l'unité fonctionnelle | 59 |
| 1.1.2. | Spécification de l'unité fonctionnelle..... | 60 |
| 1.2. | Nature du système étudié..... | 61 |
| 1.2.1. | Une technologie encore en développement..... | 61 |
| 1.2.2. | Que l'ACV peut évaluer via des analyses de sensibilité et scénarios ?..... | 62 |
| 1.2.3. | En déduire les paramètres clés..... | 63 |
| 2. | Détermination des usages et cycles associés – Evaluation des consommations et des émissions | 64 |
| 2.1. | Notion d'usage | 66 |
| 2.1.1. | Identification des facteurs clés de la phase d'utilisation | 66 |
| 2.1.2. | Quels usages ? | 68 |
| A. | Usages potentiels des VE | 68 |
| B. | Répartition des usages sur le réseau routier | 69 |
| C. | L'utilisation des auxiliaires | 70 |
| D. | Spécification des usages dans l'unité fonctionnelle | 70 |
| 2.1.3. | Nécessité d'un modèle | 72 |

| | | |
|--|--|------------|
| 2.2. | De l'usage aux consommations spécifiques..... | 72 |
| 2.2.1. | Présentation des véhicules étudiés et des cycles de conduite retenus | 72 |
| A. | Les véhicules étudiés | 72 |
| B. | Détermination des cycles retenus pour les essais | 74 |
| C. | Bilan récapitulatif | 80 |
| 2.2.2. | Expérimentation de véhicules | 80 |
| A. | Définition préalable | 80 |
| B. | Rappels des objectifs | 80 |
| C. | Procédure d'essais | 81 |
| D. | Résultats :..... | 84 |
| E. | Bilan des essais | 90 |
| 2.3. | Des essais au modèle | 91 |
| A. | Objectifs..... | 91 |
| B. | Principe | 91 |
| C. | Validation | 95 |
| 3. | Détermination des paramètres spécifique à l'usage de la batterie..... | 95 |
| 3.1. | La durée de vie des batteries | 95 |
| 3.1.1. | Définition..... | 95 |
| 3.1.2. | Durée de vie cyclique et gestion de la charge | 96 |
| 3.1.3. | Mode de recharge | 97 |
| 3.2. | Etablissement de scénarios batteries..... | 98 |
| 3.2.1. | Principe..... | 98 |
| 3.2.2. | Batteries Plomb-acide | 98 |
| 3.2.3. | Batterie Nickel-Métal Hydrure | 101 |
| 3.2.4. | Les batteries Lithium | 103 |
| 3.2.5. | Scénarios retenus | 103 |
| 4. | Synthèse | 103 |
| | | |
| Partie 3 : Mise en perspective des résultats de la seconde partie - ACV d'un véhicule | | |
| électrique | | |
| 105 | | |
| 1. | Application de la méthodologie ACV à un petit véhicule électrique | 107 |
| 1.1. | Définition du champ de l'étude..... | 107 |
| 1.1.1. | Fonction et unité fonctionnelle | 107 |
| A. | Frontières du système | 108 |
| 1.1.2. | Méthodes d'évaluation des impacts du cycle de vie..... | 110 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 1.2. | Analyse de l'inventaire du cycle de vie | 112 |
| 1.2.1. | Description générale synthétique de l'inventaire du cycle de vie..... | 112 |
| A. | La phase de production..... | 112 |
| B. | La phase d'utilisation | 112 |
| C. | La phase d'élimination | 113 |
| 1.2.2. | Recueil des données..... | 114 |
| A. | Traçabilité et mise sur papier de la base | 114 |
| B. | Analyse de la qualité des données de l'inventaire..... | 114 |
| C. | Données d'inventaire..... | 118 |
| 1.3. | Evaluation de l'impact du cycle de vie | 119 |
| 1.4. | Interprétation du cycle de vie | 121 |
| 1.4.1. | Analyse des flux d'inventaire..... | 121 |
| A. | Bilan CO ₂ | 121 |
| B. | Bilan SOX..... | 122 |
| C. | Bilan NOx..... | 123 |
| D. | Bilan particules..... | 124 |
| E. | Bilan COV | 126 |
| 1.4.2. | Analyse des indicateurs d'impacts potentiels | 126 |
| A. | L'effet de serre..... | 127 |
| B. | L'acidification | 127 |
| C. | La consommation de ressources..... | 128 |
| D. | Les autres indicateurs | 131 |
| E. | Synthèse..... | 131 |
| 2. | Comparaison avec un véhicule thermique équivalent | 132 |
| 2.1. | Objectif et champ de l'étude:..... | 132 |
| 2.2. | Description générale synthétique du cycle de vie du VCI étudié | 132 |
| 2.3. | La consommation d'énergie primaire | 133 |
| 2.4. | Interprétation et comparaison des cycles de vie VE et VT..... | 134 |
| 2.5. | Synthèse | 137 |
| 3. | Analyse et études de sensibilité : importance des paramètres liés à la batterie ou l'usage | 138 |
| 3.1. | Les paramètres liés aux batteries..... | 139 |
| 3.1.1. | Sensibilité à la chimie de batterie..... | 139 |
| A. | Objectif de l'analyse..... | 139 |
| B. | Description synthétique des inventaires du cycle de vie des différentes batteries étudiées.... | 140 |
| C. | Analyse de l'indicateur d'impact potentiel « Effet de serre »..... | 141 |
| 3.1.2. | Sensibilité au paramètre « DV batterie » | 143 |

| | | |
|--------|--|------------|
| 3.1.3. | Synthèse et perspectives pour les paramètres liés à la batterie | 143 |
| 3.2. | Sensibilité aux hypothèses liées au VE et son utilisation | 144 |
| 3.2.1. | Sensibilité à la durée de vie kilométrique et calendaire du véhicule | 144 |
| A. | Sensibilité à la durée de vie du VE en années..... | 144 |
| B. | Sensibilité à la durée de vie kilométrique..... | 145 |
| 3.2.2. | Synthèse | 147 |
| 3.2.3. | Sensibilité liée au mix énergétique utilisé lors de la phase d'usage..... | 147 |
| 3.2.4. | Synthèse et conclusion..... | 150 |
| 3.3. | Sensibilité liée à l'usage du véhicule..... | 150 |
| 3.3.1. | Objectif..... | 150 |
| 3.3.2. | Sensibilité aux différents scénarios d'usage..... | 151 |
| 3.3.3. | Influence de l'utilisation des auxiliaires..... | 153 |
| 3.3.4. | Conclusion et synthèse..... | 154 |
| 3.4. | Conclusion relatives aux analyses de sensibilités..... | 154 |
| | Conclusion | 157 |
| | Références bibliographiques | 161 |
| | Annexes..... | 167 |
| | Table des figures..... | 221 |
| | Table des tableaux..... | 225 |

Glossaire

ACV : Analyse de Cycle de Vie

ADEME : Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

CE : Commission Européenne

CML : Centrum voor Milieukunde Leiden

DC : Direct Current - Courant continu

DOD : Deep Of Discharge

DV : Durée de Vie

DVD : Digitale Versatile Disc

EQRS : Evaluation Quantitative des Risques Sanitaires

EUCAR : European Council of Automotive Research

GES : Gaz à Effet de Serre

GNV : Gaz Naturel Véhicule

GPL : Gaz de Pétrole Liquéfié

GPS : Global Positionning System

ICV : Inventaire de Cycle de Vie

IFP : Institut Français du Pétrole

INRETS : Institut National de REcherche sur les Transports et leur Sécurité

IP : Impact Potentiel

ISO : International Standard Organization

LFP : Lithium Fer Phosphate

LLD : Low Level of Discharge

LME : Laboratoire des Matériels Electriques - EDF R&D

LTE : Laboratoire Transport et Environnement, INRETS

MVEG : Motor Vehicle Emissions Group

NEDC : New European Driving Cycle

OCDE : Organisation de Coopération et de Développement Economique

PUNR : Pneumatique usagé non réutilisable

PUR : Pneumatique usagé réutilisable

RdB : Résidu de Broyage

SETAC : Society of Environmental Toxicology And Chemistry

SITE : Sciences, Informations et Technologies pour l'Environnement

SOC : State Of Charge

TEAM® : Tools for Environmental Analysis and Management - logiciel d'ACV, ECOBILAN

UF : Unité Fonctionnelle

VCI : Véhicule à Combustion Interne

VE : Véhicule Electrique

VH : Véhicule Hybride

VHR : Véhicule Hybride Rechargeable

WMO : World Meteorological Organization

INTRODUCTION

Contexte du secteur du transport

Si aujourd'hui, la source principale d'énergie utilisée par l'automobile est issue du pétrole, les débuts de l'histoire de ce mode de transport furent marqués par une concurrence réelle entre les différents modes de propulsion. En effet, au XIX^{ième} siècle, les premières automobiles utilisaient la vapeur, le pétrole et l'électricité. Ce n'est qu'au début du XX^{ième} siècle, que suite à des progrès techniques fulgurants, les moteurs à explosion utilisant les dérivés du pétrole se sont installés durablement, condamnant le développement des véhicules utilisant les autres sources d'énergies. Depuis lors, les chercheurs se sont surtout focalisés sur l'amélioration de ce type de moteur et de l'automobile en général (rendement, confort de conduite, aérodynamisme, sécurité, etc.). Il a fallu attendre la fin du XX^{ième} siècle pour que nous prenions conscience des limites liées à cette utilisation : épuisement des ressources fossiles, contribution à la modification climatique liée à l'effet de serre, émissions de polluants avec impacts sur l'environnement et la santé publique, pollutions sonores, s'ajoutant aux problèmes récurrents de sécurité routière et de congestion des centres-villes. Ces dommages, déjà considérables, sont amenés à s'amplifier dans les prochaines années, du fait de l'augmentation constante du nombre de véhicules (en particulier dans les pays en développement), de l'augmentation des distances parcourues, et de la demande accrue d'option de confort et de sécurité qui augmentent les émissions/consommations de véhicules.

Ainsi, l'enjeu majeur du transport est de satisfaire des besoins de mobilité toujours plus importants, en limitant les nuisances qu'ils peuvent générer. Dans ce but, des politiques de transports sont établies, visant à modifier les comportements individuels, encourager et mieux répartir l'usage des transports publics. Une évolution des modes de déplacement est envisagée avec notamment le recours à différentes solutions de transport pour un déplacement donné (véhicules particuliers, transport collectifs, etc.). Parallèlement, de nombreux développements technologiques sont menés: carburants de remplacement (agro-carburants, gaz naturel, gaz de pétrole liquéfié), optimisation des moteurs à combustion interne, développement des technologies électriques etc. Chacune de ces solutions doit être explorée, leur combinaison pouvant constituer un élément de réponse à la mobilité du futur.

Une connaissance plus fine des performances environnementales des alternatives au véhicule à combustion interne d'énergies fossiles est donc désormais nécessaire. Elle permettra par la suite d'identifier leurs complémentarités, et les besoins de la population auxquels elles répondent le mieux. L'analyse des problématiques environnementales liées aux véhicules particuliers permet

l'identification d'une série de critères sur lesquels les véhicules devront être évalués : niveau de consommation d'énergie fossile, d'émission de gaz à effet de serre, de polluants locaux (émissions à l'échappement et non échappement), d'émission sonore, et l'épuisement des ressources.

Enjeux et objectif de ces travaux de thèse

Les travaux de thèses menés concernent le véhicule électrique (VE), qui, de par le rendement de sa chaîne de traction, le recours à l'énergie électrique en phase d'usage, et l'absence d'émission à l'échappement, apparaît être une alternative séduisante. Son handicap majeur, l'autonomie, semble être réduit du fait des récents progrès des technologies de batteries. La commercialisation de différents modèles a d'ores et déjà été annoncée par la plupart des constructeurs automobiles et il devient essentiel d'en évaluer les forces et faiblesses au regard des critères précédemment identifiés, et d'en comparer les résultats à ceux des véhicules à combustion interne (VCI).

La méthode d'évaluation utilisée est l'analyse de cycle de vie (ACV), déjà largement appliquée aux véhicules, souvent pour comparer les solutions alternatives aux VCI. Elle permet la considération de l'intégralité du cycle de vie du système étudié : phase de construction (dont les batteries), d'usage, et de déconstruction. Au vu des particularités de la chaîne de traction du VE, il apparaît en effet essentiel d'intégrer ses étapes de production et d'élimination au périmètre de l'étude, pour repérer les éventuels transferts de pollution vers celles-ci.

L'application de l'ACV aux VE présente certaines difficultés, liées en grande partie à leur caractère émergent et au peu de retour d'expérience disponible. Peu de VE circulent aujourd'hui, et ceux annoncés seront équipés de nouvelles technologies, notamment au niveau des batteries. Dans ce contexte, les premières ACV de VE sont récentes ([HELMES, 2010], [SIMONS, 2010]), et difficiles à comparer du fait de la variabilité à la fois des données d'inventaire utilisées (nature du système, complétude du modèle, hypothèses liées à la phase d'usage, etc.) et des choix méthodologiques réalisés. Aujourd'hui, aucune étude ne s'est attachée à évaluer l'incidence de chacun de ces éléments sur les impacts potentiels de ces véhicules, pourtant, à l'heure où les premiers d'entre eux vont être commercialisés, ces questions apparaissent essentielles.

L'objectif de ce travail de recherche est d'identifier les paramètres clés et leurs incidences respectives sur le bilan environnemental des VE pour les différents critères environnementaux évalués. Un des préalables à cette identification est la collecte de données fiables, qui implique le recours à des compétences diverses (transports, stockage de l'énergie et évaluation environnementale). De plus, de récents travaux ayant identifié la gestion des incertitudes liées à l'inventaire des données

comme prioritaires [LEROY, 2009], les analyses de sensibilité sont utilisées pour identifier les données clés, sur lesquelles il sera important de réduire les incertitudes.

Par ailleurs, compte tenu du caractère mobile du système à évaluer et des limites de l'approche ACV quant à la prise en compte des paramètres spatio-temporels, il n'a pas été jugé judicieux d'évaluer les impacts sanitaires des émissions atmosphériques et sonores par cette méthode. Ainsi, ce mémoire se limitera aux questions relatives à la consommation d'énergies non renouvelables, au bilan des émissions atmosphériques sur l'effet de serre, l'eutrophisation et l'acidification. Ces travaux seront donc à compléter par d'autres indicateurs d'impacts environnementaux pour élargir son champ d'investigation.

Démarche

Le présent mémoire est constitué de trois parties. La première a pour objectif de poser la problématique de recherche, soulignant les difficultés à évaluer les impacts environnementaux des véhicules électriques du fait du manque d'expérience sur l'usage de ces véhicules et des progrès récents des technologies mises en œuvre. Dans un premier temps, il sera fait un point du contexte actuel du secteur automobile justifiant entre autres alternatives, l'essor de la technologie électrique. Après une description sommaire de ces véhicules, la méthode d'évaluation environnementale « Analyse de Cycle de Vie » sera présentée et son choix comme méthode d'analyse sera justifié. L'analyse comparative des convergences et divergences entre les différentes études publiées est réalisée et permet d'identifier les principales difficultés de mise en œuvre pour l'évaluation des véhicules électriques.

La seconde partie définira la démarche employée pour répondre aux spécificités de l'évaluation environnementale du VE. Les solutions retenues pour pallier les difficultés identifiées (notamment le manque de données représentatives) à la réalisation du bilan environnemental du véhicule électrique y seront détaillées.

La troisième et dernière partie est un cas concret d'application. Elle utilisera les données et méthodes définies précédemment pour évaluer l'impact environnemental d'un véhicule électrique à usage urbain. Dans un premier temps, les quatre étapes de l'ACV seront développées et les résultats interprétés au niveau de l'inventaire des flux d'énergie et de matières traversant le système, et au niveau de leurs impacts potentiels sur l'environnement. Dans un deuxième temps, les résultats obtenus seront comparés avec ceux obtenus pour un véhicule classique équivalent. Enfin, de nombreuses analyses de sensibilité (aux hypothèses méthodologiques, à la chimie des batteries en jeu, aux

INTRODUCTION

comportements de conduites et trafic, etc.) permettront l'identification des paramètres clés pouvant conduire à l'optimisation de l'impact environnemental des véhicules électriques.

**Partie 1 : Choix de l'ACV comme outil d'évaluation environnementale
du véhicule électrique**

1. De la nécessité d'évaluer les performances environnementales du véhicule électrique

1.1. Contexte et enjeux multiples du secteur du transport

1.1.1. La croissance de la mobilité

La mobilité des populations correspond au volume de déplacement des individus. Aujourd'hui, la mobilité motorisée des populations ne cesse de croître. Entre 1998 et 2010, tous moyens de transports confondus, le nombre de kilomètres parcourus par habitant européen a augmenté de 24 %. Or, la grande majorité (79 %) de ces kilomètres parcourus l'est en voiture [VAN MIERLO, 2006].

Parallèlement, le nombre de véhicules motorisés n'a cessé d'augmenter dans les pays de l'OCDE comme dans le reste du monde depuis 1990. L'OCDE prévoit le doublement de ceux-ci entre 1990 et 2030, en majeure partie du fait de l'augmentation rapide du nombre de véhicules dans les pays en voies de développement. Ainsi, selon ces estimations, le parc automobile mondial comptera un milliard de voitures en 2030 (figure 1).

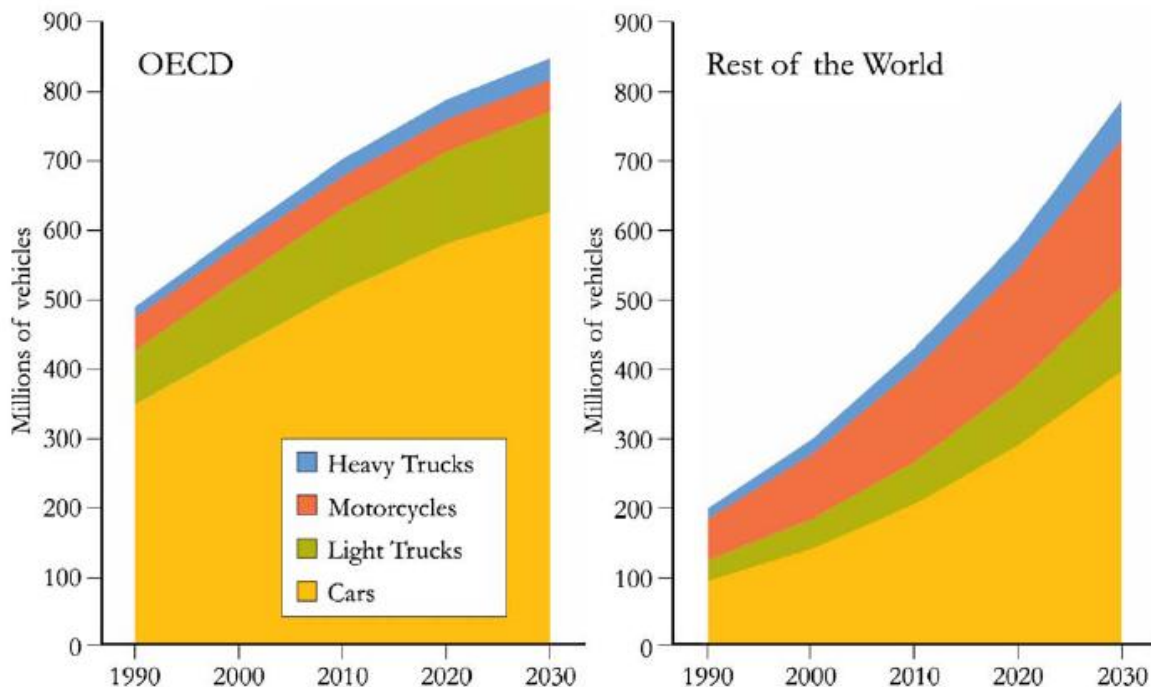


Figure 1 : Flotte de véhicules motorisés, OCDE et reste du monde, 1990 - 2030 (source OCDE)

1.1.2. La croissance de la demande en énergie

Tous secteurs confondus, la demande mondiale d'énergie devrait croître de 60 % d'ici à 2030, en grande partie du fait du développement économique de l'Inde et de la Chine. Pourtant, si l'estimation des réserves d'énergies fossiles demeure un point de controverse, l'ensemble de la communauté scientifique s'accorde à considérer qu'il s'agit bien de ressources finies [SENAT, 2005]. Ainsi, si les technologies d'extraction progressent et permettent d'atteindre des ressources jusque là inaccessibles, il reste certain que leur prix augmentera du fait de la raréfaction et des moyens à mettre en œuvre pour accéder aux ressources.

Le secteur du transport est particulièrement énergétivore. En France, il est le deuxième secteur consommateur d'énergie avec 31 % de la consommation énergétique du pays. Selon L'IFP, l'essence et le gazole couvrent 98 % de l'énergie utilisée dans le transport routier à l'échelle mondiale [IFP, 2009]. Face à l'épuisement annoncé des ressources pétrolières, à l'augmentation prévisible de leurs prix et aux tensions géopolitiques que cela pourrait engendrer, il apparaît important de diminuer leur consommation par les véhicules.

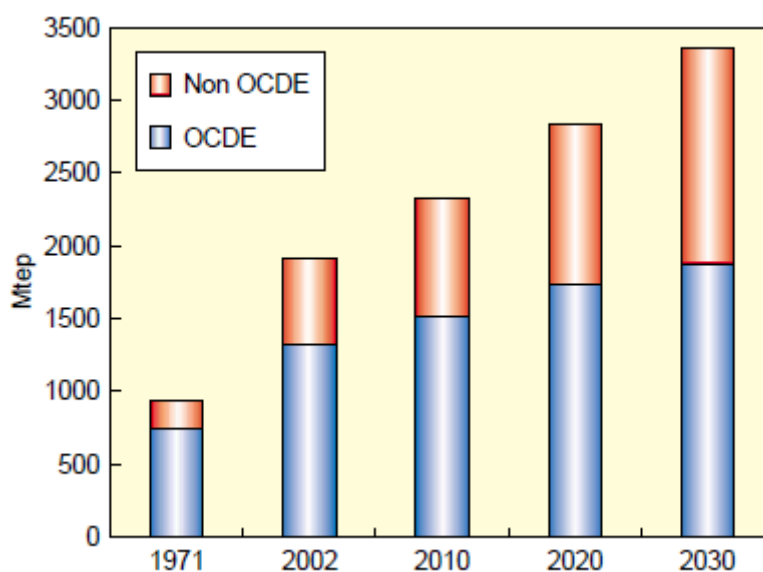


Figure 2 : Evolution de la consommation d'énergie dans le secteur du transport de 1971 à 2030 (source : IFP -2005)

Par ailleurs, l'utilisation de ressources fossiles dans un véhicule se traduit par des émissions de polluants locaux et de gaz à effet de serre. A titre d'exemple et pour prendre la mesure du problème, le rendement d'un véhicule classique, appelé dans la suite du mémoire véhicule à combustion interne

(VCI), est inférieur à 15 % en ville. Ainsi, sur 50 l de carburant utilisé, 7.5 l participent réellement au déplacement et 42.5 l sont transformés en chaleur et en polluants [VAN MIERLO, 2006].

Ainsi, deux raisons poussent à tout mettre en œuvre pour limiter la consommation des ressources fossiles par les véhicules : l'épuisement des ressources fossiles et les émissions de polluants dans l'atmosphère. Pour y parvenir, deux solutions sont envisagées :

- L'amélioration des technologies mises en œuvre actuellement dans les véhicules
- La diversification des sources d'énergies utilisées pour la traction des véhicules

1.1.3. Le contexte environnemental

Si l'usage du véhicule par les particuliers est considéré comme un bon indicateur de la croissance économique (car il leur permet de se rendre sur leurs lieux de travail, de consommation et de loisirs), il est aussi responsable de nuisances diverses : accidents, congestion, détérioration des infrastructures, pollutions sonores, pollutions locales, émissions de gaz à effet de serre (GES), et atteintes diverses à l'environnement.

A. Les émissions de gaz à effet de serre

Les émissions de GES liées au secteur du transport représentent 27 % du total des émissions mondiales de GES, et leur part continue d'augmenter aujourd'hui [OCDE, 2004]. Les émissions de CO₂ sont inhérentes à la combustion de ressources fossiles et représentent 95 % des émissions de gaz à effet de serre (GES) du secteur du transport. Cependant, les émissions de HFC (usage de la climatisation) et de N₂O (généralisation des pots d'échappement catalytiques), contribuent respectivement à 2 et 3% des émissions de gaz à effet de serre, progressent régulièrement, et sont jugées préoccupantes du fait de leur pouvoir de réchauffement global (PRG) [L'environnement en France, 2010].

Le règlement européen du 23 avril 2009 fixe comme objectif à atteindre le niveau moyen d'émission pour les voitures particulières neuves à 130 g de CO₂ / km. De plus, il définit la notion d' «émissions spécifiques moyennes» comme la moyenne, pour un constructeur, des émissions de CO₂ au kilomètre de toutes les voitures particulières neuves qu'il produit. Un objectif d'émission spécifique est assigné à chaque constructeur, concernant aujourd'hui une partie de sa production annuelle, il augmentera progressivement jusqu'à concerner l'ensemble de sa production en 2015. A partir de 2012, un

constructeur dont les émissions spécifiques moyennes dépassent l'objectif fixé aura des pénalités financières (taxe sur les émissions excédentaires). Par ailleurs, le constructeur pourra bénéficier de bonifications pour ses voitures neuves dont les émissions spécifiques de CO₂ sont inférieures à 50 g de CO₂ / km, l'objectif étant de favoriser la production de véhicules propres. Par exemple pour 2012, un véhicule qui répond aux exigences précédentes comptera pour 3.5 véhicules dans le calcul d'émissions spécifiques du constructeur. [REGLEMENT n° 443/2009]

B. Les gaz d'échappement automobiles : composition et législation

Les polluants sont formés lors de la combustion du carburant dans les véhicules thermiques. Les produits émis par les véhicules thermiques sont toujours les mêmes, seules les quantités relatives varient avec le type de combustion, la géométrie du moteur et les conditions de fonctionnement du véhicule [CAPLAIN, 2005].

Les polluants provenant des gaz d'échappement automobile sont :

- les oxydes de carbone (CO, CO₂)
- les composés azotés regroupés sous le terme NO_x (NO, et NO₂) et le protoxyde d'azote
- les composés organiques (hydrocarbures non méthaniques et composés carbonylés), le méthane (CH₄), les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques.
- Particules

Tous ces polluants ne sont pas soumis à réglementation. On distingue ainsi les polluants réglementés et les polluants non réglementés.

➤ *Les polluants réglementés*

Depuis des années, des mécanismes réglementaires ont été mis en place pour limiter l'augmentation des émissions de polluants locaux.

La stratégie européenne consiste à durcir progressivement les normes limitant les émissions dans l'air des substances jugées les plus nocives, pour les véhicules neufs, à travers les normes successives Euro (cf. tableau 1 et figure 3). Ces substances sont [LE CORFEC, 2007] :

- le *monoxyde de carbone* (CO), gaz incolore et inodore produit par la combustion incomplète des combustibles fossiles. Il s'agit d'un polluant très toxique qui peut être nocif s'il est respiré

longtemps, même en concentration faible. Il peut se fixer sur l'hémoglobine du sang et nuit ainsi au transport de l'oxygène. Les personnes souffrant de maladies cardio-vasculaires sont les plus vulnérables. Les symptômes retrouvés chez une personne exposée à une concentration élevée sont : troubles de la vision, diminution de la dextérité, troubles moteurs et somnolence.

- les *oxydes d'azote* (NO_x). Le monoxyde d'azote (NO) est produit lors de la combustion de l'azote à haute température dans les moteurs, il se transforme rapidement en NO_2 dans l'air ambiant. Ce sont des agents irritants pour les yeux et les voies respiratoires. Les personnes souffrant d'asthme et de maladies respiratoires y sont les plus sensibles. Le NO_2 peut représenter jusqu'à 30% des NO_x , et il peut se former une faible quantité de protoxyde d'azote (N_2O), dont le potentiel de réchauffement global à 100 ans correspond à 298 fois celui du CO_2 (IPCC, 2007).
- les *hydrocarbures imbrûlés* (HC) dont les composés organiques volatiles (COV). Leurs effets sont divers et vont, selon la molécule émise, de la simple gêne olfactive à une importante irritation. De plus, certains, comme le benzène et le formaldéhyde ont des effets mutagènes et cancérogènes reconnus. Par ailleurs, ils participent également à la pollution photochimique.
- les *particules solides* (PM), particulièrement émises par les véhicules diesel, présentent une composition complexe : elles sont constituées de particules minérales, de particules organiques (suies) ou d'un mélange des deux [CAPLAIN, 2005]. Leur taille est variable, de quelques nanomètres à quelques dizaines de micromètres. Les plus fines ($\text{PM}_{2,5}$, particules dont le diamètre moyen est inférieur à 2.5 microns), susceptibles de pénétrer dans les poumons et responsables d'effets négatifs sur la santé, aussi bien à court terme (problèmes respiratoires et allergies) qu'à long terme (maladies cardio-vasculaires, cancers). Les particules peuvent en effet servir de « transporteurs » de substances nocives dans l'organisme (par exemple les hydrocarbures aromatiques).

Il convient de remarquer que les mécanismes mis en place dans les autres pays de l'OCDE sont identiques [OCDE, 2005].

| Classe | Normes | Année d'entrée en vigueur | | Limites d'émissions UE pour les véhicules de particuliers (en g/km) | | | | | |
|---------|--------------------------------------|----------------------------|--------------------------|---|-------|-------|----------|-------|------------|
| | | Nouveaux modèles seulement | Tous les véhicules neufs | CO | HC | HCNM | HC + NOx | NOx | Particules |
| Diesel | Euro 1 | 1992 | | 2.720 | - | - | 0.970 | | 0.140 |
| | Euro 2 Injection indirecte | 1996 | | 1.000 | - | - | 0.700 | | 0.080 |
| | Euro 2 Injection directe | 1999 | | 1.000 | - | - | 0.900 | | 0.100 |
| | Euro 3 | 2000 | 2001 | 0.640 | - | - | 0.560 | 0.500 | 0.050 |
| | Euro 4 | 2005 | 2006 | 0.500 | - | - | 0.300 | 0.250 | 0.025 |
| | Euro 5 | 2009 | 2011 | 0.500 | - | - | 0.230 | 0.180 | 0.005 |
| | Euro 6 | 2014 | 2015 | 0.500 | - | - | 0.170 | 0.080 | 0.005 |
| Essence | Euro 1 | 1992 | | 2.720 | | | 0.97 | | |
| | Euro 2 | 1996 | | 2.200 | | | 0.5 | | |
| | Euro 3 | 2000 | 2001 | 2.300 | 0.200 | | | 0.150 | |
| | Euro 4 | 2005 | 2006 | 1.000 | 0.100 | | | 0.080 | |
| | Euro 5 | 2009 | 2011 | 1.000 | 0.100 | 0.068 | | 0.060 | |
| | Euro 6 | 2014 | 2015 | 1.000 | 0.100 | 0.068 | | 0.060 | |

Tableau 1 : Evolution des normes d'émission pour l'homologation des véhicules particuliers de l'Union Européenne de 1992 à 2014

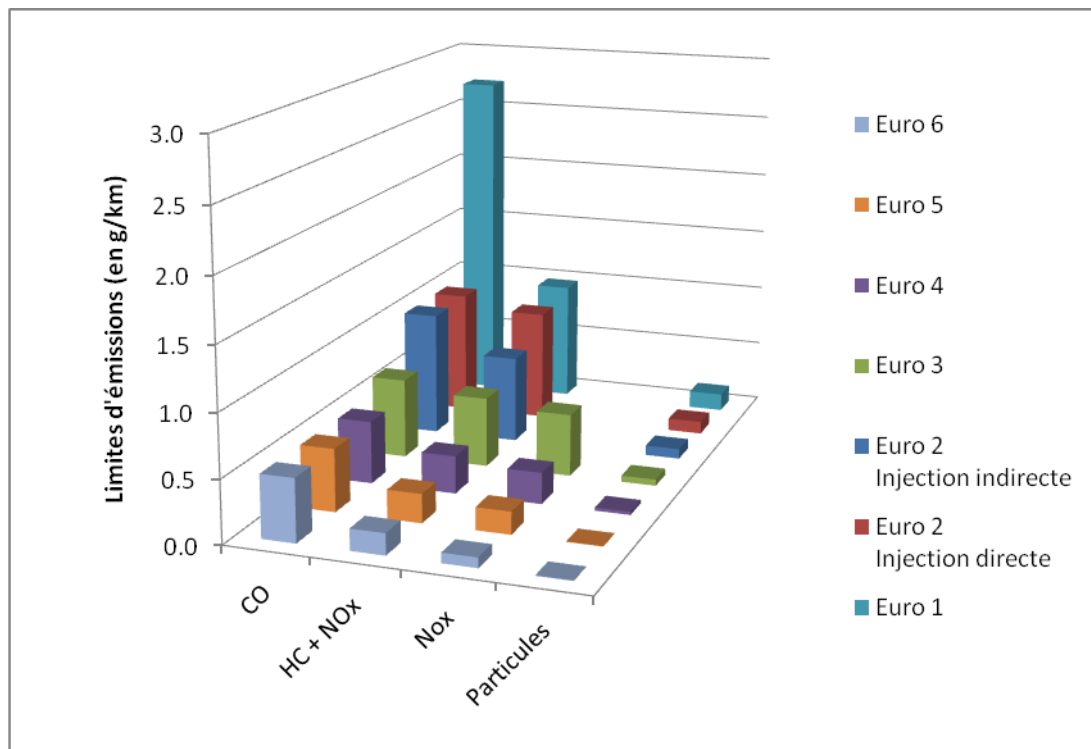


Figure 3 : Evolution des normes d'émission pour l'homologation des véhicules particuliers diesels de l'Union Européenne

Ces normes encouragent l'amélioration des technologies du moteur et de la nature des carburants. Malgré l'augmentation des distances parcourues, elles sont ainsi à l'origine de réductions significatives (de 20 à 50 %) des émissions de polluants locaux [OCDE, 2004]

Cette diminution devrait se poursuivre avec les nouvelles normes et le renouvellement du parc automobile. L'ADEME estime que le temps nécessaire à ce renouvellement est de l'ordre de 25 à 30 ans.

C. Les émissions hors échappement

Si les émissions au niveau des pots d'échappements des véhicules ont considérablement diminué du fait des normes, il reste les émissions hors échappement, liées à l'usure des pneumatiques, des pièces mécaniques du véhicule (en particulier les freins), et du revêtement de la chaussée ou encore la mise en suspension de particules déposées sur les routes.

➤ *Usure des pneus, freins, et chaussées*

Dans les milieux urbains, souvent peu industrialisés, les émissions hors échappement des véhicules contribuent de manière importante aux émissions globales de particules. Certaines études ont montré que dans bon nombre de villes européennes, la part des polluants particulaires hors échappement était quasi égale à celle des émissions issues du pot d'échappement [QUEROL, 2004], [LENSCHOW, 2001].

Ces émissions sont sous forme de particules dont la taille varie de quelques nanomètres à une centaine de micromètres. On les range généralement dans 2 groupes selon leur taille [THORPE, 2008] :

- Les **PM₁₀** ont un diamètre aérodynamique inférieur à 10 micromètres, mais supérieur à 2.5 micromètres et constituent les **particules grossières**,
- Les **PM_{2,5}** ont un diamètre aérodynamique inférieur à 2.5 micromètres, et constituent les **particules fines**.

La taille et les propriétés physico-chimiques de ces particules dépendent de nombreux paramètres : matériaux en jeu, mode de conduite, poids du véhicule, historique des maintenances effectuées, etc.

➤ *Dépôt de poussières sur les routes et remise en suspension*

Les routes sont un site de dépôt des particules de différentes provenances. Chaque source d'émission de particules (qu'elle soit naturelle ou anthropogénique) est susceptible de se déposer sur les routes : les particules émises au niveau des pots d'échappement, celles émises par les industries à proximité, les sels ou sables utilisés pour lutter contre le verglas etc.

Selon leur taille, les particules évoluent différemment. Si les plus grosses sédimentent, les plus fines peuvent être remises en suspension. La remise en suspension des particules dépend du contexte local : géologie, météo (force du vent, pluie, humidité, température, salage).

➤ *Mesures et identification des contributions des différentes sources*

La quantification des émissions particulaires hors échappement dans l'atmosphère est très complexe du fait du nombre important de sources d'émissions (usures des routes, des freins, et des pneus, et remise en suspension des dépôts routiers). En effet, il est difficile d'identifier les contributions de ces différentes sources, d'autant plus qu'il y a de nombreuses interactions entre leurs émissions respectives. Par exemple, des particules liées à l'usure des freins, peuvent se déposer, interagir avec la route et ses poussières, causant un enrichissement de sa teneur en métaux qui compliquera

l'identification des particules liées à l'érosion du sol dans les particules remises en suspension [THORPE, 2008].

De nombreux travaux de recherche sont aujourd'hui menés visant à identifier des marqueurs chimiques pour identifier les sources d'émissions, par exemple, des particules issues de l'usure des freins sont identifiables via leur teneur en cuivre et antimoine [WECKWERTH, 2001].

Les émissions polluantes des véhicules constituent un véritable enjeu pour la santé et l'environnement, à la fois au regard des doses et des effets des substances émises. De plus, la part des émissions non échappement apparaît importante mais pose encore question, et des travaux de recherche sont aujourd'hui menés pour mieux l'appréhender et la mesurer.

1.1.4. Bilan

Face à l'augmentation constante du nombre de véhicules, des distances parcourues, et de la demande accrue d'options de confort et de sécurité, de nombreux développements visent à limiter l'épuisement des énergies fossiles et l'émission de polluants atmosphériques locaux et de GES par une réduction de la consommation effective de carburants. Sont ainsi identifiées :

- **Les solutions influant sur le mode de transport** : il va s'agir de substituer à la voiture personnelle d'autres modes de transport (train, bus, métro, deux roues, marche, covoiturage). Ces solutions imposent des évolutions des comportements individuels de société.
- **Les solutions influant sur le moyen de transport** : il peut s'agir d'utiliser des carburants de remplacement (biocarburants, gaz naturel véhicule (GNV), gaz de pétrole liquéfié (GPL)), d'alléger les véhicules, ou de modifier la technologie (améliorer les moteurs à combustion interne, développer les technologies électriques, etc.).

Une combinaison de ces solutions pourrait apporter une réponse durable à la mobilité future, il est alors important d'explorer chacune d'entre elles. En particulier, la performance environnementale de chacun de ces moyens de transport doit être évaluée pour connaître ses forces et faiblesses et raisonner ensuite en terme de combinaison. Au regard des différents enjeux liés aux transports précédemment identifiés, il convient d'évaluer chaque solution selon les critères suivants :

- Le niveau de consommation d'énergies fossiles
- Le niveau d'émission de gaz à effet de serre
- Le niveau d'émission de polluants locaux (émissions à l'échappement et non échappement)

- Le niveau d'émission sonore

Ce mémoire de thèse s'intéresse à l'une des alternatives envisageables, le véhicule électrique, ou VE.

1.2. Problématiques spécifiques au véhicule électrique

1.2.1. Le véhicule électrique : un vieux candidat en plein essor

La technologie électrique existe depuis les débuts de l'histoire automobile mais a vite été rendue obsolète par les progrès rapides du moteur à combustion interne qui permet une plus grande autonomie et un réapprovisionnement en énergie rapide.

Les annonces de projets de VE de différents constructeurs et équipementiers laissent envisager l'industrialisation prochaine de ce type de véhicule. De nouveaux modèles devraient arriver sur le marché dès 2010.

Le VE apparaît en premier lieu comme une solution idéale dont les avantages répondent point par point aux inconvénients du VCI :

- Rendement énergétique du moteur élevé (jusqu'à 3 fois celui du VCI) et indépendance de la ressource pétrolière (lorsque la production d'électricité en est indépendante)
- Absence d'émissions à l'échappement de polluants atmosphériques locaux lors de l'utilisation du véhicule
- Faible pollution sonore pour les petites vitesses

Les précédents échecs de cette technologie comme alternative au VCI s'expliquent par le manque de maîtrise du stockage d'énergie (dont résulte une autonomie trop faible), le temps nécessaire pour la recharge en énergie du véhicule et le coût.

L'autonomie (en kilomètre) a toujours été l'obstacle principal au développement du VE. Elle dépend à la fois de la batterie et de l'énergie consommée par le véhicule. Ces deux points sont donc développés ci-dessous.

1.2.2. Les aspects liés au stockage d'énergie

A. Rappels : structure et principes de bases

➤ Structure

Un pack de batteries est constitué d'unités élémentaires appelés modules, qui contiennent un certain nombre de cellules dans lesquelles ont lieu les réactions électrochimiques réversibles qui permettent les charges/décharges de la batterie (cf. figure 4).

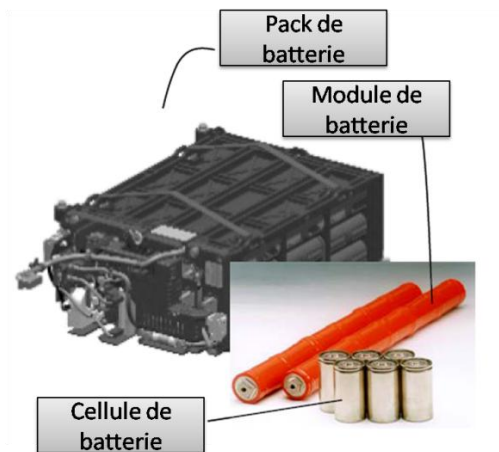


Figure 4 : Packs, modules et cellules de batterie

➤ Principe de charge/décharge

Les batteries permettent la conversion d'énergie chimique en énergie électrique et vice versa. Elles sont caractérisées par une réaction chimique, qui permet l'échange de charges électriques via des ions.

Les composants basiques d'une cellule sont l'électrode positive, l'électrode négative et l'électrolyte. L'énergie électrique est obtenue au travers de réactions électrochimiques séparées qui ont lieu au niveau de chacune des électrodes. Une électrode émettra des ions, tandis que la seconde les absorbera. Le courant passe à travers le dispositif connecté.

Les électrodes sont constituées de matériaux actifs qui prennent part aux réactions électrochimiques

- Durant la décharge, l'électrode négative (en métal ou alliage) aussi appelée anode est oxydée, quand l'électrode positive (en oxyde ou sulfite) aussi appelée cathode est réduite.

- Durant la charge, l'électrode positive est oxydée et devient l'anode alors que l'électrode négative est réduite et devient la cathode.

B. Caractéristiques nécessaires pour l'application automobile

Cinq paramètres sont déterminants lorsque l'on doit choisir une chimie de batterie :

- **La durée de vie (DV_{bat})**, définit le nombre de batterie utilisée durant la vie du véhicule. Deux types de durées de vie sont à considérer :
 1. **La durée de vie calendaire** : capacité de la batterie à résister aux dégradations dues à l'usage et au temps. Elle dépend de la fréquence d'utilisation, et en moindre mesure, de la température et de l'humidité [AXSEN, 2008]. Elle est donnée en année.
 2. **La durée de vie cyclique** est le nombre de charges-décharges que la batterie peut supporter. Elle est liée à la profondeur de décharge imposée à celle-ci.

La durée de vie calendaire est une donnée figée, alors que la durée de vie cyclique dépend de la fréquence de recharge du véhicule et donc de l'usage de son propriétaire.

La durée de vie de la batterie ($DV_{batterie}$) est égale au minimum entre ces deux durées de vie :

$$DV_{batterie} = \min(DV_{calendaire}, DV_{cyclique})$$

Ce point sera développé dans la partie 2 de ce mémoire.

- **La densité de puissance (en W/kg) :**

La puissance (en W) est la quantité d'énergie qui peut être fournie au moteur divisée par le temps correspondant. Ainsi, pour la même quantité d'énergie fournie, une batterie deux fois plus rapide est deux fois plus puissante.

La densité de puissance (en W/kg), est la puissance qui peut être générée par la batterie considérée rapportée à sa masse.

- **La densité énergétique (Wh/kg)** est la quantité d'énergie stockée par kilogramme de batterie. La masse de batterie dépend de ce paramètre et de l'autonomie souhaitée du véhicule

Remarque importante : Il y a une différence entre l'énergie disponible et l'énergie totale. Par exemple, pour une batterie avec 10 kWh d'énergie totale, seulement une part peut réellement être utilisée par la voiture parce que la batterie ne sera jamais totalement déchargée (ce point sera explicité dans la suite du mémoire). Ce paramètre est à prendre en compte lorsqu'il s'agira de dimensionner des batteries.

- **Le temps de recharge (en h)** : Il dépend du type de recharge mis en œuvre (charge normale et charge rapide seront explicitées dans la suite du mémoire)
- **La sécurité** : Un système électronique doit permettre la gestion de la batterie (température, fusible, vitesse de charge/décharge, etc.) pour éviter tout dysfonctionnement pouvant impacter la sécurité. Il s'agit d'une problématique importante pour les technologies en développement comme le lithium-ion.
- **Le coût (en € /kWh)** : Les coûts des batteries de voitures électriques équipées des chimies les plus performantes sont aujourd'hui importants. A titre d'exemple PETERSEN propose les coûts annoncés dans le tableau 2 pour les batteries lithium-ion [PETERSEN, 2009]. Les constructeurs comptent sur une augmentation des volumes de production pour en diminuer les coûts.

| Chimie de batterie | Prix en €/kWh |
|------------------------|---------------|
| Lithium Métal Polymère | 500 |
| Lithium Fer Phosphate | 730 - 900 |

Tableau 2: Prix des batteries [PETERSEN, 2009]

Les caractéristiques des batteries varient avec leur application. Par exemple, pour le VE, on choisira une batterie capable de stocker une grande quantité d'énergie, tout en recherchant des caractéristiques de puissance suffisante.

C. Les différentes technologies de batteries envisageables

Plusieurs chimies de batterie sont aujourd'hui envisagées pour les VE, chacune ayant des caractéristiques propres. Ces technologies diffèrent dans leur mode de production, d'élimination, mais

aussi en termes de performance lors de la phase d'utilisation. Ici sont présentées les batteries pour lesquelles ont été réalisés les inventaires pour l'analyse de cycle de vie présentés dans la dernière partie de ce mémoire. Un graphique synthétisant les caractéristiques de ces batteries est présenté figure 5.

➤ **Batteries Plomb-acide**

La technologie Plomb-acide est la technologie de batterie la plus ancienne. Elle est largement utilisée dans le monde industriel, en particulier pour les chariots élévateurs type Fenwick.

Cette technologie présente deux avantages importants : son coût relativement faible et son recyclage aisé. Elle a en contrepartie une densité énergétique faible (environ 30 Wh/kg), qui implique une masse de batterie importante pour obtenir une autonomie acceptable pour un véhicule. Enfin, sa durée de vie est courte.

Elle est toutefois être envisagée pour de petits véhicules limités à de faibles vitesses et à usage exclusivement urbain.

➤ **Batteries Alcalines**

Les batteries Alcalines comprennent les batteries Nickel-Cadmium, Ni-Métal-Hydrure, etc. Ces technologies sont chères, mais équipent la plupart des véhicules roulant aujourd'hui.

Nickel-Cadmium

Cette technologie a de nombreux avantages : elle est robuste et présente des performances (densité énergétique et densité de puissance) correctes, et une filière de recyclage déjà existante.

Elle demeure toutefois une technologie très onéreuse, et son rendement est sensible aux variations de température [BERETTA, 2005].

Nickel-Métal Hydrure

La technologie Nickel-Métal Hydrure a des performances comparables à celle du Nickel-Cadmium. La différence tient aux alliages particuliers qui sont utilisés à la place du cadmium [VAN DEN BOSSCHE, 2005].

Son désavantage est la limitation en densité énergétique et en densité de puissance. Il s'agit d'une technologie mature et éprouvée industriellement et les améliorations possibles sont faibles. On n'espère plus baisser les coûts en augmentant la production. [AXSEN, 2008]

➤ **Batteries Lithium**

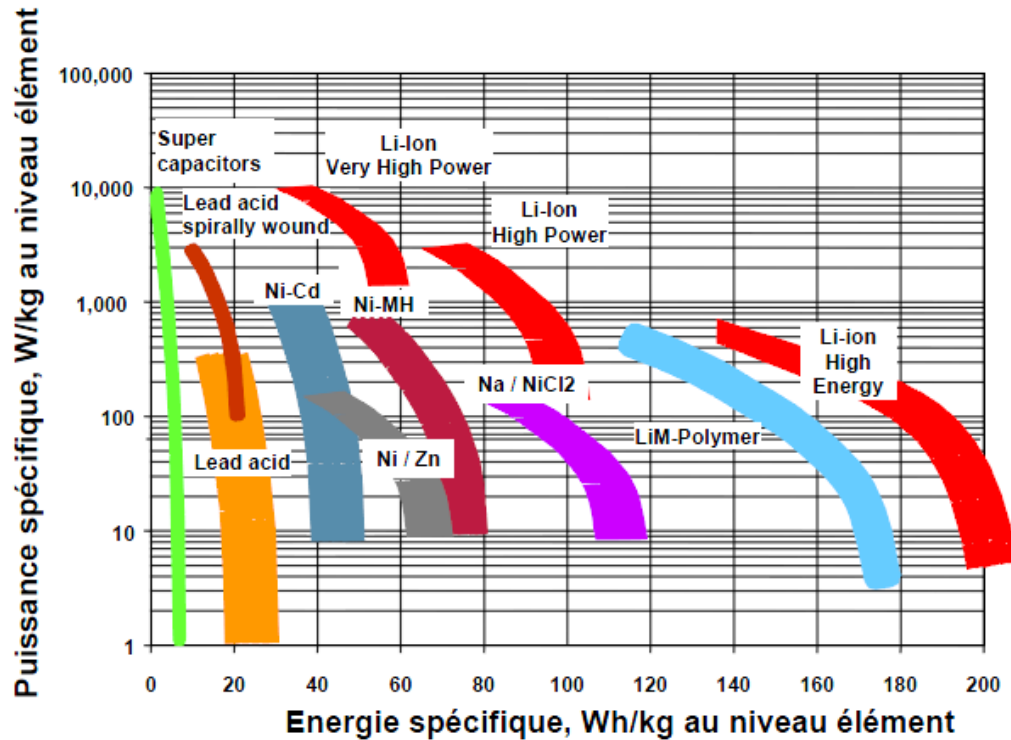
Du fait de sa densité énergétique importante, de l'absence d'effet mémoire et de leur faible auto-décharge, cette technologie de batterie est présentée comme la solution pour les VE du futur. On la retrouve dans de nombreux prototypes qui annoncent les plus fortes autonomies. Elle se décline en deux technologies principales :

- ⇒ le Lithium-ion, qui équipera les véhicules Renault, Microcar, Peugeot, etc. Il en existe une grande variété : Lithium manganèse, Lithium fer phosphate, etc.
- ⇒ le Lithium polymère qui équipera la Bluecar développée par Bolloré.

Ces batteries de véhicules ne sont pas encore vraiment produites en série et de nombreuses optimisations sont à apporter quant à la durée de vie, la sécurité, les coûts de production [VAN DEN BOSSCHE, 2005].

D. Bilan récapitulatif : comparaison des technologies existantes

Pour comparer les batteries, le diagramme de la figure 5 est utilisé, il présente une classification des batteries en fonction de leur énergie et puissance spécifiques sur un axe logarithmique.



Il existe de nombreuses autres chimies de batteries dont les performances sont différentes. De plus, du fait de leur caractère prospectif, il y a peu de retour d'expérience sur les batteries les plus prometteuses (Lithium-ion), et des incertitudes demeurent quant à leur durée de vie dans le véhicule et leur sécurité.

Différentes chimies de batteries seront considérées dans ces travaux, dont les performances diffèrent : le plomb-acide, le nickel-métal-hydrure, et le lithium-ion. Le choix a également été fonction de l'importance des données recueillies pour chaque technologie identifiée.

1.2.3. Les aspects liés à la consommation

D'après l'ADEME (site internet ADEME), le parc de véhicules électriques français est le premier parc mondial, avec 10 000 unités. En comparaison, le parc de véhicules particuliers français compte environ 25 millions de véhicules. La diversité de ce parc de VE est importante, tant en ce qui concerne le type de véhicule (voitures, camionnettes, scooter, autobus, bennes à ordures ménagères etc.) que les technologies de batteries mises en œuvre (nickel cadmium, nickel métal-hydrure, plomb-acide, lithium-ion, lithium polymère, ZEBRA etc.). Il est alors difficile d'appréhender la consommation énergétique de ces véhicules. Pourtant, ce paramètre est crucial car il définit en partie (avec la capacité des batteries) l'autonomie du véhicule, problématique essentielle du VE.

Ainsi, l'estimation de la consommation des véhicules est une question importante et il faudra s'intéresser aux facteurs qui influencent ce paramètre. Outre l'usage (centres villes, routes, autoroutes), deux problématiques sont fréquemment soulevées concernant la consommation des VE :

- **Le freinage récupératif**, une des caractéristiques spécifiques aux VE, qui devrait participer à l'amélioration de son bilan énergétique.

Les moteurs électriques ont la particularité d'être réversibles en puissance. Il est donc possible de convertir une part de l'énergie cinétique du véhicule en énergie électrique et, en freinant ou en descendant, recharger ainsi les batteries.

Deux modes de freinage récupératif [WOLF, 1999] sont possibles :

- Un mode « frein moteur », qui se déclenche quand le conducteur lève le pied de l'accélérateur, et qui opère pendant les phases de ralentissement. Pour gagner en autonomie significativement avec ce moyen, il faudra adopter une conduite anticipative.
- Un mode « frein auxiliaire » qui se déclenche, en même temps que les freins mécaniques, lorsque le conducteur appuie sur la pédale de frein. Ce mode de freinage nécessite un appareillage électro-hydraulique, comparable à un système ABS, qui assure le dosage entre les freins mécanique et électrique.

La fraction d'énergie récupérable est difficile à estimer, le chiffre le plus souvent avancé est 20% en condition urbaine, dans des phases transitoires de non-accélération ou de freinage, et se réduit rapidement avec la fluidité des conditions de circulation [IFP, 2009]. Le VE serait donc plus avantageux pour une utilisation urbaine.

- **L'utilisation des auxiliaires** (ventilation, phares, air conditionné etc.), entraîne des consommations supplémentaires et influe sur l'autonomie du véhicule. Or, la tendance actuelle est de multiplier les dispositifs de sécurité et de confort dans le véhicule (autoradio, GPS, lecteur DVD pour les passagers etc.) En 2006, une étude a évalué la demande annuelle moyenne de puissance des auxiliaires à 1000 W pour les véhicules conventionnels, considérant à la fois la demande moyenne des équipements, et leurs usages moyens en hiver et en été [HELMS, 2010]. Cette estimation est à réadapter au cas des VE, pour qui le maintien de températures « confortables » en hiver devra être assuré par l'air conditionné, contrairement aux VT (dont le faible rendement du moteur permet la récupération de chaleur).

Aujourd'hui, considérant l'évolution des différentes technologies de batteries associée à l'augmentation régulière des coûts du pétrole et à la prise de conscience environnementale de la société, la technologie VE pourrait prochainement démontrer sa viabilité.

Il convient alors d'évaluer les véhicules électriques pour chacun des critères identifiés.

2. L'ACV pour l'évaluation environnementale des véhicules électriques

2.1. Méthodes d'évaluations environnementales dans le secteur automobile

L'analyse des enjeux environnementaux liés au transport a mis en évidence plusieurs critères à évaluer (niveau de consommation d'énergies fossiles, niveau d'émission de gaz à effet de serre, niveau d'émission de polluants locaux etc.). De plus, la méthode choisie doit permettre la comparaison pertinente de différentes technologies de véhicules.

Les méthodes utilisées pour évaluer la performance environnementale des véhicules sont présentées ci-après.

2.1.1. Mesure d'émissions directes

A. Principes

Les émissions de polluants atmosphériques de voitures particulières peuvent être mesurées en laboratoire sur banc à rouleau(x) via des cycles de conduite.

Ces mesures ne sont pas à considérer comme une méthode d'évaluation, toutefois, elles sont mises en œuvre de manière systématique en réponse à la réglementation.

Cycles d'essai

Les cycles d'essais permettent d'évaluer les émissions de polluants et de GES. Ils essaient de représenter au mieux les conditions de fonctionnement du véhicule et sont définis par un graphique exprimant la vitesse en fonction du temps.

Les cycles d'essais peuvent être classés en deux catégories :

- les **cycles réels**, établis à partir de trajets réels correspondant à un usage particulier et dont il existe une multitude de modèles : par exemple des cycles établis pour un parcours moyen de distribution de courrier par La Poste, ou encore les cycles européens ARTEMIS (représentatifs

des conditions de conduite en Europe) etc. Ils sont utilisés pour estimer les consommations et émissions réelles de véhicules. Leur élaboration demande un long travail de détermination de trajet moyen à partir d'expérimentations de terrain sur un échantillon représentatif de véhicules [ANDRE, 2004].

- les **cycles d'homologation**, normalisés pour donner à tous les constructeurs automobiles une référence unique pour les seuils de consommation et d'émission des véhicules qu'ils développent. Par exemple, le cycle NEDC sert à la certification de véhicules légers en Europe. Ils répondent en conséquence à des contraintes de simplicité et de reproductivité [ANDRE, 1999]. Ainsi, le cycle standard, utilisé pour vérifier le respect des normes n'est pas nécessairement le plus représentatif du comportement du conducteur en situation réelle.

L'ensemble des conditions de circulation ne sont pas décrites par un seul cycle moyen mais sont détaillées par sous-cycles spécifiques (urbains, routiers, autoroutiers), dont le niveau de détail varie également selon qu'il s'agit d'un cycle réel ou d'homologation.

Le cycle d'homologation européen NEDC (New European Driving Cycle) comprend une partie urbaine ECE et une partie extra-urbaine EUDC (Extra-Urban Driving Cycle). La partie urbaine ECE (Economic Commission for Europe) comporte 4 cycles urbains élémentaires ECE 15, elle a été établie par l'UTAC (Union Technique de l'Automobile et du Cycle) en 1962 à partir de mesures de cinématiques de véhicules circulant dans Paris.

La figure 6 présente la portion urbaine ECE du cycle d'homologation (en bleu) au cycle réel urbain européen ARTÉMIS (en rouge).

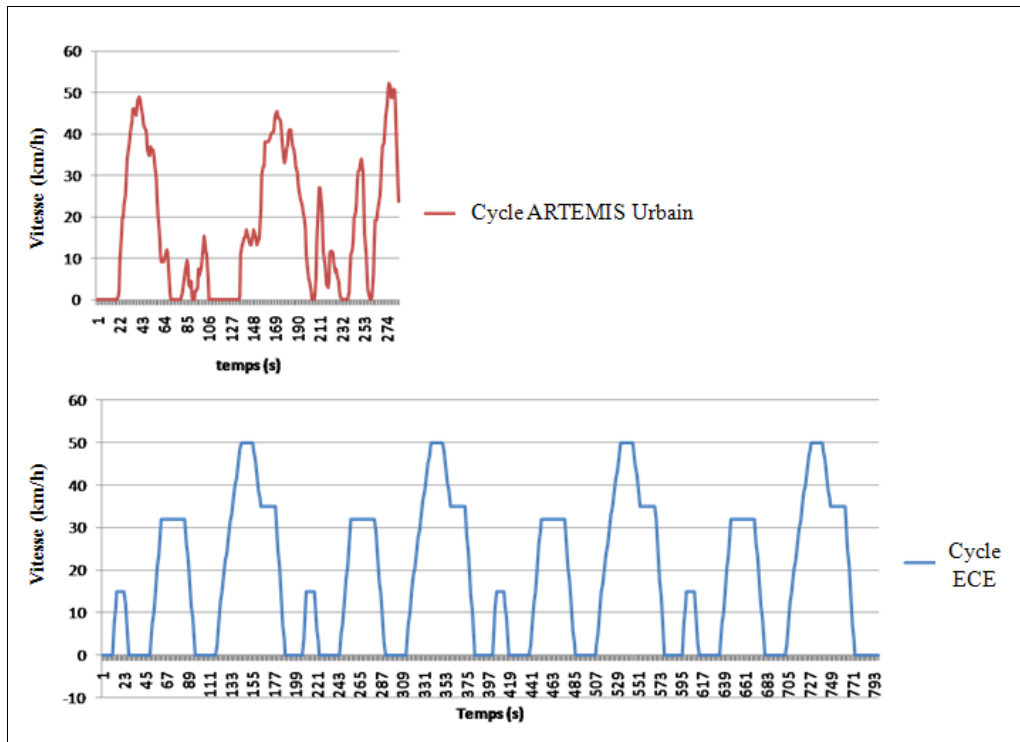


Figure 6 : Comparaison entre le cycle ECE et le cycle ARTEMIS urbain

Principe des tests sur banc à rouleau(x)

Le banc à rouleau(x) (aussi appelé « banc dynamométrique ») permet la simulation du comportement routier du véhicule testé : les roues motrices du véhicule à tester sont placées au niveau du(des) rouleau(x), et l'entraînent alors que le banc reproduit la charge et l'inertie du véhicule lors du fonctionnement sur route.

Un conducteur suit les séries d'accélération et de freinage imposées par le cycle de conduite choisi et retransmis sur un moniteur situé face à lui. Le refroidissement du véhicule est assuré par une ventilation d'air ambiant asservie à la vitesse du véhicule. Ainsi, le véhicule est testé dans des conditions de fonctionnement proches de la réalité.

Des capteurs et des sacs collectent respectivement les données de consommation et les gaz émis qui devront être analysés par la suite (cf. figure 7). Dans le cas d'un véhicule électrique, seules les consommations seront mesurées.

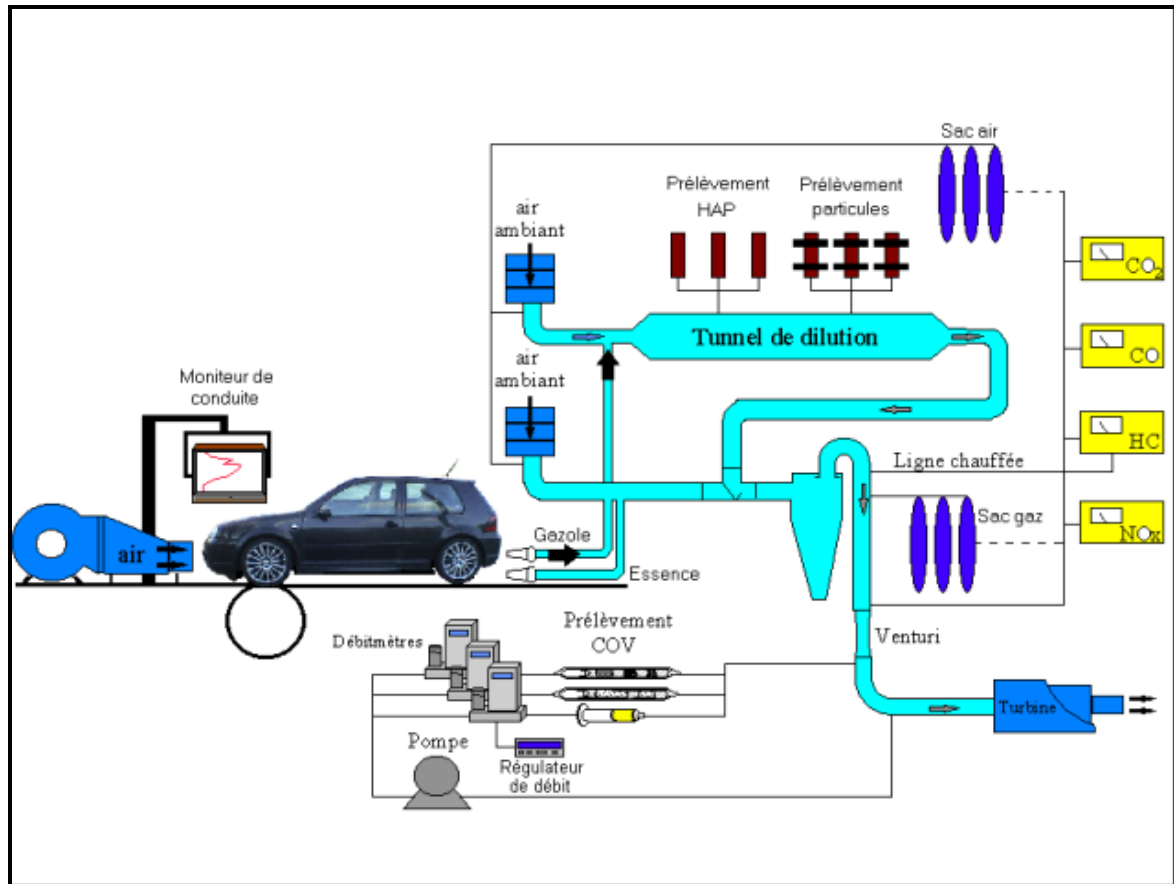


Figure 7 : Schéma de principe de banc à rouleau (source INRETS)

B. Limites de l'approche

Le bilan de ces mesures constitue un premier niveau de réponse et peut suffire, par exemple, à déterminer si le véhicule répond aux exigences environnementales. En particulier, les consommations et émissions directes doivent désormais figurer sur l'étiquette énergie/ CO₂ apposée à tout véhicule neuf mis en vente, d'après l'arrêté du 10 novembre 2005.

Cette approche ne considère que la phase d'utilisation du véhicule et n'a donc qu'une portée limitée. En effet, la prise de conscience des impacts des phases de production et d'élimination des produits (épuisement des ressources, impact sur les écosystèmes), plaident pour l'intégration de ces étapes dans les évaluations environnementales.

Différents outils d'évaluation, dont l'analyse de cycle de vie (ACV), considèrent l'ensemble du cycle de vie des produits, procédés ou service étudié.

2.1.2. L'analyse de cycle de vie

L'analyse du cycle de vie (ACV) permet de réaliser le bilan environnemental d'un produit ou d'un procédé en quantifiant, tout au long de son cycle de vie, les flux de matières, d'énergies et les rejets en traduisant l'ensemble en impacts potentiels sur l'environnement. Cet outil est régi par les normes ISO 14 040 et ISO 14 044 [ISO 14 040, 2006], [ISO 14 044, 2006].

Il est déjà utilisé et appliqué aux véhicules par les constructeurs, et de nombreuses études publiées utilisent cet outil pour comparer les solutions alternatives aux véhicules classiques [SIMONS, 2010], [HELMS, 2010], etc. Il a également beaucoup été utilisé pour évaluer les biocarburants, les comparer aux carburants fossiles, et identifier les étapes les plus polluantes de leur production.

Les analyses de cycle de vie appliquées aux transports et publiées sont difficiles à comparer du fait des différents choix méthodologiques effectués, en particulier la définition du périmètre étudié. Le périmètre doit être défini en fonction des objectifs de l'étude [VAN DER VOET, 2010]. VAN DER VOET, LIFSET et LUO, identifient les différents périmètres utilisés dans 67 analyses de cycle de vie évaluant les biocarburants publiées après 2005 (« well-to-wheels », « well-to-tank », « cradle-to-gate » et « cradle-to-grave ») et soulignent que les différences de périmètres induisent des différences importantes dans les différentes études. Il est donc essentiel que le périmètre soit clairement indiqué et explicité pour chaque ACV réalisée.

Les différences entre ces périmètres, et les objectifs assignés à l'étude de différents systèmes de transport particulier (véhicules à combustion interne utilisant énergies fossiles ou carburants alternatifs, véhicules électriques etc.) sont présentés dans le tableau 3. Il apparaît que l'approche « cradle-to-grave » est la plus exhaustive, car elle considère l'ensemble du système « véhicule + énergie(s) en jeu + infrastructures du transport ». Elle nécessite en contre partie un nombre de données important.

| Périmètre | Etapes considérées | Objectif de l'étude correspondant |
|--|--|--|
| WELL-TO-WHEELS « <i>Puits à la roue</i> » | <ul style="list-style-type: none"> • Production de l'énergie(s) • Transport jusqu'à la pompe ou bornes de recharge, • Usage dans le véhicule étudié. | Comparaison des énergies utilisées par les véhicules e.g. comparaison de carburants alternatifs |
| WELL-TO-TANK « <i>Puits au réservoir</i> » Rq : pour le VE, « Well to plug » | <ul style="list-style-type: none"> • Production de l'énergie • Transport jusqu'à la pompe ou bornes de recharge. | Comparaison des énergies utilisables par le véhicule e.g. comparaison de carburants alternatifs sans prise en compte de la phase usage |
| CRADLE-TO-GATE « <i>Du berceau à la porte de l'usine</i> » (ie du berceau au carburant) | <ul style="list-style-type: none"> • Production de l'énergie | Comparaison des impacts liés à la production énergétique ou identification des étapes les plus polluantes de leur production |
| CRADLE -TO-GRAVE « <i>Du berceau à la tombe</i> » | <ul style="list-style-type: none"> • Prise en compte du système complet du transport • Production, usage, élimination de la voiture, • Production, usage de l'énergie utilisée • Route et infrastructure de recharge | Comparaison de systèmes de transport Rq : Si les véhicules étudiés sont identiques, les différences entre les énergies étudiées sont atténuées. |

Tableau 3: Comparaison des différents périmètres utilisés pour réaliser des analyses de cycles de vie appliquées aux différents systèmes de transports particuliers

2.2. Analyse et choix

La différence entre l'approche émissions directes et l'approche ACV tient surtout aux champs de l'étude :

- l'approche « émissions directes » ne considère que les émissions de la phase utilisation, et ne s'intéresse pas aux phases de construction, d'usage, et d'élimination du véhicule,
- l'approche « ACV » implique une prise en compte plus complète du périmètre d'étude, celui-ci étant également directement fonction des objectifs de l'étude (voir Tableau 3).

Il s'agit dans ce mémoire de thèse de réaliser le bilan environnemental du VE et le comparer à celui des véhicules à combustion interne. Les deux types de véhicules à comparer ont des chaînes de traction différentes. En particulier, le VE possède une batterie dont il est important de considérer l'impact pour prendre en compte tout transfert de pollution de la phase utilisation vers les autres phases. En conséquence, les phases de production, d'usage et d'élimination du véhicule doivent être incluses dans le périmètre.

⇒ **L'évaluation sera donc réalisée avec la méthode ACV avec un périmètre incluant le cycle de vie du véhicule et de l'énergie utilisée. Il serait également intéressant de considérer les infrastructures routières et de recharge du véhicule.**

2.3. Présentation de la méthode ACV

2.3.1. Description de l'ACV

L'ACV est une méthode développée depuis la fin des années 1960, dans le but d'estimer les répercussions environnementales des activités industrielles et de définir les priorités d'action. Aujourd'hui et depuis les années 1990, les développements de la méthode se font en grande partie à travers la SETAC (Society of Environmental Toxicology And Chemistry) et le JRC (Joint Research centre). La normalisation de l'outil par l'Organisation Internationale de Normalisation entre 1997 et 2002 (normes ISO 14 040 et 14 044) fixe des exigences à respecter lors de la réalisation d'ACV.

Un des intérêts principaux de l'ACV est le raisonnement « cycle de vie » qu'elle impose. L'approche globale implique une bonne connaissance du système étudié et permet d'identifier les transferts de pollutions vers d'autres milieux récepteurs (eau, air, sol) ou encore d'autres étapes [ISO 14 040, 2006].

De plus, le bilan exhaustif des flux de matières, d'énergies et de rejets peut être traduit en différents impacts potentiels : diminution des ressources, effet de serre, etc.

2.3.2. Les étapes de l'ACV

La méthode s'inscrit dans un processus itératif, ce qui signifie qu'il est possible à tout moment de revenir aux étapes précédentes afin par exemple, de l'affiner ou de les détailler (cf. figure 8). Une ACV se déroule en 4 étapes distinctes : la définition des objectifs et du système, l'inventaire, l'analyse d'impact et l'interprétation [ISO 14 040, 2006]. Ces étapes sont détaillées ci-après.

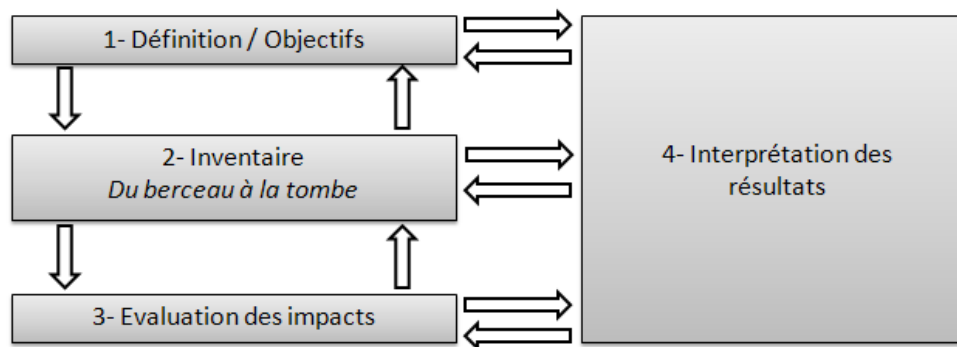


Figure 8 : Les différentes étapes de l'ACV : un processus itératif [ISO 14 040, 2006]

A. Etape 1 : Définition des objectifs et du système (Goal & Scope)

Cette étape est avant tout descriptive, elle permet d'explicitier les motivations et objectifs de l'étude, de décrire le système étudié et ses limites dont dépendront les choix à faire dans la suite de l'étude.

➤ *La nature et la fonction du système*

La fonction du système étudié doit être détaillée. En particulier s'il s'agit de comparer différents systèmes, il faut veiller à ce que la fonction retenue (i.e. le service rendu) soit identique.

➤ *L'unité fonctionnelle*

Les résultats d'une ACV sont exprimés à partir d'un inventaire dont les flux sont ramenés à une même unité : l'unité fonctionnelle (UF). L'UF est une grandeur quantitative de la fonction du système. Par

exemple, si l'on veut comparer le bilan environnemental de différents emballages (verre, plastiques, etc.), le service rendu serait « emballer un produit » et l'UF pourrait alors être le « litre de produit emballé » ou « le produit emballé ». L'UF est la référence à laquelle toutes les données de l'inventaire (flux de matières et d'énergies) vont être rapportées, une grandeur mesurable et additive, qui caractérise la fonction du système [JOLLIET, 2005]. Il n'y a pas de méthode systématique pour la définition de l'UF ; l'ISO 14040 [ISO 14 040, 2006] précise simplement que son choix dépend des objectifs de l'étude.

De nombreux praticiens ont identifié cette étape comme cruciale dans la réalisation de l'ACV : Frischknecht, Cooper [COOPER, 2003], Reap [REAP, 2007], Hischer [HISCHIER, 2003], etc. En particulier, Matheys souligne en 2005 l'influence du choix de l'UF sur les résultats d'ACV en montrant que ramener les mêmes données d'inventaire à différentes UF conduisaient à des résultats différents [MATHEYS, 2005].

La définition de l'unité fonctionnelle est donc une étape très importante.

➤ *Définition du système*

Le système est divisé en « processus élémentaires » (cf. figure 9) qui représentent les différentes étapes du cycle de vie. Ils sont reliés par des « flux intermédiaires ». Enfin, chaque processus élémentaire est traversé par des flux entrants et sortants qui constituent le lien avec l'environnement. Les flux entrants sont les consommations de matières tandis que les flux sortants sont les émissions dans l'eau, l'air ou le sol.

Le recensement des flux entrants et sortants des processus élémentaires qui composent le système constitue l'inventaire ACV.

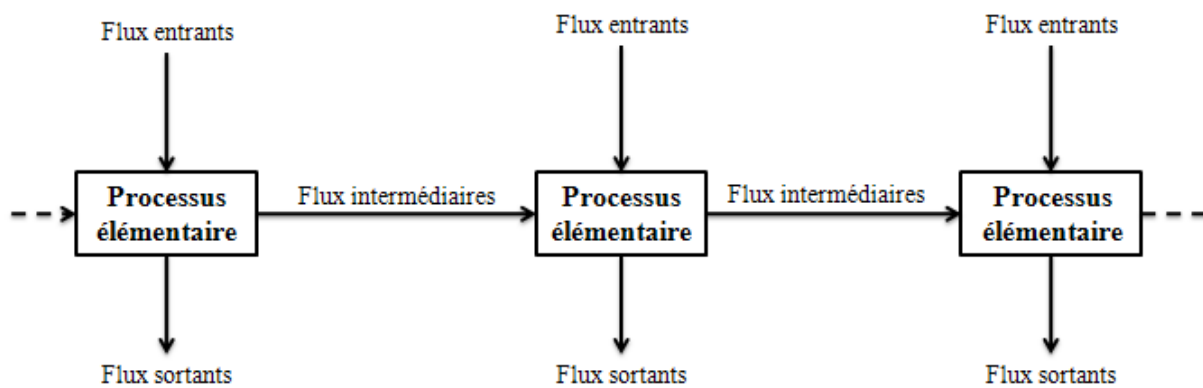


Figure 9 : Exemple de processus élémentaires au sein d'un système de produits (source : ISO 14 040)

➤ *Les limites du système*

La fonction du système permet de définir les frontières de l'étude : tous les processus élémentaires nécessaires à la réalisation de la fonction du système sont inclus dans ces frontières. En particulier, elles intègrent les grandes étapes du cycle de vie (extraction et transformation des matières premières, production, utilisation, élimination) [ISO 14 040, 2006].

Toutefois, le système peut devenir complexe à décrire et à évaluer. Ainsi, lors de la réalisation d'ACV il est fréquent de négliger les processus représentant par exemple moins de 5 % de la masse totale, ou contribuant à moins de 5 % de la consommation énergétique ou des émissions d'un polluant [LE BORGNE, 1998] L'important est que le pourcentage seuil soit annoncé, et que les étapes négligées soient définies de manière transparente dans cette première étape.

Une fois cette première étape terminée débute celle de l'inventaire.

B. Etape 2 : L'inventaire

L'inventaire des extractions et émissions est le bilan comptable des flux de matières et d'émissions qui traversent les limites du système.

Les données recueillies sont rapportées à l'unité fonctionnelle choisie lors de la première étape.

➤ *Qualité des données*

Les données d'inventaire sont à chercher auprès des industriels, de sources bibliographiques, de mesures directes ou encore de bases de données, comme par exemple la base ecoinvent [FRISCHKNET, 2005].

La qualité des données est essentielle pour la crédibilité et la valeur de l'ACV réalisée. Plusieurs indicateurs de qualité des données ont été développés : fiabilité, exhaustivité, corrélations géographiques temporelles et technologiques, taille de l'échantillon, etc. Il s'agit d'approches qualitatives développées notamment dans les travaux respectifs de FUNTOWITCZ, WEIDEMA et LABOUZE pour estimer l'incertitude liée à la réalisation de l'inventaire [FUNTOWITCZ, 1990] [WEIDEMA, 1996] [LABOUZE, 1996]. L'approche consiste à attribuer une note comprise entre 1 et 5, selon des critères définis, à chaque donnée utilisée et pour chaque indicateur. Cette méthode ne permet qu'une analyse qualitative des données, mais présente l'avantage d'identifier les données les moins fiables de l'étude.

Toutefois, qualifier chaque donnée de l'étude ne permet pas une évaluation aisée de la qualité globale de l'étude, dans la mesure où seul un intervalle de notes minimum et maximum peut être obtenu [LE BORGNE, 1998]. Il convient alors de compléter l'évaluation de la qualité des données par l'identification des plus influentes sur les résultats, et une analyse de l'incidence de leurs incertitudes sur le bilan

L'approche envisagée pour évaluer les incertitudes liées à la qualité des données sera présentée lors de la description de l'étape 4 de l'ACV (voir 2.2.2.D, Etape 4 : Interprétation – Analyses de sensibilité et incertitudes).

➤ *Coproduits et allocations*

L'allocation peut intervenir lorsque le système étudié génère des coproduits, ce qui est le cas d'un grand nombre de processus de production et de traitement de déchets. Par exemple, la production de biodiesel génère également des huiles, de la glycérine et des tourteaux [ADEME, 2010]. Or, on ne s'intéresse généralement qu'à un seul de ces produits.

Les déchets qui sont éliminés dans un centre de traitement collectif à différents flux de déchets et ceux qui peuvent être recyclés sans être réinjectés dans le système (recyclage en boucle ouverte) posent également des problèmes d'allocation

En conséquence, se pose la question d'attribution des charges environnementales entre le produit étudié et les coproduits, ou déchets du système. La norme ISO 14 001 préconise alors, par ordre de préférence :

- La modification du système analysé pour éviter l'allocation :

- Découpage du système : il s'agit de décomposer le système en sous-systèmes indépendants liés à des sous-fonctions et d'identifier les processus liés uniquement au coproduit. Cette technique n'est pas toujours applicable car les liaisons entre produits et coproduits ne permettent pas toujours la décomposition,
- L'élargissement du système (ou méthodes par substitution) : le système est élargi de manière à contenir ceux remplissant les co-fonctions. On considère alors que le coproduit est susceptible d'être produit par un autre processus déterminé, et qu'alors les émissions/consommations liées au produit substitué sont évitées. Cette réduction d'émission va donc créditer le système étudié. Cette méthode n'est applicable que si un produit substitué existe, et que les données d'émissions/consommations qu'il engendre sont accessibles [JOLLIET, 2005],
- L'établissement de règles d'affectation, sur la base de critères physiques (masse, volume, pouvoir calorifique inférieur, etc.),
- L'allocation financière (sur la base des valeurs économiques moyennes), lorsque la modification du système et autres types d'allocations ne peuvent s'appliquer.

Certains praticiens s'arrêtent à cette étape et se contentent d'interpréter l'inventaire. On appelle alors leurs études des Inventaires du Cycle de Vie (ICV). L'étape suivante, l'analyse de l'impact, permet une interprétation plus poussée de l'inventaire.

C. Etape 3 : L'interprétation d'inventaire, les indicateurs d'impacts potentiels ACV

La partie analyse d'impact constitue la troisième phase de l'ACV. Sa fonction est de traduire les valeurs de l'inventaire en un nombre réduit d'impacts potentiels (effet de serre, acidification de l'atmosphère, santé humaine ...) pour en faciliter l'interprétation.

Il existe différentes méthodes qui proposent des indicateurs d'impact traduisant l'effet potentiel sur l'environnement des substances émises par le système. Le terme « potentiel » est important car il ne s'agit pas d'impact réellement mesuré.

De manière générale, l'analyse de l'impact se réalise en 3 étapes. Les deux premières sont systématiques : la classification, puis la caractérisation. Une troisième est facultative, l'évaluation [ISO 14 044, 2006].

➤ **La classification**

L'inventaire comprend un grand nombre de données, la classification permet de grouper dans une même catégorie les flux d'inventaire participants au même impact environnemental (effet de serre, eutrophisation, acidification, etc.).

➤ **La caractérisation**

La sous-étape de caractérisation permet de quantifier les contributions des différents flux aux impacts potentiels. Les émissions et extractions au sein chaque catégorie auxquelles elles contribuent sont pondérées via des *facteurs de caractérisation*. L'impact potentiel IP est calculé selon la formule suivante :

$$\mathbf{IP} = \sum_i (\mathbf{m}_i \cdot \mathbf{F}_i) \quad \text{avec } m_i \text{ la masse du flux } i \text{ et } F_i \text{ le facteur de caractérisation}$$

L'unité de l'impact potentiel dépend de l'unité du facteur de caractérisation. Par exemple, toutes les émissions de GES seront traduites en émissions équivalentes de CO₂.

Les facteurs de caractérisation peuvent être construits à partir des propriétés des substances et/ou des connaissances sur leurs mécanismes d'impact. Plusieurs méthodes d'analyse de l'impact sont disponibles et ont développé leurs propres facteurs de caractérisation.

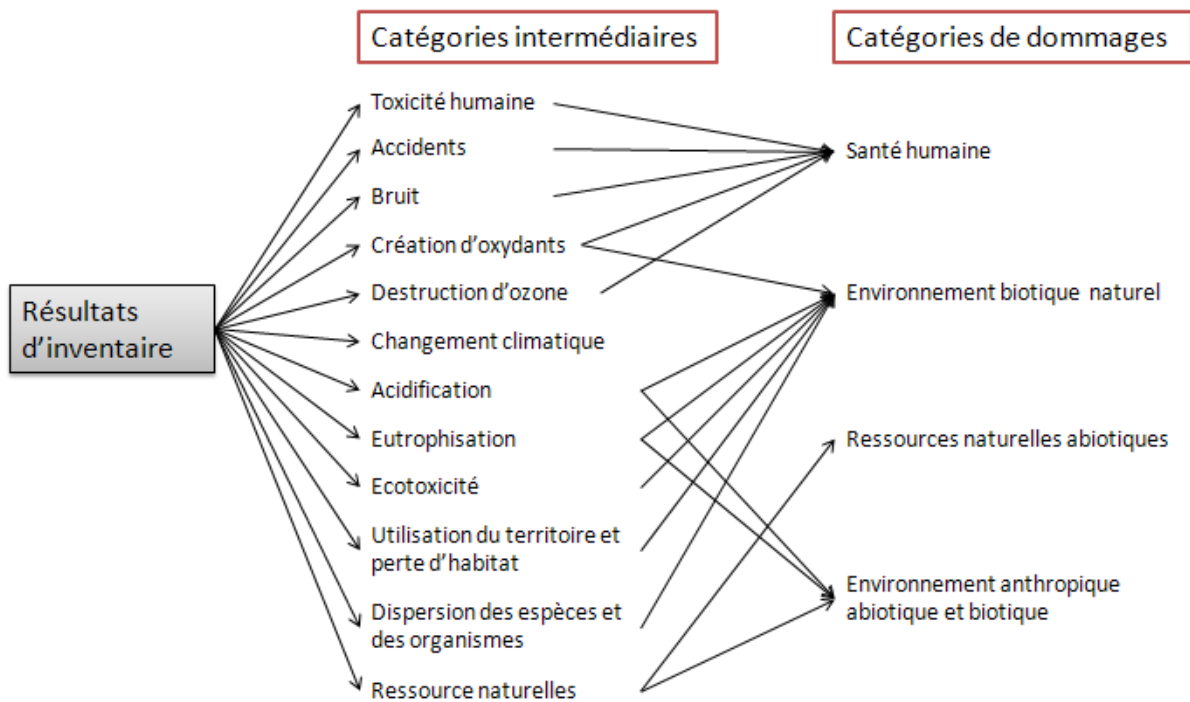


Figure 10 : Catégories intermédiaires et catégories de dommages

Deux approches coexistent, la figure 10 en illustre la différence :

- L'approche « catégories intermédiaires » (*midpoint*) qui permet d'obtenir l'impact potentiel effet de serre, eutrophisation, acidification de l'atmosphère... Elle utilise des indicateurs intermédiaires. Le terme intermédiaire est utilisé car il ne s'agit pas d'aller jusqu'à évaluer les dommages.
- L'approche « catégories de dommages » (*endpoint*) qui considère les dommages sur différents sujets à protéger comme la santé humaine ou les écosystèmes [JOLLIET, 2005]. Elle utilise des indicateurs de dommages.

Il n'y a pas une méthode de référence particulièrement utilisée par les praticiens. Chacun choisit les indicateurs d'impact qui lui semblent les plus pertinents de manière explicite et transparente. Dans ce mémoire, les méthodes d'analyses de l'impact utilisées seront explicitées dans l'annexe 2.

➤ *L'évaluation (étape facultative)*

Elle est constituée de 3 étapes optionnelles, du fait de leur caractère non purement scientifique et subjectif.

La *normalisation* des résultats obtenus pour le système évalué pour chaque impact potentiel considéré à ceux d'un système référentiel (résultats d'impacts potentiels moyens d'un continent, d'un habitant moyen ou encore d'un système équivalent).

Le *regroupement* est simplement une réorganisation et un tri des impacts potentiels obtenus selon des critères définis : caractéristiques des impacts, échelle spatiale (impact globaux, locaux et régionaux, ou encore hiérarchisation des impacts selon les priorités des décideurs de l'étude).

La *pondération* consiste à hiérarchiser les impacts entre eux grâce à des facteurs de pondérations attribués par les décideurs de l'étude dans le but d'aboutir à une note finale. Cependant, cette évaluation ne s'inscrit pas dans une démarche purement scientifique, elle peut aussi être basée sur des critères politiques, économiques, etc. Les textes normatifs déconseillent son utilisation [ISO 14 044, 2006].

D. Etape 4 : L'interprétation

Elle analyse les résultats obtenus lors de l'étape précédente, elle permet de tirer des conclusions et doit présenter les limites de l'étude.

Les résultats peuvent être interprétés au niveau de l'inventaire brut comme au niveau de l'évaluation de l'impact potentiel. Les contributions des différentes phases du cycle de vie sont comparées de manière systématique. Par ailleurs, les émissions qui contribuent le plus à l'impact interprété doivent être identifiées.

➤ *Analyses de sensibilité et incertitudes*

Pour vérifier la fiabilité des résultats d'ACV obtenus, et en identifier les paramètres clés, la norme ISO 14 044 préconise la réalisation d'analyses d'incertitude et de sensibilité [ISO 14 044, 2006].

Les **analyses de sensibilité** permettent la détermination des points clés du cycle de vie, l'évaluation de la robustesse des résultats obtenus et de leur sensibilité aux données, hypothèses et modèles utilisés. Il s'agit en fait de faire varier les données d'entrée du modèle et d'analyser l'incidence de ces variations sur les résultats [JOLLIET, 2005].

L'objet de l'**analyse d'incertitude** est de vérifier comment les incertitudes affectent les résultats de l'ACV considérée. Du fait de l'absence de consensus méthodologique, peu d'études incluent aujourd'hui ces analyses. La réalisation d'ACV génère différents types d'incertitudes (incertitudes

liées à l'inexactitude ou au manque de données, aux modèles, aux hypothèses considérées, aux variabilités spatio-temporelles, etc.) qui interviennent à différentes étapes de l'analyse (définition des objectifs, réalisation de l'inventaire, etc.). Les outils disponibles pour l'évaluation de l'incertitude sont spécifiques d'un type d'incertitude [REAP, 2008]. Les praticiens ont cherché à classer les incertitudes selon leur source. BJÖRKLUND propose en 2002 une typologie détaillée [BJÖRKLUND, 2002] présentée dans l'annexe 1. L'analyse de la localisation des différents types d'incertitudes dans les différentes étapes de l'ACV permet à LEROY d'identifier que « la gestion des incertitudes en ACV passe prioritairement par le traitement des incertitudes inhérentes à la réalisation de l'inventaire » [LEROY, 2009].

Dans ce mémoire, on se focalisera ainsi sur les incertitudes liées à l'étape d'inventaire. Une donnée peut être très incertaine et contribuer de manière insignifiante à l'incertitude du résultat. Ainsi, l'approche envisagée consiste à identifier la sensibilité des résultats ACV à des paramètres clés, avec des analyses de sensibilité pour prioriser et réduire les incertitudes de ces données clés.

2.3.3. Les limites de l'ACV

La réalisation d'une ACV implique de nombreux choix méthodologiques tels que la définition de l'unité fonctionnelle (UF), la définition du périmètre d'étude, la définition des clés d'allocations dans le cas de systèmes multi-produits, ou encore le choix des indicateurs d'impacts à utiliser. Or, ces hypothèses et choix influencent les résultats d'analyse et doivent alors être vérifiés, ainsi que leurs incidences sur les résultats [LE BORGNE, 1998]. Elles doivent être énoncées et explicitées avec transparence dans le rapport d'étude et un soin particulier doit être apporté à la phase d'interprétation. A cet égard, une revue critique est pertinente.

Lors de la phase de collecte des données, le praticien se heurte souvent à des problèmes liés à leur disponibilité ou encore à leur confidentialité. De plus, s'ajoute la difficulté liée à la qualité des données, essentielle pour obtenir des résultats de qualité. La qualification des données est donc à réaliser pour fournir un bon aperçu des forces et faiblesses de l'inventaire et permettre leur usage dans la phase d'évaluation.

Par ailleurs, la pertinence de l'ACV pour l'évaluation d'impacts sanitaires ne fait pas consensus. L'inventaire ne tient compte ni de la localisation, ni de la temporalité des émissions de substances. Il n'est considéré que la nature de la substance, or les paramètres spatio-temporels ont une influence déterminante sur l'impact sur l'environnement. Une étude publiée en 2008 dans la revue « Environnement, risque & santé » propose une comparaison entre l'ACV et l'outil de référence d'évaluation des risques sanitaires à l'échelle locale, l'EQRS (Evaluation Quantitative des Risques

Sanitaires). La comparaison a été réalisée à la fois sur le plan théorique et à travers un cas d'application. Ces deux niveaux d'études montrent l'inadéquation de l'approche ACV aux impacts locaux (échelles spatio-temporelles, nombres de substances considérées, caractéristiques spécifiques des populations, etc.) et concluent à la non pertinence de l'ACV pour l'évaluation des risques sanitaires [BOIZE, 2008]. Le présent mémoire de thèse vise à évaluer un km parcouru par un véhicule, source mobile, ce qui accentue encore l'importance des paramètres spatio-temporels. Ainsi, lors de la réalisation de l'ACV du VE dans cette étude, aucun indicateur d'impact ACV ne sera utilisé pour l'impact sanitaire.

2.3.4. Les ACV dans le secteur automobile

A. Utilisation générale de l'ACV

Les premières études ACV appliquées à l'automobile par des constructeurs européens datent des années 1990 [EUCAR, 1996] [LE BORGNE, 1998]. Aujourd'hui les constructeurs, utilisent l'ACV à la fois comme outil d'éco-conception, pour choisir les meilleures options techniques au regard de considérations environnementales, mais également pour fournir au consommateur une information environnementale accessible et complète. On peut citer ici RENAULT et TOYOTA qui communiquent beaucoup leurs résultats d'ACV [SENAT, 2005]. Par ailleurs, les constructeurs automobiles développent en commun des projets de recherche non concurrentiels sur l'évaluation Well-to-Wheels des carburants de remplacement et des nouvelles alternatives aux véhicules équipés de moteur à explosion, au sein du EUCAR (European council for Automotive research), [EUCAR, 1996].

Pour le VCI, les principales études réalisées considèrent généralement uniquement l'impact effet de serre et montrent la prédominance de la phase utilisation : approvisionnement en carburant et combustion dans le véhicule. Selon ces études (voir figure 11), l'étape d'utilisation contribue à plus de 70 % de l'impact effet de serre, alors que la phase de recyclage est peu influente [HELMS, 2010], [SIMONS, 2010], [SENAT, 2005]. Il est à noter que ces études sont difficiles à comparer du fait de la variabilité des données d'inventaire qu'elles utilisent (type de véhicule, niveau de consommation etc.).

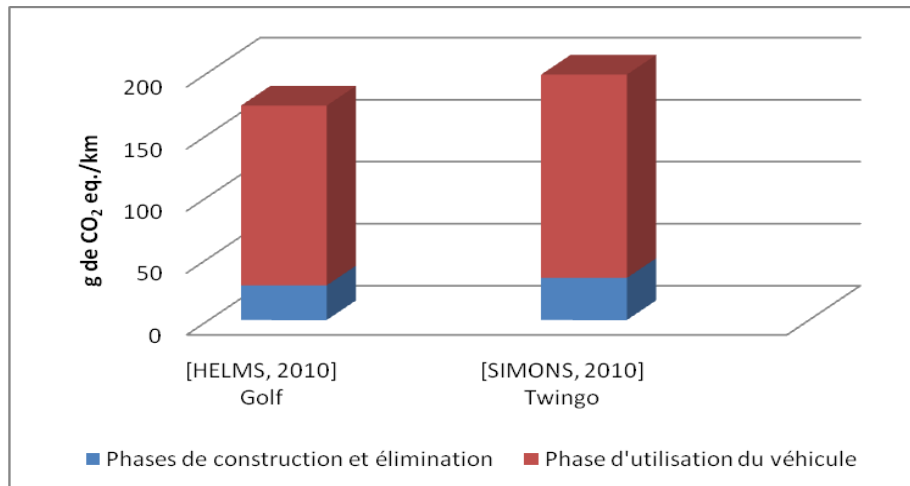


Figure 11: Impacts potentiels "effet de serre" des VCI (diesel) des études de HELMS et SIMONS (indicateur IPCC à horizon 100 ans)

Parallèlement, de nombreuses analyses de cycle de vie appliquées aux véhicules sont publiées, souvent avec l'objectif de comparer les résultats obtenus pour différentes solutions alternatives (carburant alternatif, ou innovation technologique) ou avec ceux d'un véhicule classique. De très nombreuses études « Well to Wheel » comparent les performances environnementales de véhicules utilisant différents types de carburant : GPL (gaz de pétrole liquéfié), GNV (gaz naturel véhicule), agro carburants, diesel, etc. Leurs résultats ne sont pas toujours comparables, du fait des hypothèses de bases différentes et des données utilisées [ARTECONI, 2009]. Par exemple, les études peuvent être appliquées à des véhicules différents (bus et véhicules légers [ANTOINE, 2003], camions de collectes de déchets [LOPEZ, 2008], camions [ARTECONI, 2009]), et les données de consommations et d'émissions peuvent provenir de mesures sur banc à rouleau, sur des trajets réels ou simplement de recherche bibliographique. De même, les données relatives aux phases construction et éliminations ont des provenances diverses et ne sont pas toujours justifiées de manière transparente.

B. Les premières ACV appliquées au VE : convergences et divergences

➤ *Vue d'ensemble : Objectifs et résultats des études publiées*

Deux types d'études sont publiés, appliquant l'ACV aux véhicules électriques :

- ⇨ **Les études visant à évaluer les performances environnementales de la technologie**, en comparaison avec les véhicules à combustion interne [HELMS, 2010], [SIMONS, 2010]. Ces

études montrent la sensibilité des résultats au moyen de production électrique considéré pour recharger le véhicule et concluent que le VE n'est pas toujours une solution intéressante d'un point de vue environnemental global.

⇒ **Les études évaluant la performance environnementale des batteries de VE** [RANTIK, 1999], [VAN DEN BOSSCHE, 2005], [ZACKRISSON, 2010] [NOTTER, 2010]. Pour considérer l'étape d'utilisation, les frontières des systèmes étudiés intègrent alors généralement le véhicule. Ces études cherchent à identifier les technologies de batteries les plus intéressantes au regard de l'environnement, ou encore à aider à optimiser les technologies de batteries étudiées en identifiant leurs points faibles.

➤ *Identification des divergences et difficultés*

L'annexe 3 décrit les principales hypothèses de chacune de ces études. Afin d'illustrer l'analyse, le tableau 4 en présente une version simplifiée, la description de ces études y étant moins précise et le nombre d'études considérées réduit à celles dont l'objectif principal est de comparer le VE à d'autres technologies de véhicule.

La totalité des ACV appliquées au VE visent le même objectif : comparer différentes technologies de véhicule, ce qui implique logiquement les mêmes besoins en termes de données. Or, de manière générale, ces études ne sont pas comparables du fait de la différence dans les hypothèses de bases et les données utilisées.

L'analyse du tableau de l'annexe 3 permet l'identification des difficultés principales. Les différences portent sur la prise en compte des trois éléments suivants :

- *Convergence et divergences liées au niveau de détail des données utilisées*

Ces différences sont liés au fait que les VE sont encore en développement. Les principales divergences portent sur les données utilisées dans l'ICV et la variabilité des hypothèses méthodologiques considérées.

- **Les données relatives aux batteries** : Tout d'abord, les différentes études ne considèrent pas les mêmes chimies et capacités de batterie. Or comme présenté dans la partie 1.2.1.C de ce mémoire, les différentes technologies de batteries ont des caractéristiques différentes (densité énergétique, densité de puissance, durée de vie etc.)

Le niveau de détail concernant les données relatives aux batteries est plus important pour les études cherchant à comparer différentes technologies de batteries. Par exemple, ZACKRISSON prend en compte durée de vie cyclique et calendaire, rendement de charge et profondeur de décharge alors que HELMS précise seulement la chimie de batterie considérée. De plus, la durée de vie des batteries est généralement considérée égale à celle du véhicule. La seule étude considérant plusieurs jeux de batteries sur la durée de vie du véhicule ne considère que leur durée de vie cyclique [RANTIK, 1999].

Enfin, les batteries lithium-ion pour les véhicules électriques sont des technologies émergentes, et l'accès à leurs données de production et de recyclage demeure difficile [HELMS, 2010]. De ce fait, peu d'études considèrent de manière transparente le recyclage.

- **Les données de consommation** utilisées par les VE étudiés proviennent de la littérature [ZACKRISSON, 2010], ou sont issues de modèles de consommations [VAN DEN BOSSCHE, 2005], [HELMS, 2010] utilisant des cycles réels ou d'homologation. HELMS propose un scénario d'usage (70% urbain, 20 % extra urbain, et 10 % autoroute), et considère le freinage récupératif, et l'utilisation des auxiliaires (puissance moyenne annuelle).
- **L'hypothèse de durée de vie kilométrique** des véhicules est variable (de 100 000 à 200 000 km) selon les études

- *Convergences et divergences liées aux choix méthodologiques*

Les études visant à évaluer le VE peuvent être ramenées au kilomètre parcouru. En particulier, on note que l'unité fonctionnelle de l'étude de HELMS, « durée de vie du véhicule en kilomètre avec un usage défini », est la plus précise : elle spécifie l'usage du véhicule [HELMS, 2010].

Le périmètre des deux études inclus la totalité du cycle de vie des véhicules, SIMONS considérant en plus les émissions hors échappement [HELMS, 2010] [SIMONS, 2010].

Si on considère les études publiées après 2000, la majorité des études analysées (80%) évalue l'impact des VE sur l'effet de serre. Les impacts acidification, épuisement des ressources (fossiles et minérales), eutrophisation, smog photochimique, et destruction de la couche d'ozone sont moins utilisés (20 à 40% des études). Deux études utilisent l'indicateur d'ecoindicator 99, les résultats

obtenus avec cette méthode sont difficiles à interpréter car exprimés sous la forme d'un score unique (après normalisation et pondération de résultats intermédiaires). Ils ne peuvent être ainsi comparés à ceux des autres études n'utilisant pas cet indicateur [NOTTER, 2010] [VAN DEN BOSSCHE, 2005]. Seuls NOTTER & Al proposent le calcul de la demande énergie cumulée (« CED ») sur le cycle de vie du véhicule [NOTTER, 2010].

- **Bilan**

Les ACV appliquées aux véhicules électriques déjà publiées sont difficiles à comparer, principalement du fait des **différences de données d'entrées utilisées**. Ces différences sont à la fois liées :

- *A la nature du système* considéré (type de véhicule, chimie de batterie),
- *A la variabilité du niveau de détail* considéré dans le modèle (par exemple pour les batteries (profondeur de décharge, rendement de charge etc.)
- *aux hypothèses retenues* (consommations, mix électrique, kilométrage sur la durée de vie etc.).

Par ailleurs, les impacts étudiés sont globaux, et l'on retrouve principalement l'évaluation de l'impact effet de serre, épuisement des ressources et acidification.

Finalement, au regard de ces éléments, il paraît important d'évaluer l'incidence des différentes données utilisées dans l'inventaire du cycle de vie du véhicule sur les résultats d'ACV.

| | Systeme | Choix méthodologiques | | | Données | |
|--------------------------|---|--|--|---|---|---|
| Références, objectif(s), | Véhicule | UF | Périmètre | Impact considérés | Consommations du véhicule et hypothèses liées à l'usage du véhicule | Caractéristiques des batteries |
| HEMS, 2010 | Type golf 100 000 km | Durée de vie en km du véhicule avec différent usages | Cycle de vie du VE | Effet de serre Acidification | <ul style="list-style-type: none"> • <u>Véhicule thermique</u> Emissions et consommations issues de la littérature spécialisée • <u>Véhicule électrique</u> Consommation obtenues via un modèle Hypothèses d'usages - Cycles Prise en compte des auxiliaires et du freinage récupératif Différents mix électriques testés | Capacité 25 kWh Batterie Lithium-ion (sans plus de précisions) Durée de vie égale à celle du VE |
| SIMONS, 2010 | Type Twingo RENAULT 10 ans | km parcouru | Cycle de vie du VE Prise en compte des polluants hors pot d'échappement | <ul style="list-style-type: none"> • <u>ACV</u> Effet de serre Epuisement des ressources • <u>Phase d'usage</u> Effet cancérigène et respiratoire | <ul style="list-style-type: none"> • <u>Véhicule thermique</u> niveau de consommation donnée par Renault sur son site internet • <u>Véhicule électrique</u> Niveau de consommation obtenu par le calcul Différents mix testés | <ul style="list-style-type: none"> • Données issues de la littérature scientifique et discutées avec le producteur de la batterie <ul style="list-style-type: none"> - Batterie Na-NiCl₂ (ZEBRA) - Décharge complète - 1500 cycles, 10 ans - Durée de vie égale à celle du VE |

Tableau 4: Comparaison des études publiées sur l'ACV appliquée au VE (voir annexe 3)

3. Problématiques et questions de recherche

Comme présenté dans la première partie de ce mémoire de thèse, le contexte actuel semble favorable à l'essor de solutions alternatives aux véhicules à combustion interne, visant à la fois à limiter l'épuisement des énergies fossiles et l'émission de polluants atmosphériques locaux et de GES.

En particulier, le VE semble être une possibilité séduisante, de par le rendement de sa chaîne de traction, l'absence de bruit, d'émissions à l'échappement lors de l'usage, etc. Les récents progrès sur les batteries laissent espérer une autonomie plus importante. Il convient alors d'en réaliser un bilan environnemental exhaustif, évaluer l'ensemble des critères définis, de manière à identifier tout éventuel transfert de pollution vers des étapes du cycle de vie autres que la phase de roulage, prépondérante pour le VCI. Toutefois, il est à noter que la plupart des VE évalués sont aujourd'hui à l'état de prototype, et le manque de retour d'expérience est un frein à la collecte de données fiables.

L'analyse des enjeux environnementaux liés aux véhicules particuliers a permis d'identifier une série de critères sur lesquels les véhicules devront être évalués : niveau de consommation d'énergies fossiles, d'émission de GES et de polluants locaux (émissions liées ou non à l'échappement) et d'émission sonore.

La méthodologie ACV et l'approche « cradle-to-grave » peut permettre la considération de l'intégralité du cycle de vie du véhicule : phase de construction (dont la batterie), d'usage et d'élimination. Au vu des particularités de la chaîne de traction, il apparaît en effet essentiel d'intégrer les phases de construction et d'élimination au périmètre de l'étude.

Les premières études d'ACV appliquées au VE sont très récentes ([HELMES, 2010], [SIMONS, 2010]), aussi, l'analyse comparative des études déjà publiées a été élargie aux publications ayant pour objectif d'évaluer la performance environnementale des batteries de VE, dont le périmètre intègre le véhicule [RANTIK, 1999] [VAN DEN BOSSCHE, 2005] [ZACKRISSON, 2010] [NOTTER, 2010]. Elles ne sont pas comparables du fait de la variabilité du niveau de détail des données utilisées dans l'inventaire et des choix méthodologiques réalisés. Trois types de différences portant sur les données d'entrées sont identifiés : la *nature du système évalué* (type de véhicule, chimie de batterie, durée de vie etc.), la *variabilité de la complexité du modèle* (par exemple pour les batteries : profondeur de décharge, rendement de charge, etc.), *les hypothèses réalisées* (consommations, mix électrique etc.). Aujourd'hui, aucune étude ne s'est attachée à évaluer l'incidence de chacun de ces éléments sur les

impacts potentiels des véhicules. Pourtant, ces questions apparaissent essentielles au regard du caractère prospectif de la technologie évaluée et des difficultés rencontrées lors de la collecte des données d'inventaire.

Ainsi, **l'objectif de ce mémoire de thèse est d'identifier les paramètres clés et leurs incidences respectives sur le bilan environnemental du VE pour les différents critères évalués.** La difficulté principale est la collecte de données fiables, qui implique le recours à des compétences diverses (transport, stockage de l'énergie et évaluation environnementale). De plus, LEROY ayant identifié la gestion des incertitudes liées à l'inventaire des données comme prioritaires, les analyses de sensibilité seront utilisées pour identifier les données clés, sur lesquelles il sera important de réduire les incertitudes [LEROY, 2009].

Enfin, compte tenu du caractère mobile du système à évaluer et des limites de l'ACV quant à la prise en compte des facteurs spatio-temporels, l'évaluation des impacts sanitaires des émissions à l'échappement par cette méthode n'est pas jugée pertinente. Ainsi, du fait de la multiplicité des critères identifiés et de la complexité de l'approche à mettre en œuvre, il apparaît difficile d'évaluer chacun d'entre eux à travers ces travaux de thèse. Aussi, ce mémoire ne traitera que les questions relatives à la consommation d'énergies non renouvelables, au bilan des émissions atmosphériques réglementées à l'échappement du pot d'échappement sur l'effet de serre, à l'eutrophisation et à l'acidification. Ces travaux seront donc à compléter par d'autres méthodes d'évaluation.

Partie 2: Spécificités de l'évaluation environnementale du VE - Usages, consommations et batteries

1. Spécificités de l'ACV du VE

L'objet de cette partie est de spécifier le champ de l'étude, ce qui implique la définition du service rendu (i.e. la fonction du système) pour une technologie non éprouvée, sur laquelle le retour d'expérience est faible.

1.1. Nature du service rendu

1.1.1. Réflexion sur l'unité fonctionnelle

La première partie de ce mémoire a montré combien la définition de l'unité fonctionnelle (UF) était essentielle dans la réalisation d'une ACV.

La fonction principale du véhicule étant le transport de personnes, il faut trouver une unité permettant la quantification de cette fonction. Plusieurs possibilités sont envisageables:

- **Le kilomètre parcouru** : C'est l'UF que l'on retrouve le plus souvent dans les ACV de véhicules publiées [PEHNT, 2001], [PCR, 2005] [FERNANDO CONTADONI, 2003]) [DUBARRY, 2007], [SPIELMANN, 2006], [SIMONS, 2010]. D'autres optent pour « le nombre de kilomètres parcourus le long de la durée de vie du véhicule » [HELMS, 2010], ce qui est en fait la même UF puisqu'il suffit de diviser les résultats obtenus par la durée de vie kilométrique pour obtenir des résultats comparables.

Le « **kilomètre parcouru** » ne suffit pas à qualifier la fonction des véhicules étudiés, en réalité, il est nécessaire de reformuler ces UF en indiquant les hypothèses des études considérées qualifiant la nature du « kilomètre parcouru » (type de parcours, consommation etc.). Ainsi par exemple, SIMONS utilise l'UF suivante : le kilomètre parcouru par un VE consommant 22.3 kWh/ 100 km [SIMONS, 2010] (voir annexe 3).

Par ailleurs, ces UF intègrent implicitement les paramètres « condition de conduite », « trafic », « temps », « performance aérodynamique », « habitudes du conducteur », « état de la route » etc. Tous ces paramètres influent sur la consommation du véhicule et donc sur son bilan environnemental.

- **Un trajet spécifique** : Une autre UF possible serait de considérer un déplacement spécifique A→B, par exemple un trajet domicile-travail. Considérer un déplacement en particulier implique de ne pas considérer l'ensemble des usages des véhicules. Or, un véhicule est construit pour répondre à des usages multiples (déplacements domicile-travail, domicile-

loisirs, ou encore déplacements week-end, vacances etc.), dont les caractéristiques (durées, kilométrages, etc.) sont bien différentes. Déterminer la part du kilométrage total à allouer à cet usage précis serait une limite importante liée au choix de cette UF.

Les objectifs visés dans cette étude sont l'évaluation et la comparaison du VE à d'autres véhicules pour différents usages. L'application de l'unité fonctionnelle « trajet spécifique » ne permettrait que de comparer des véhicules différents pour un déplacement figé (le déplacement A→B), et ne répond donc pas aux objectifs visés.

⇒ **L'unité fonctionnelle retenue est donc le « kilomètre parcouru » dont sera spécifiée la nature de manière à qualifier la fonction du véhicule étudié.** Elle permettra non seulement la comparaison entre différentes technologies de véhicules (VE et VCI), mais aussi celle des résultats obtenus avec ceux des autres études.

Les véhicules considérés peuvent présenter des durées de vie ou masses différentes : elles seront considérées comme paramètres des études (au même titre que la durée de vie des batteries par exemple). Leur influence sur le bilan sera vérifiée.

De la même façon, il est facilement possible de modifier l'UF pour considérer le nombre de personnes dans le véhicule, et de ramener les résultats au kilomètre parcouru / passager lorsque nécessaire.

1.1.2. Spécification de l'unité fonctionnelle

Il apparaît rapidement que les performances techniques des VE différeront de celles des VCI, du fait de leur autonomie plus limitée et du temps de recharge. En conséquence, ces véhicules correspondront probablement à des utilisations différentes. Cela ne sera pourtant pas traduit dans le choix de la grandeur « km parcouru ». Par exemple, un kilomètre parcouru au cœur d'un trafic dense de centre ville ne présentera pas les mêmes caractéristiques de vitesse et d'accélération, donc de consommation, qu'un kilomètre parcouru sur une voie rapide, fluide.

→ Ainsi, la grandeur « km parcouru » ne traduit pas de manière assez détaillée la fonction réelle du système pour permettre une comparaison crédible entre les différentes technologies. Il faut donc compléter l'UF.

Une proposition de Rolf Frischnecht est de d'identifier des fonctions comparables en fonction du jugement de l'utilisateur, c'est-à-dire finalement en fonction de ce que lui va considérer substituable [COOPER, 2003]. Or, il est probable que le conducteur considère substituable au véhicule à combustion interne un ensemble de moyens qui lui permettra des usages identiques.

→ **La comparaison des résultats d'ACV pour les différents véhicules étudiés impose donc une spécification des usages dans l'UF.**

Spécifier l'usage impose une réflexion sur les usages futurs des VE, comme sur ceux des véhicules alternatifs étudiés. Cela permettrait de déterminer leurs usages communs.

Les cycles réels de conduites (présentés dans le chapitre 1, § 2.1.2.A) décrivent les différentes conditions de circulation via des ensembles de sous-cycles spécifiques (urbain, route, autoroute).

→ **L'UF finalement retenue est donc le « km parcouru spécifique à un usage fixé ». Cet usage pourra être par exemple « urbain », « route » ou « mixte » et sera fixé lors de l'approfondissement de la phase d'utilisation du véhicule (partie 2-2).**

1.2. Nature du système étudié

1.2.1. Une technologie encore en développement

Même si les premiers VE ont été construits dès 1840 [WOLF, 1999], peu de ces véhicules circulent aujourd'hui dans le parc automobile de particuliers. Les progrès technologiques récents, notamment dans le domaine des batteries, promettent des VE plus performants mais ces véhicules sont encore aujourd'hui en cours de développement et par conséquent, de nombreuses incertitudes subsistent :

- **Incertaines sur l'efficacité des technologies mises en œuvre dans le véhicule (chargeurs, batteries etc.) et leurs évolutions futures :** les VE sont aujourd'hui évalués sur la base des performances actuelles de prototypes, qui peuvent être mesurées en laboratoire. Or, d'une part les résultats obtenus en laboratoire peuvent être différents de la réalité, et d'autre part les performances des VE sont susceptibles d'être considérablement améliorées dans les prochaines années. Par ailleurs, le manque d'expérience fait que certaines données ne sont pas encore connues, comme par exemple la durée de vie des batteries Lithium.
- **Incertaines liées à l'évolution de la société :** le système « VE » interagit avec le milieu dans lequel il évolue. Il échange avec lui des flux de produits, de matières et d'énergie. Toutefois, la nature de ces flux est largement influencée par la société et ses évolutions.

Par exemple, les mix énergétiques, i.e. la proportion des différentes sources dans la production d'énergie (énergie nucléaire, charbon, hydroélectricité, géothermie, énergie éolienne, etc.), sont déterminés par des politiques énergétiques nationales et varient dans le temps. Ces mix

apparaissent de manière systématique dans les flux d'ICV, et dans le cas de l'évaluation d'un système émergent se pose la question de la nature du mix à considérer.

L'usage du véhicule, dont dépend en partie sa consommation, est également difficile à appréhender du fait de la rareté de VE en circulation. Cet usage est lié à la fois aux politiques mises en œuvre pour inciter à leur usage (politiques de transport, politiques fiscales, développement des infrastructures nécessaires, politiques industrielles) et à leur appropriation par les citoyens. Ce dernier point pose une importante question : ces véhicules aux performances différentes, vont-ils faire évoluer les comportements de mobilité ?

Ainsi, apparaît clairement un lien de dépendance entre le système étudié et la société dans laquelle il évolue. Il est difficile d'appréhender la manière dont les futurs usagers vont s'approprier et utiliser le VE, ou encore comment vont évoluer les politiques énergétiques mises en œuvre dans les différents pays ([FRISCHNECHT, 2005], [FRISCHNECHT, 2009]).

⇒ **Si la difficulté principale lorsque l'on cherche à réaliser l'ACV d'un système connu est de récolter des données fiables et représentatives pour obtenir un inventaire de qualité, évaluer une technologie émergente pose des problèmes spécifiques du fait du manque de données ou de leur qualité insuffisante.**

Dans le cas présent, les données problématiques sont :

- Les données relatives à l'usage du véhicule, en particulier leur consommation. Peu de données relatives à la consommation de ces véhicules sont disponibles, et celles que l'on peut trouver ne précise pas l'usage considéré.
- Les données nécessaires à l'inventaire des technologies embarquées dans le véhicule (en particulier les batteries), leurs performances techniques (durées de vie, rendements, etc.) et leurs évolutions futures.

1.2.2. Que l'ACV peut évaluer via des analyses de sensibilité et scénarios ?

Les analyses de sensibilités ont été présentées dans le chapitre 1, § 2.2.2.D.

Dans le cadre de cette étude, les analyses de sensibilités vont permettre de mieux gérer les difficultés liées au caractère émergent des VE. Il s'agit de faire varier la valeur d'une donnée d'entrée. Cette approche sera utilisée :

⇒ **Pour les paramètres sur lesquels trop peu de données sont disponibles, ou lorsque le retour d'expérience est insuffisant pour les fixer.** Par exemple, la donnée d'énergie consommée pour produire une batterie Lithium, ou la durée de vie de celle-ci. L'approche envisagée ici sera de faire varier les paramètres entre leurs bornes minimales et maximales et d'analyser l'incidence sur le résultat final. Cette analyse permettra d'évaluer l'importance de l'incertitude sur la donnée considérée. Par exemple, si la variation d'une donnée considérée a peu d'incidence sur les résultats, alors, réduire l'incertitude de cette donnée n'est pas prioritaire.

Une autre façon d'utiliser les analyses de sensibilité est de tester différents scénarios en faisant varier les paramètres [FRISCHNECHT, 2009], c'est-à-dire de procéder à une modification de la nature d'une donnée d'entrée (modification qualitative). Dans le cas d'évaluation des VE, il semble important de proposer différents scénarios :

- ⇒ **Scénarios d'usage** : différents scénarios d'usage peuvent être testés. Par exemple, on peut envisager d'évaluer un VE à l'usage exclusivement urbain, route ou autoroute, ou encore considérer l'utilisation d'auxiliaires. L'analyse des différents résultats pourra permettre de déterminer les usages pertinents pour les différents VE étudiés parmi ceux testés.
- ⇒ **Scénarios technologiques** : il pourra s'agir d'évaluer des VE équivalents équipés de différentes chimies de batterie (Plomb-acide, nickel-métal-hydrure, Lithium-ion...) ou encore de comparer ces résultats avec ceux obtenus pour un VCI équivalent.
- ⇒ **Scénarios énergétique** : par exemple, des tests de mix énergétiques actuels, prospectifs ou encore des mix « énergies renouvelables »

***Remarque** : Cette même approche pourra être utilisée pour tester différents scénarios de pénétration du VE, le système étudié ne sera plus alors un véhicule, mais une flotte de véhicule dont la composition variera.*

1.2.3. En déduire les paramètres clés

Ces différentes analyses de sensibilités et de scénarios permettront d'évaluer l'incidence des paramètres étudiés sur les résultats obtenus, et d'ainsi identifier ses paramètres clés.

On prévoit déjà l'importance de certains paramètres :

- ⇒ Les études déjà publiées sur l'ACV de VE ([SIMONS, 2010], [HELMS, 2010]) ont toutes souligné l'incidence prépondérante de la nature du mix électrique utilisé pour recharger le

véhicule. Il faudra vérifier l'incidence d'autres paramètres propres à l'utilisation des véhicules, telle la **consommation**, et le rendement **des éléments de la chaîne de traction**.

⇒ Par ailleurs, la principale différence entre VE et VCI réside dans l'utilisation de batteries de différentes technologies, et de masse importante. Les aspects liés à ces **batteries** doivent être approfondis.

Les parties suivantes permettront d'explicitier ces deux points.

2. Détermination des usages et cycles associés - Evaluation des consommations et des émissions

Les premières ACV appliquées au VE identifient la phase d'utilisation comme prédominante. Par ailleurs leur analyse comparative a montré la variabilité des hypothèses considérées concernant le paramètre «consommation électrique». Peu de VE circulent aujourd'hui, le retour d'expérience est donc insuffisant, l'objectif de cette partie est d'obtenir des données de consommations aussi réalistes que possible.

La figure 12 présente le raisonnement qui va être suivi dans cette partie.

Pour explicitier et développer cette approche, un exemple concret illustre la démarche : un VE à usage essentiellement urbain.

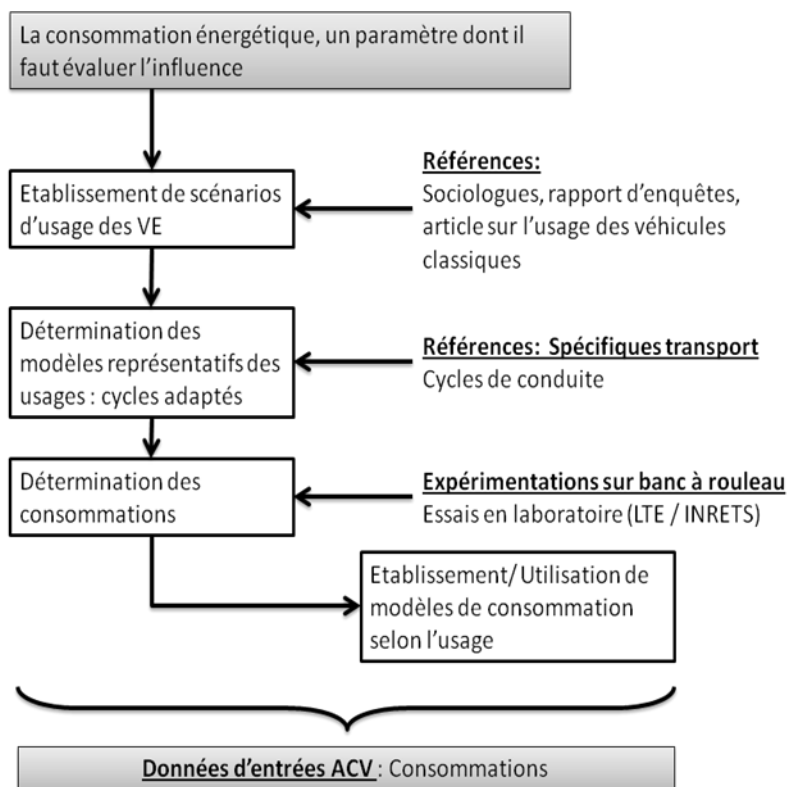


Figure 12 : Représentation du raisonnement suivi à travers la partie 2.2

Préciser le paramètre « consommation électrique », implique de s'intéresser aux usages spécifiques du véhicule étudié et d'établir des scénarios d'usages. Ensuite, il s'agira de déterminer les cycles de conduite les plus représentatifs de ces usages pour obtenir des données de consommations réalistes via des essais expérimentaux. Les résultats pourront directement renseigner nos inventaires de cycles de vie. Des essais expérimentaux seront également réalisés sur un véhicule thermique équivalent, dans le but d'alimenter son ACV pour comparaison avec celle du VE.

Les résultats expérimentaux obtenus serviront à caler un modèle simplifié capable de prévoir les consommations spécifiques des VE à tester, fondé sur les lois de la dynamique automobile. Celui-ci sera ensuite validé par des résultats d'expérimentations réalisées sur d'autres véhicules électriques.

Ce modèle permettra de multiplier les scénarios pour le véhicule évalué ; par exemple, il permettra de rendre compte de l'incidence des différentes chimies de batteries, ou encore d'usages différents (avec ou sans auxiliaires...).

2.1. Notion d'usage

2.1.1. Identification des facteurs clés de la phase d'utilisation

Si la contribution de la phase d'utilisation dans le bilan environnemental du VE est importante, la consommation électrique, seul paramètre à intervenir durant cette phase est un paramètre clé de celle-ci. Il faut donc s'intéresser aux facteurs qui influencent la consommation.

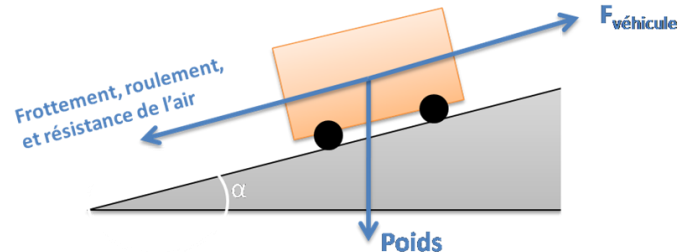
Pour les identifier, une solution est de revenir à la définition physique du déplacement du véhicule (son équation du mouvement) et d'en déduire les facteurs influant sur sa consommation d'énergie. Le déplacement du véhicule est régi par des variables fondamentales liées à l'ensemble de la chaîne de traction et aux familles d'efforts résistants qui s'opposent au déplacement (figure 13).

L'analyse de cette équation montre que différents types de paramètres influencent le niveau de consommation (figure 14) :

- **les paramètres propres au véhicule** (masse, type de batterie, coefficient aérodynamique, rendements, etc.) qui peuvent être fournis par les constructeurs ou mesurés,
- **les paramètres d'infrastructure** (pentes et état de la voie qui jouent entre autres sur le coefficient de frottement K),
- **les paramètres liés au trafic et au comportement de conduite** tels que les vitesses et les accélérations, ou encore l'utilisation d'auxiliaires,
- **les paramètres climatiques** : température, humidité

Schématiquement, pour faire circuler un véhicule de masse m à la vitesse V sur une route de pente α en lui communiquant une accélération γ , le moteur devra transmettre aux roues une force de propulsion F telle que :

$$\frac{\rho A C_d}{2} V^2 + KV + M\gamma + mg \sin \alpha + mg\mu \cos \alpha = F_{\text{véhicule}}$$



Avec, selon le véhicule :

- m (masses du véhicule),
- M (la masse équivalente, elle considère que l'accélération γ ne sert pas seulement à communiquer une énergie cinétique, mais également à assurer la rotation des parties tournantes (essieux, rotor du moteur de traction, roues...)
- μ (coefficient de résistance aux roulements du véhicule)
- K (coefficient de frottements), lié au roulement et frottement des pneus sur la route, il dépend du type de véhicule, de pneus et de l'état du revêtement,
- A (surface frontale du véhicule en m^2)
- C_d (résistance aérodynamique du véhicule)

Et selon le déplacement :

- V (vitesse),
- α (pente),
- ρ (densité de l'air)
- γ (accélération)

Figure 13 : Définition physique du déplacement du véhicule [WOLF, 1999]

Il conviendrait également de considérer l'inertie des masses en rotation (essieux, rotor du moteur de traction, roues, etc.). Concrètement, elle peut se réduire à une masse supplémentaire à ajouter à celle du véhicule. La masse à considérer est donc M , supérieure à m .

L'inertie des masses en rotation reste difficile à évaluer, et il s'agira ici d'obtenir un modèle simplifié de prévision des consommations (cf partie 2 – 2.3), en conséquence elle sera négligée.

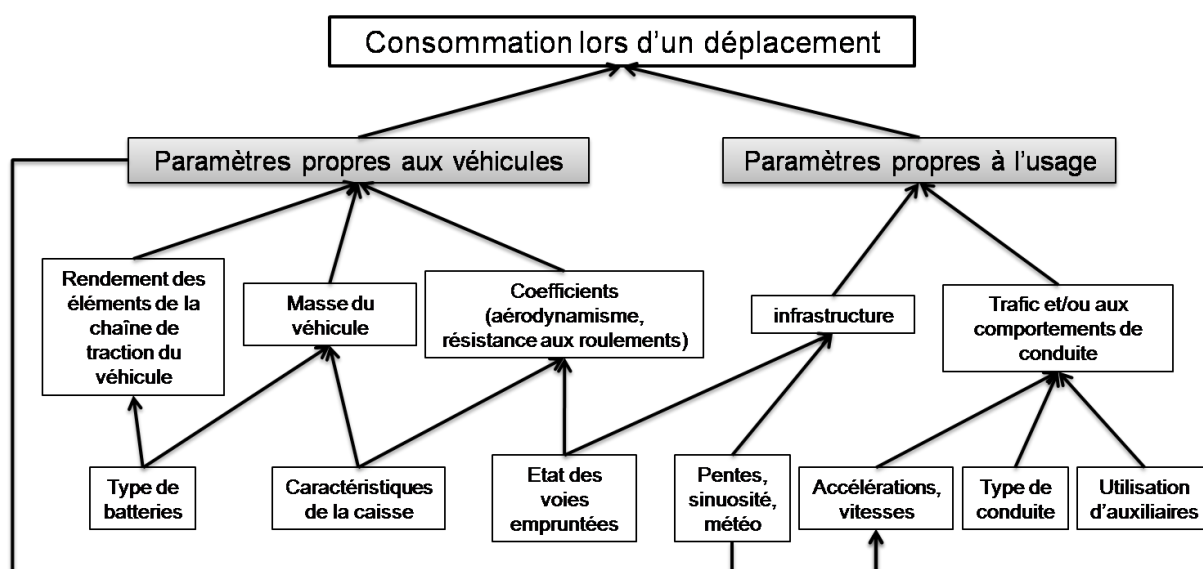


Figure 14 : Classification des paramètres influençant la consommation d'un véhicule

Les paramètres liés au trafic et aux comportements de conduite sont les plus difficiles à définir car ils dépendent de la manière dont le futur propriétaire utilisera son véhicule.

Par exemple, si on considère l'usage quotidien « rejoindre son lieu de travail », alors ces trois paramètres dépendront à la fois des performances du véhicule, du trafic, et du type de voiries empruntées pour réaliser ce trajet (feux, stop, route, périphérique...). Ainsi, **mieux appréhender les consommations d'électricité du VE nécessite d'explicitier à la fois les paramètres liés au véhicule (efficience, masse et coefficients spécifiques) et ses usages.**

2.1.2. Quels usages ?

A. Usages potentiels des VE

Les usages des VE sont conditionnés par leurs performances. Aujourd'hui, l'autonomie restreinte des VE fait qu'ils seront utilisables pour des déplacements réguliers dans un périmètre réduit, avec le moins d'imprévu possible, et un dispositif de recharge approprié. Par exemple, des trajets domicile-travail ou domicile-école peuvent être envisagés. Ces véhicules pourront être particulièrement intéressants pour des trajets urbains, du fait de la récupération d'énergie au freinage et des vitesses moins importantes sur ce type de voiries. Ainsi, du fait de l'autonomie limitée, il est admis que les VE sont plus adaptés aux usages urbains et extra-urbains. On retrouve cette même hypothèse dans les études déjà publiées ([HELMS, 2010], [SIMONS, 2010]).

Par ailleurs, comme pour les VCI, les constructeurs envisagent la commercialisation prochaine de plusieurs types de VE avec des performances différentes pour répondre à des usages différents. Par exemple, tous les VE aujourd'hui annoncés par les constructeurs n'ont pas la même capacité de batterie, pas la même masse, donc pas les mêmes autonomies et usages.

Ainsi, il sera nécessaire de tester différents scénarios d'usages.

B. Répartition des usages sur le réseau routier

Il reste à trouver des informations sur la répartition kilométrique des différents véhicules étudiés sur leur durée de vie. Le réseau routier est composé de différents types de voies (voies secondaires, voies rapides urbaines, périphériques, autoroutes, etc.) qui sont classiquement regroupées en trois classes principales : « urbain », « route » et « autoroute ». Il convient de signaler que, si le kilométrage annuel des véhicules est assez précisément connu, il n'en est pas de même pour sa répartition entre les 3 grands types de voies. En effet, les limites entre conduite urbaine, route ou autoroute sont difficiles à définir. Par exemple, les rocade sont des voies rapides dont les cinématiques de conduite se rapprochent plus de l'autoroute que de l'urbain, alors que celles-ci peuvent se trouver en ville. ANDRE, suite à un travail de synthèse sur les documents relatifs à la répartition de la circulation sur les trois types de réseau, estime pour les véhicules de particuliers les valeurs suivantes (tableau 5) [JOURMARD, 2004].

| | Urbain | Route | Autoroute |
|-------------|--------|-------|-----------|
| Répartition | 32% | 46% | 22% |

Tableau 5 : Répartition du kilométrage des voitures particulières en France [ANDRE, 1999]

Toutefois, ces valeurs sont des statistiques nationales qui considèrent l'ensemble des véhicules. Etablir des scénarios d'usage pertinents impose le recours et l'analyse de références spécifiques à la socio-économie du transport (enquête transport auprès des ménages, étude de la mobilité par motif de déplacement et par type de véhicules, etc.)

⇒ Le problème ne se pose pas pour le cas d'application proposé dans cette étude, c'est-à-dire d'un petit véhicule type véhicule sans permis à usage essentiellement urbain (l'usage autoroutier sera en conséquence nul). Les usages de ce VE seront en conséquence répartis de façon identique à ceux de son équivalent thermique, donnés par le constructeur qui les a déjà étudiés : **41% urbain et 59 % route. Ce scénario d'usage est retenu.**

Les autres scénarios possibles seront également évalués lors des analyses de sensibilité.

C. L'utilisation des auxiliaires

La tendance actuelle est de multiplier les auxiliaires dans la voiture (autoradio, GPS, lecteurs DVD pour les passagers, etc.). L'augmentation de l'ensemble de ces dispositifs de sécurité et de confort nécessite une puissance électrique plus importante à bord des véhicules : feux de croisement 110 W, projecteurs antibrouillard 110 W, lunette arrière chauffante 200 W, etc. En particulier, l'utilisation de l'air conditionné, dont quatre voitures vendues sur cinq sont aujourd'hui équipées [FERNANDO CONTADONI, 2003], est très énergétivore (1000 W).

En 2006, une étude a évalué la demande annuelle moyenne de puissance des auxiliaires à 1000 W pour les véhicules conventionnels, considérant à la fois la demande moyenne des équipements, et leurs usages moyens en hiver et en été [HELMS, 2010]. Cette estimation est à réadapter au cas des VE, pour qui, le maintien de températures « confortables » en hiver devra être assuré par l'air conditionné contrairement aux VCI (dont le faible rendement du moteur permet la récupération de chaleur).

⇒ L'utilisation des auxiliaires (ventilation, phares, air conditionné ...) entraîne des surconsommations et peut influencer sur l'autonomie du véhicule, **ce paramètre est donc à considérer dans nos scénarios d'usage**. Les consommations supplémentaires ramenées au kilomètre dépendent du temps nécessaire pour parcourir un kilomètre et donc des conditions de trafic dans lequel circule le VE.

D. Spécification des usages dans l'unité fonctionnelle

La première partie de ce chapitre a montré qu'il était nécessaire, pour pouvoir comparer les résultats des véhicules testés, de spécifier les usages dans l'UF.

Pour correspondre aux scénarios d'usages établis précédemment, l'usage global du véhicule sur sa durée de vie sera décliné en 3 usages : urbain, route et autoroute. Le véhicule parcourt ainsi tout au long de son cycle de vie X km urbains, Y km routes et Z km autoroutes (Durée de vie kilométrique du véhicule : $X+Y+Z$). Ces coefficients cadrent avec ceux des scénarios d'usages fixés que l'on choisit d'étudier (figure 15).

Faire varier X , Y et Z ne modifie que les paramètres liés à la consommation électrique et aux différentes émissions à l'échappement considérées dans l'inventaire.

L'UF étudiée sera alors le km parcouru pour un scénario d'usage particulier (X , Y et Z fixés).

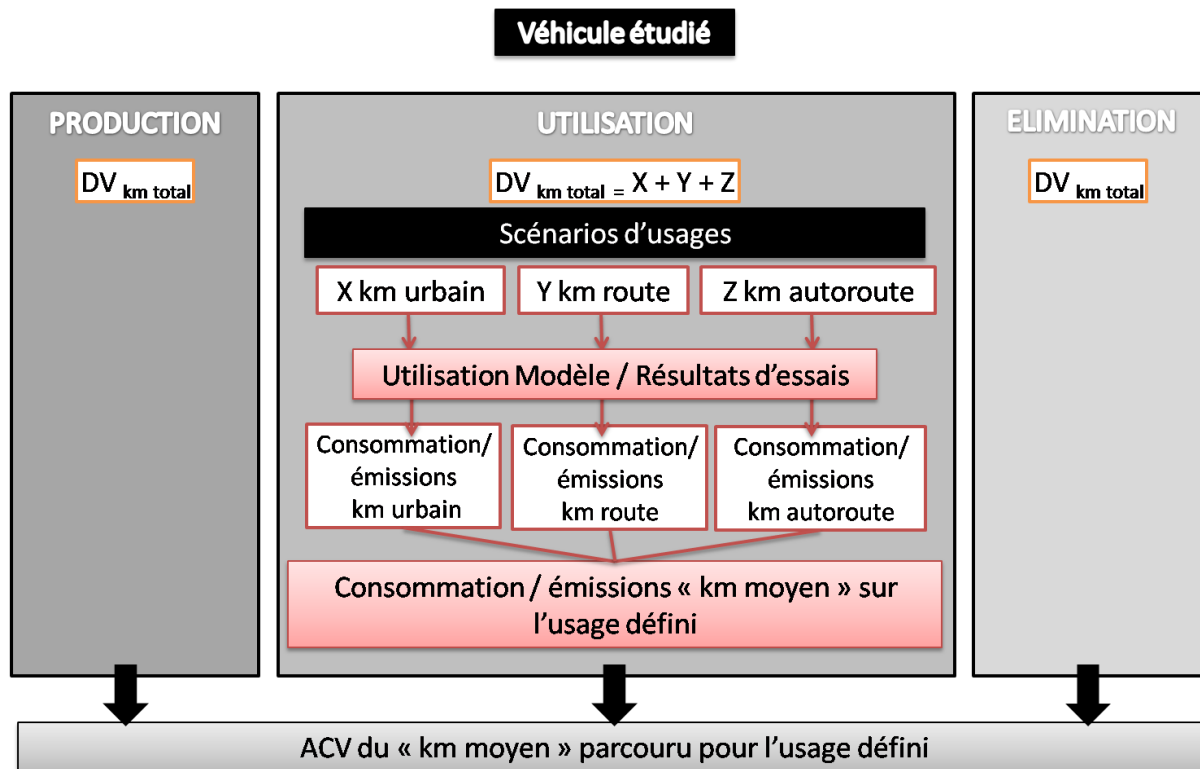


Figure 15 : Spécification de l'usage dans l'UF

Ainsi, il sera possible de comparer les performances des véhicules pour des coefficients X, Y et Z fixés. Par exemple, pour comparer les véhicules pour un usage strictement urbain, on annule Y et Z.

Outre la comparaison des résultats obtenus pour différents scénarios étudiés, cette spécification présente des avantages multiples :

- **Elle facilite les tests de sensibilité à l'usage.** Seront testés des usages particuliers déterminés à partir de données socio-économiques puisées dans la littérature scientifique. Il suffit de faire varier X, Y et Z. Ce travail peut permettre de dégager pour chaque usage les véhicules les plus adaptés.
- **Elle peut permettre une meilleure appréhension des émissions locales.** Toujours avec l'exemple des véhicules à usages strictement urbains, si on admet que le VE prend la place d'un VCI, on peut déterminer les émissions évitées en ville. Il est vrai que les limites géographiques entre « ville », « route » et « autoroute » sont floues, mais spécifier les usages implique aussi une spécification de l'espace.

La spécification de l'UF permet ainsi une analyse précise et plus réaliste de l'impact environnemental du véhicule étudié. Par contre, cela impose l'obtention de données représentatives de

consommations/émissions spécifiques à chaque usage retenu (mode de conduite, conducteur, trafic etc.).

2.1.3. Nécessité d'un modèle

Afin d'obtenir des données de consommations réalistes qui renseigneront les ICV de véhicules, l'objectif est ici de parvenir à un modèle simple qui à partir de caractéristiques spécifiques au véhicule estimerait les consommations de VE étudiés au niveau du réseau électrique.

L'approche proposée ici comprend 3 étapes :

- **La définition des cycles de conduites** les plus représentatifs des VE étudiés. Des mesures en circulation réelle tenteront de valider le choix de ces cycles.
- **Une phase expérimentale** : des essais sur banc à rouleau sont réalisés avec les cycles de conduite précédemment identifiés afin d'obtenir des données de consommation réalistes et de vérifier l'influence des paramètres identifiés dans la partie 1.1 (utilisation d'auxiliaires etc.) sur ce paramètre. Les résultats de ces essais expérimentaux serviront à la fois à renseigner l'ACV du véhicule étudié et à étalonner le modèle de prévisions des consommations électriques des VE.
- **La construction d'un modèle de prévision de consommations adapté**, qui devra réagir aux sollicitations de la même façon que les véhicules testés précédemment. Il sera validé au moyen de résultats de consommations obtenus pour d'autres véhicules que celui étudié.

Cette approche est développée dans la partie ci-après.

2.2. De l'usage aux consommations spécifiques

2.2.1. Présentation des véhicules étudiés et des cycles de conduite retenus

A. Les véhicules étudiés

L'étude est appliquée à deux véhicules dont les caractéristiques sont présentées dans les tableaux 6 et 7.

➤ Le véhicule électrique



Figure 16 : Photographies du VE lors des tests au laboratoire INRETS de Bron

| | |
|--------------------------|-------------------------------------|
| Type | Petit véhicule à usage urbain, 4 Kw |
| Poids à vide | 665 kg |
| Type de batterie | Lithium Fer Phosphate |
| Poids de batterie | 116 kg |

Tableau 6 : Caractéristiques du véhicule électrique étudié

Les réglages implantés par défaut par le constructeur dans le système ont été utilisés. Seule la vitesse maximale a été reconfigurée. Le VE a été livré avec une vitesse maximale de 60 km/h, la comparaison avec le VCI (véhicule sans permis) a impliqué de limiter le VE à 45 km/h. Deux jeux de tests ont donc été réalisés avec le VE, permettant ainsi la comparaison des consommations obtenues pour des véhicules ayant des vitesses maximales différentes :

- Le premier en « mode 60 », c'est-à-dire avec une vitesse maximale de 60 km/h,
- Le second en « mode 45 », après avoir paramétré la vitesse maximale à 45 km/h.

➤ Le véhicule thermique équivalent

Le tableau 7 présente les caractéristiques du VCI équivalent. La caisse est identique, seule la chaîne de traction est différente.

| | |
|-------------------------------------|----------------------------|
| Type | Véhicule sans permis, 4 kW |
| Poids à vide | 540 kg |
| Cylindrée | 525 cm ³ |
| Kilométrage | 1500 km |
| Année de mise en circulation | 2009 |

Tableau 7 : Caractéristiques du véhicule thermique équivalent étudié

B. Détermination des cycles retenus pour les essais

➤ *Quels cycles parmi les cycles existants ?*

Comme expliqué dans la première partie, la modélisation de la phase d'utilisation passe par le choix de cycles de conduite représentant la cinématique des déplacements de véhicules. Ces cycles sont définis par une courbe de vitesses en fonction du temps. Ils essaient de représenter les conditions de circulation de véhicule. S'il existe aujourd'hui différents cycles, aucun n'est spécifique au VE. Il faut donc déterminer parmi ceux existant, les plus représentatifs de l'usage attendu (donnée constructeur : 41% urbain et 59% routier).

Il s'agit ainsi d'évaluer la consommation énergétique et les émissions à l'échappement de polluants réglementés de différentes technologies de véhicules afin de les positionner les uns par rapport aux autres. Les cycles normalisés, sur lesquels on dispose déjà de beaucoup de données pourraient suffire à établir une comparaison et permettraient un recoupement avec les chiffres annoncés par les constructeurs automobiles. Les niveaux de consommation et d'émissions à l'échappement des polluants réglementés des véhicules seront donc évalués de manière systématique sur la partie urbaine du cycle normalisé : le cycle ECE. La partie extra-urbaine du cycle d'homologation n'est par retenue, car les performances du VE étudié ne sont pas suffisantes pour en suivre les cinématiques.

Cependant, seront également utilisés des cycles réels, plus détaillés et issus de campagnes de mesures récentes et exhaustives. Ces cycles balayent plus largement les différents couples accélérations-vitesses observés et sont donc plus représentatifs des conditions réelles de fonctionnement des véhicules.

Parmi les cycles réels existants, les cycles Artémis sont largement utilisés dans la littérature scientifique. Ils présentent l'avantage de proposer une segmentation de la mobilité selon le trafic (congestionné, fluide, dense) pour chacun des modes de conduite : urbain, route, et autoroute. Ce

découpage facilitera le travail de spécification des usages. Cet ensemble de cycles semble le plus abouti, donc le plus pertinent pour l'étude. Les niveaux de consommation et d'émissions à l'échappement des polluants réglementés des véhicules seront donc évalués sur les cycles ARTEMIS urbain et routier selon les usages annoncés par le constructeur.

Remarque : En choisissant les cycles, on émet l'hypothèse que pour des véhicules à usages essentiellement urbain étudiés, les profils de vitesses dépendent plus du trafic que du type de véhicules utilisés. Plus simplement, il s'agira de vérifier que pour le véhicule étudié, les contraintes liées au trafic urbain (et donc imposées à l'ensemble des véhicules y circulant), sont plus limitantes que les performances du véhicule. On essaiera de valider cette hypothèse lors des expérimentations, et au moyen de résultats de consommation obtenus en circulation réelle.

Bilan → On retient, pour évaluer les consommations énergétiques/émissions réglementées des véhicules testés sur banc à rouleau :

- pour l'usage urbain, le **cycle Artémis urbain et la partie urbaine du cycle d'homologation (ECE)**,
- pour l'usage routier, le **cycle Artémis routier**.

Toutefois, les vitesses maximales limitées des véhicules étudiés ont impliqué l'adaptation de ces cycles. Cette adaptation est expliquée dans la partie suivante et les limites induites seront explicitées par la suite.

Adaptation des cycles retenus aux véhicules étudiés

Le cycle ECE n'a pas été modifié car les performances du VE sont presque toujours suffisantes pour suivre le profil imposé. En effet, sur la totalité du cycle (780 secondes), seules 10% des vitesses sont supérieures à 45 km/h et aucune n'est supérieure à 60 km/h. Ce cycle est alors considéré comme représentatif pour cette étude.

Par contre, les cycles Artémis urbain et routier ont été adaptés aux performances du véhicule. Ils ont été limités à 60 km/h et 45 km/h, les vitesses maximales des véhicules. Leurs durées ont par conséquent été adaptées afin de parcourir la même distance que le cycle de référence, avec une vitesse maximale moindre. Les mêmes trajets sont donc assurés, mais avec des véhicules de performances différentes. La figure 17 illustre l'adaptation du cycle Artémis routier. L'adaptation du cycle Artémis urbain est présentée dans l'annexe 4.

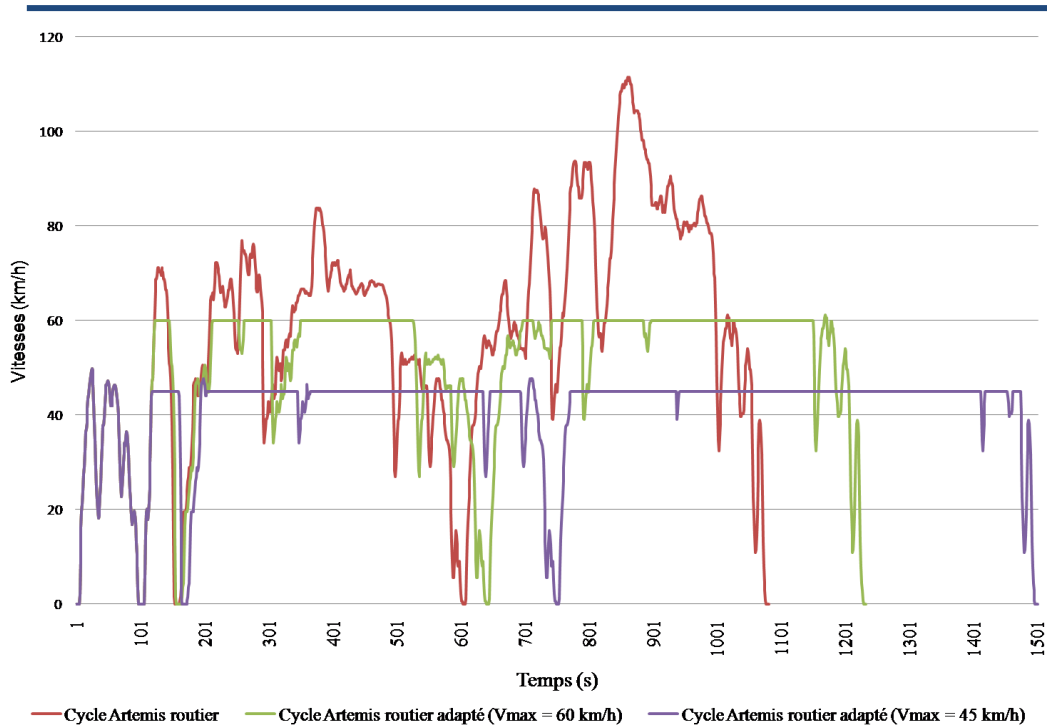


Figure 17 : Adaptation du cycle Artémis routier aux performances des véhicules étudiés

Il convient de discuter de l'incidence de ces adaptations. Le tableau 8 permet la comparaison des caractéristiques des cycles Artémis urbain et routier à celles des cycles adaptés :

- **Comparaison cycle Artémis urbain/ cycle Artémis urbain modifié ($V_{\max} = 45 \text{ km/h}$) :**
 Sur la totalité du cycle Artémis urbain (993s), seules 7% des vitesses sont supérieures à 45 km/h. De plus, si on compare les valeurs des caractéristiques respectives de ces deux cycles, seul le nombre d'arrêts par kilomètre est significativement différent (9%), outre la vitesse maximale.
- **Comparaison cycle Artémis routier/ cycle Artémis routier modifié ($V_{\max} = 45 \text{ km/h}$) :**
 L'adaptation conduit respectivement à l'augmentation de la durée du cycle et de l'accélération positive moyenne de 39 et 34% et à une diminution des autres caractéristiques (exceptée la vitesse maximale) de l'ordre de 30%.
- **Comparaison cycle Artémis routier/ cycle Artémis routier modifié ($V_{\max} = 60 \text{ km/h}$) :**
 L'adaptation conduit respectivement à l'augmentation de la durée du cycle, du nombre d'arrêts/km, et de l'accélération positive moyenne de 14, 34 et 15%. La vitesse moyenne et la vitesse moyenne hors arrêts sont diminuées de 12 à 13%, et le temps d'arrêt (en %) est diminué de 27%.

| Cycle testé | Artémis urbain | Artemis urbain modifié $V_{\max}=45$ km/h | Artemis routier | Artemis routier modifié $V_{\max}=60$ km/h | Artemis routier modifié $V_{\max}=45$ km/h |
|---|----------------|---|-----------------|--|--|
| Distance (km) | 4.9 | 4.9 | 17.3 | 17.3 | 17.3 |
| Durée (s) | 993 | 999 | 1083 | 1234 | 1502 |
| Vitesse moyenne (km/h) | 17.7 | 17.5 | 57.5 | 50.4 | 41.4 |
| Vitesses maximale (km/h) | 57.7 | 45.0 | 111.5 | 60.0 | 45.0 |
| Temps d'arrêt(%) | 28.4 | 28.2 | 3.0 | 2.2 | 2.2 |
| Nombre d'arrêt/km | 4.3 | 3.9 | 0.2 | 0.2 | 0.2 |
| Vitesse moyenne hors arrêts (km/h) | 24.7 | 24.4 | 59.3 | 51.8 | 42.3 |
| Accélération positive moyenne (m/s^2) | 0.7 | 0.7 | 0.5 | 0.6 | 0.7 |

Tableau 8: Comparaison des caractéristiques des cycles Artemis urbain et routier et de leurs versions modifiées

Cette analyse comparative montre que l'adaptation réduit considérablement la dynamique du cycle Artemis routier. Toutefois, les véhicules sans permis circulants sur les routes ont effectivement une dynamique moins importante que les véhicules classiques, du fait de leur vitesse limitée, tout en étant également contraints par les infrastructures routières (intersections, feu tricolore, rond-point...).

Compte tenu des limites de ces adaptations, les résultats obtenus seront considérés comme des indicateurs des niveaux de consommations/émissions.

Le cycle expérimental

Pour vérifier la représentativité du cycle Artémis urbain pour notre étude, un cycle expérimental a été réalisé à partir de données GPS, enregistrées sur quelques jours lors du déplacement du VE ($V_{\max}=60$ km/h) dans les rues de Lyon et sa périphérie.

Les conducteurs du véhicule ainsi testé confirment que celui-ci s'insère dans le trafic urbain sans le ralentir, ce qui constitue un premier argument de réponse à l'hypothèse réalisée selon laquelle en mode urbain, les profils de vitesses des véhicules dépendent plus des conditions de trafic que des performances des véhicules utilisés.

On ne cherche pas ici à construire un cycle de conduite adapté au VE à usage urbain, il s'agit uniquement de vérifier la représentativité du cycle Artémis urbain pour le véhicule étudié, et de la comparer à celle du cycle ECE.

Le tableau 9 permet la comparaison des caractéristiques des différents cycles (expérimental, Artémis urbain et ECE).

| Cycle testé | Expérimental | Artémis urbain | ECE |
|---|--------------|----------------|------|
| Distance (km) | 5.3 | 4.9 | 4.0 |
| Durée (s) | 999 | 993 | 782 |
| Vitesses moyennes (km/h) | 19.1 | 17.7 | 18.7 |
| Vitesses maximale (km/h) | 52.4 | 57.7 | 50.0 |
| Temps d'arrêt(%) | 26.1 | 28.4 | 30.6 |
| Nombre d'arrêt/km | 4.7 | 4.3 | 2.8 |
| Vitesse moyenne hors arrêts (km/h) | 25.8 | 24.7 | 27.5 |
| Accélération positive moyenne (m/s ²) | 0.7 | 0.7 | 0.2 |

Tableau 9 : Comparaison des caractéristiques principales du cycle expérimental et des cycles Artémis urbain et ECE

La représentation graphique du cycle expérimental est en annexe 5.

L'analyse des caractéristiques des différents cycles montre que pour les paramètres traduisant la dynamique des cycles (temps d'arrêts, nombre d'arrêt par kilomètre, vitesse moyenne hors arrêts, accélération positive moyenne, etc.), le cycle expérimental est beaucoup plus proche du cycle Artémis urbain que du cycle ECE.

⇒ **Cette analyse montre la meilleure représentativité du cycle Artemis urbain.** Le cycle expérimental sera également testé sur banc à rouleau

➤ Limites des cycles pour évaluer la consommation électrique et les émissions

Il convient de discuter des limites de ces cycles pour l'évaluation des consommations et émissions de véhicules sur banc à rouleau(x). De façon générale, ces limites sont d'abord liées à la nature des cycles et des tests sur banc à rouleau :

- Les cycles réels, construits à partir de données cinématiques, sont caractéristiques des **conditions d'utilisations moyennes** urbaines, routes, et autoroutes, gommant ainsi les **utilisations extrêmes**.
- De plus, les analyses de l'usage réalisées lors de la construction de ces cycles ne considèrent pas les **caractéristiques de la route** (état de la chaussée, pentes, virages, etc.) qui s'opposent pourtant fortement à l'avancement, et influent donc sur la consommation énergétique du véhicule. De même, le **comportement du conducteur** (type de conduite, utilisation d'auxiliaires etc.) impacte la consommation, et n'est pas traduite dans les cycles réels.
- Enfin, les cycles et mesures sur banc à rouleau **ne permettent pas de considérer les émissions hors échappement et émissions secondaires**.

Dans le cas de cette étude, il faut ajouter les limites liées:

- **Au fait qu'un cycle unique est choisi pour évaluer des véhicules différents (VE et VCI)**. Il n'existe pas de cycle représentatif de l'usage des VE, et par ailleurs, la méthodologie ACV ne permet la comparaison de systèmes que pour un usage identique. Les caractéristiques du cycle expérimental sont toutefois relativement proches de celles du cycle Artemis, ce qui tend à confirmer que pour des conduites urbaines, les cinétiques sont plus liées au trafic qu'aux performances du véhicule étudié.
 - **A l'adaptation des cycles impliquée par les vitesses maximales des véhicules évalués**, qui réduit considérablement la dynamique des cycles Artemis, en particulier celle du cycle routier. Il n'existe pas aujourd'hui de cycles représentatifs des véhicules limités aux vitesses maximales de 45 ou 60 km/h, aussi, il faut se contenter de ses adaptations.
- ⇒ Les cycles de conduite sont représentatifs d'usages moyens, et ils sont de plus, à travers cette étude, utilisés pour comparer des véhicules différents. En conséquence, les résultats obtenus lors d'évaluation de véhicules seront considérés **comme des indicateurs de niveau de consommation**.

C. Bilan récapitulatif

Le VE étudié peut être configuré avec une vitesse maximale égale à 45 km/h (mode 40) ou avec une vitesse maximale égale à 60 km/h (mode 60). Le VCI équivalent est un véhicule sans permis, limité à 45 km/h. Ainsi, la comparaison avec le véhicule thermique implique le test du VE en mode 45. Finalement, deux jeux de tests ont donc été réalisés avec le VE, le premier en mode 60 et le second en mode 45.

L'usage moyen des véhicules a été étudié et donné par le constructeur : 59% routier et 41% urbain.

Les cycles retenus pour le VE en mode 60 sont :

- le cycle ECE
- le cycle Artemis urbain et le cycle Artemis routier modifié ($V_{\max} = 60$ km/h)

Les cycles retenus pour le VE et le VCI limités à 45 km/h sont :

- Le cycle ECE
- Le cycle Artemis urbain modifié ($V_{\max} = 45$ km/h) et le cycle Artemis routier modifié ($V_{\max} = 45$ km/h)

Compte tenu des limites inhérentes à l'usage de ces cycles, les résultats obtenus lors d'évaluation de véhicules seront considérés **comme indicateurs de niveau de consommation**.

2.2.2. Expérimentation de véhicules

A. Définition préalable

Le terme « **consommation spécifique** » est utilisé dans ce mémoire de thèse pour qualifier la consommation mesurée au niveau de la batterie ramenée au kilomètre parcouru (Wh/km), différente de la consommation mesurée au niveau de la borne de recharge du véhicule (qui considère en plus les rendements du chargeur et de la charge de la batterie).

B. Rappels des objectifs

L'expérimentation a été réalisée pour cette étude dans les laboratoires de l'INRETS, à Bron (69) sur un VE et son équivalent thermique, prêtés par le constructeur et présentés dans les paragraphes précédents.

Les deux principaux objectifs de ces essais sont les suivants :

- mesurer sur banc d'essai les consommations / émissions spécifiques (i.e. la consommation mesurée en sortie de batterie) d'un VE et de son équivalent thermique selon leur usage,
- déduire les paramètres du véhicule (μ , A, et C_d , cf. définition § 2.1.1 de cette partie)

Les résultats présentés dans la suite seront exploités :

- pour préciser le modèle destiné à évaluer les consommations des VE.
- pour renseigner la phase usage de l'ACV du VE à usage urbain et son équivalent thermique, qui serviront de cas d'application dans la partie 3.

On profite également de ces essais pour caractériser l'autonomie du VE en conditions représentatives de circulation. Si aujourd'hui les constructeurs annoncent des autonomies, il est rarement précisé pour quels usages ; or il s'agit d'un paramètre primordial pour les utilisateurs.

C. Procédure d'essais

➤ Plan d'essais

Les essais sont réalisés sur un banc d'essai à un seul rouleau. Le tableau 10 présente brièvement l'organisation des essais, déterminée avec l'INRETS.

On profitera également des essais pour relever les puissances des auxiliaires présents dans le véhicule.

| | | |
|--------------------------------------|--------------------------------|--|
| Véhicule électrique limité à 60 km/h | Consommation Spécifique | Essais sur cycle ECE 15 |
| | | Essais sur cycle Artémis urbain |
| | | Essais sur cycle Artémis routier "mode 60" |
| | | Essais sur le cycle expérimental |
| | Autonomie | Essais sur cycle Artémis urbain |
| | Auxiliaires | Relevés des puissances |
| Véhicule électrique limité à 45 km/h | Consommation | Essais sur cycle ECE 15 |
| | | Essais sur cycle Artémis urbain "mode 45" |
| | | Essais sur cycle Artémis routier "mode 45" |
| Véhicule thermique | Consommation/Emissions | Essais sur cycle ECE 15 |
| | | Essais sur cycle Artémis urbain "mode 45" |
| | | Essais sur cycle Artémis routier "mode 45" |

Tableau 10 : Plan des essais

➤ Voies de mesures

Pour mesurer et comprendre la consommation du VE, des capteurs de courant et de tension sont implantés dans le véhicule. Il s'agit en particulier de mesurer les courants en sortie de batterie (I_{batterie}), car ils permettent la quantification du freinage récupératif.

La figure 18 présente l'implantation des différents points de mesures :

- tension de batterie de puissance : U_{batterie}
- courant de traction à l'entrée du variateur : I_{batterie}

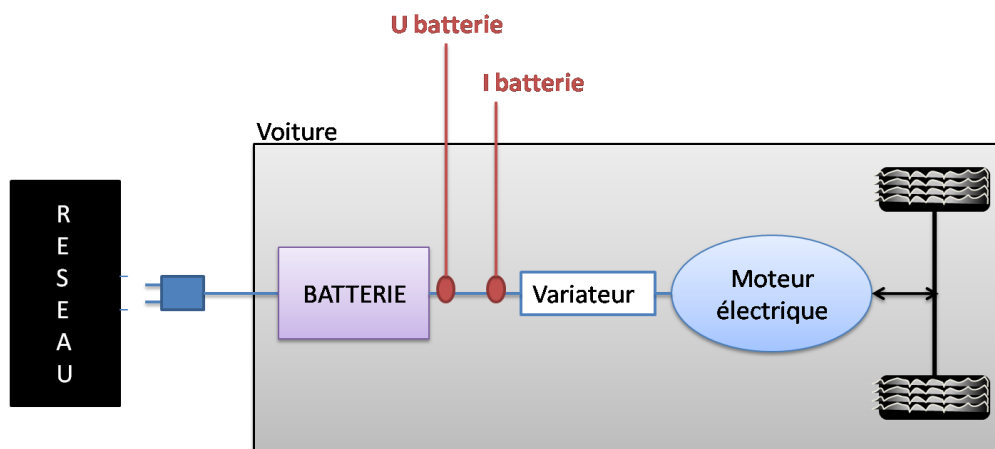


Figure 18 : Schéma d'implantation des capteurs

Les caractéristiques des capteurs sont données dans le tableau 11 :

| | | |
|-----------------------|---|-----------------|
| I_{batterie} | Capteur LEM 50-HTR, plage de mesure 0-500 A, sortie signal 0-4 Volt | Précision : 2% |
| U_{batterie} | Pont diviseur avec résistances | Précision : 1 % |

Tableau 11 : Caractéristiques des capteurs

➤ *Incertitudes*

L'importance de la chaîne de mesure à considérer (coefficients μ , A , et C_d déduits d'essais sur piste, paramétrage du banc, conducteur lors des essais, précisions des capteurs, etc.) complique l'évaluation des incertitudes des résultats obtenus sur banc à rouleau. Il faut ajouter que les conditions de mesures varient tout au long des essais (conducteur, niveau de charge de la batterie, température, pression des pneus etc.), il n'y a donc pas répétabilité.

Ces raisons expliquent pourquoi la plupart des études faisant référence à des essais sur banc à rouleau n'en précisent pas les incertitudes. Seul [BEER, 2004] donne une première idée de l'incertitude en étudiant les variations inter-essais, et considère que la distribution des résultats de consommations et émissions mesurés sur banc à rouleau répondent à une loi normale.

Incertitudes des résultats de consommations spécifiques de consommation d'électricité obtenues pour le VE

Les contraintes de coûts, délais, et disponibilités ont conduit à limiter le nombre d'essais par cycle testé. Aussi, les cycles ont été répétés 6 fois chacun. Un seul a été répété un plus grand nombre de fois : le cycle Artemis urbain, car il a été également utilisé pour déterminer l'autonomie du véhicule en conditions représentatives de circulation. L'incertitude des mesures de consommations spécifiques d'électricité sur banc à rouleau est considéré identique quelque soit le cycle testé, et est donc estimée à partir des variations inter-essais obtenues pour le cycle sur lequel le plus de mesures ont été effectuées : le cycle Artemis Urbain. L'annexe 6 en détaille l'évaluation.

Comme [BEER, 2004], il est considéré que la distribution des mesures obtenues lors des essais sur banc à rouleau répond à une loi normale. Compte tenu du nombre faible de mesures, il a été décidé d'intégrer l'ensemble des mesures expérimentales dans l'intervalle de confiance. Ainsi, l'intervalle de confiance est $[M-2\sigma, M+2\sigma]$ avec M la moyenne des mesures obtenues pour le cycle Artemis urbain et σ , leur écart type

L'incertitude des appareils de mesures, dont précision était de 2% pour l'intensité et 1% pour la tension est à ajouter. La précision de la mesure de consommation est de 3%.

⇒ **Enfin, l'incertitude sur les mesures de consommations spécifiques d'électricité sur banc à rouleau pour le VE est évaluée à 10%** (voir annexe 6).

Incertitudes des résultats de consommations spécifiques de consommation d'électricité obtenues pour le VE

L'analyse de cycle de vie du véhicule à combustion interne est réalisée dans le but de positionner le VE par rapport au véhicule électrique.

Seuls deux essais ont été réalisés par cycle de conduite testé pour le véhicule thermique. Les résultats obtenus présentent une faible dispersion.

En conséquence, pour chaque cycle testé seront considérées les moyennes des consommations et émissions obtenues lors des essais.

D. Résultats :

➤ *Résultats obtenus pour le VE*

Test des différents cycles

Les résultats présentés tableau 12 sont les moyennes pour tous les essais réalisés. L'intégralité des résultats sont reproduits dans l'annexe 7. De manière générale, lors des répétitions de cycle identiques, la dispersion des résultats obtenus est faible. Toutefois, on note une différence, selon l'opérateur au volant de la voiture, signe que le type de conduite est un paramètre influent.

L'ensemble des mesures réalisées entre dans l'intervalle [moyenne-10%, moyenne+10%] définies précédemment.

| | Type de cycle | Moyennes des Distances parcourue (km) | Conso. spécifique minimale Mesurée | Conso. Spécifique maximale mesurée | Moyenne des Conso. spécifiques mesurées Wh/km | [moyenne-10%, moyenne+10%] | Moyenne courant récupéré/ courant consommé (%) |
|----------------|--------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---|----------------------------|--|
| Mode 60 | ECE | 4,1 | 62.5 | 67.4 | 65,1 | [58,6 ; 71,6] | 14,2 |
| | Artémis urbain | 4,5 | 82.6 | 94.6 | 88,7 | [79,9 ; 97,6] | 17,8 |
| | Artémis routier (Vmax=60km/h) | 14,8 | 80.8 | 87.6 | 82,9 | [74,6 ; 91,2] | 4,0 |
| | Cycle expérimental | 5,4 | 76,9 | 83,9 | 80,6 | [72,5; 88,6] | 18,5 |
| Mode 45 | ECE | 4,1 | 60.2 | 62.4 | 61,0 | [54,9 ; 67,1] | 17,1 |
| | Artémis urbain (Vmax=45 km/h) | 4,6 | 81.7 | 86.3 | 83,7 | [75,3 ; 92,1] | 20,4 |
| | Artémis routier (Vmax=45 km/h) | 15,1 | 61.7 | 62.9 | 62,4 | [56,1 ; 68,6] | 2,2 |

Tableau 12 : Bilan des résultats obtenus par cycle testé

Quelques interprétations de ces résultats :

- Pour le cycle urbain, son adaptation pour une vitesse maximale de 45 km/h implique la diminution des phases transitoires (accélérations, décélération ou freinage), ce qui explique que le véhicule bridé à 45 km/h consomme moins (voir tableau 8 : comparaison des caractéristiques des cycles). Les véhicules parcourent une distance identique, aussi les vitesses et accélérations moindres diminuent la consommation spécifique d'électricité.
- Les résultats de consommation obtenus pour le cycle routier sont très différents selon les vitesses maximales définies. Sur ce cycle, les phases de déplacement à vitesse élevée sont plus importantes que pour le cycle urbain et les phases transitoires sont marginales. Les faibles taux de récupération s'expliquent par le peu de phase de décélération. Les consommations plus faibles mesurées sur le cycle routier modifié ($V_{\max} = 45$ km/h), comparées à celles du cycle routier modifié ($V_{\max} = 60$ km/h), sont liées à la dynamique moindre du cycle (vitesse maximale, vitesse moyenne hors arrêts, accélération positives moyennes, etc.).
- les consommations au kilomètre parcouru du cycle expérimental sont du même ordre que celles obtenues avec le cycle Artémis urbain (la différence est de l'ordre de 10%). La différence entre les consommations obtenues pour le cycle ECE et celles obtenues pour le cycle expérimental est de l'ordre de 23%. Ces éléments permettent de valider le choix du cycle Artémis urbain pour évaluer les usages urbains du VE évalué.
- Enfin, le cycle ECE correspondant à la partie urbaine du cycle homologué, donne des consommations nettement inférieures (-36%) à celles obtenues avec un cycle Artémis urbain.

La comparaison des caractéristiques des cycles testés (en particulier pour les paramètres traduisant la dynamique des cycles : temps d'arrêt, nombre d'arrêts par kilomètre, vitesse moyenne hors arrêts, accélération positive moyenne, etc.) avait déjà montré que les caractéristiques du cycle expérimental étaient plus proches de celles du cycle Artemis urbain que du cycle ECE. **Les résultats de consommations obtenus confirment la meilleure représentativité du cycle Artemis urbain.**

Tests autonomies

L'autonomie est une préoccupation essentielle pour l'utilisateur, elle est un des plus grands freins au déploiement des VE, il est donc important de l'évaluer. Le test d'autonomie est réalisé en répétant le cycle Artémis urbain jusqu'à l'arrêt du véhicule (tableau 13). Il n'y a pas eu de pause entre les cycles.

L'écart type relatif des mesures est de l'ordre de 3,5 %. La dispersion des résultats a plusieurs explications possibles :

- **L'ensemble des cycles n'a pas été réalisé par les mêmes conducteurs.** L'influence du type de conduite sur les consommations / émissions de VE devrait d'ailleurs être plus importante qu'avec un VCI, car il conditionne non seulement les consommations mais aussi les récupérations au freinage électrique.
- **Au vu des résultats, il apparaît que les premiers cycles réalisés avec le VE « à froid » donnent lieu à des consommations plus importantes (≥ 90 Wh/km).** Plusieurs facteurs peuvent être à l'origine de cette différence : température, pression des pneus, état de charge de la batterie, etc. Nous ne disposons pas d'éléments suffisants pour vérifier cette tendance et trouver la cause de ces différences.

Remarque : Etant donné que ces valeurs ont servies à déterminer l'incertitude des mesures de consommations spécifiques, ces variations ont été intégrées à l'intervalle de confiance.

| N° CYCLE | Distance parcourue (km) | Distance parcourue cumulée (km) | Vitesse moyenne (km/h) | Courant récupéré/ Courant consommé (%) | Consommation Wh/km | Consommation totale du cycle (Wh) |
|----------|-------------------------|---------------------------------|------------------------|--|--------------------|-----------------------------------|
| 1 | 4.4 | 4.4 | 17.3 | 17.3 | 91.1 | 404.9 |
| 2 | 4.5 | 8.9 | 17.5 | 15.8 | 93.6 | 420.2 |
| 3 | 4.5 | 13.4 | 17.5 | 16.4 | 89.3 | 399.3 |
| 4 | 4.5 | 17.9 | 17.6 | 15.1 | 94.2 | 423.4 |
| 5 | 4.5 | 22.4 | 17.5 | 16.7 | 87.6 | 392.8 |
| 6 | 4.5 | 26.8 | 17.4 | 17.8 | 87.2 | 388.7 |
| 7 | 4.5 | 31.3 | 17.4 | 17.6 | 86.4 | 385.7 |
| 8 | 4.5 | 35.8 | 17.5 | 16.1 | 92.3 | 414.1 |
| 9 | 4.5 | 40.3 | 17.5 | 17.7 | 84.8 | 380.6 |
| 10 | 4.5 | 44.7 | 17.4 | 17.2 | 86.1 | 383.3 |
| 11 | 4.5 | 49.2 | 17.6 | 15.8 | 86.3 | 389.8 |
| 12 | 4.4 | 53.5 | 17.2 | 17.3 | 85.9 | 379.0 |
| 13 | 4.5 | 58.2 | 17.6 | 17.8 | 84.9 | 383.9 |
| 14 | 4.1 | 62.2 | 17.4 | 16.6 | 83.8 | 343.4 |
| 15 | 4.4 | 66.7 | 17.4 | 16.7 | 89.5 | 398.5 |
| 16 | 4.5 | 71.2 | 17.6 | 17.4 | 85.0 | 384.2 |
| 17 | 4.1 | 75.3 | 17.4 | 16.0 | 87.6 | 359.8 |
| 18 | 4.5 | 79.8 | 17.5 | 16.2 | 86.3 | 387,1 |

Tableau 13 : Résultats des tests d'autonomie

⇒ **L'autonomie mesurée du véhicule est de 80 km avec une consommation spécifique moyenne de 88 Wh/km.**

Tests « influence des auxiliaires »

L'utilisation des auxiliaires (ventilation, phares, air conditionné ...) entraîne des surconsommations et peut influencer sur l'autonomie du véhicule.

Nous avons relevé les puissances suivantes au niveau des auxiliaires (tableau 14):

| Puissances mesurées (W) | | | | | | | |
|-------------------------|----------|----------|------------|--------|--------------|-------------------------------------|-----------|
| Ventilation | | | Veilleuses | Phares | Plein phares | Veilleuses et phares antibrouillard | Feux stop |
| niveau 1 | niveau 2 | niveau 3 | | | | | |
| 12,5 | 11 | 11 | 17 | 24 | 17 | 17 | 14 |

Tableau 14 : Mesures de la puissance des auxiliaires

Si l'on considère un cas concret, par exemple le cas de l'utilisation simultanée de la ventilation niveau 1 et des phares, on mesure ($P_{\max} = 36$ W).

Sur le test d'autonomie (répétition du cycle Artémis urbain), la distance moyenne parcourue est de 4,4 km et le temps moyen d'un cycle est de 15 minutes. La consommation supplémentaire par kilomètre liée à l'utilisation des auxiliaires serait alors de 2 Wh/km, et la consommation spécifique moyenne en ville serait de l'ordre de 90 Wh/km. L'autonomie ne serait alors plus de 80 km mais de 78 km, soit 2,5 % moindre.

Ainsi, et pour la puissance moyenne annuelle demandée par les auxiliaires (1000 W), en suivant le même raisonnement que précédemment, la surconsommation liée à l'utilisation des auxiliaires ramenée au kilomètre est de l'ordre de 56 Wh, et la consommation spécifique sur cycle Artémis urbain serait de l'ordre de 145 Wh/km. L'autonomie n'est alors plus de 80 km mais de 48 km, soit diminuée de 67 %.

Le graphique suivant (figure 19) représente l'influence de la puissance demandée par les auxiliaires utilisés sur la consommation spécifique du véhicule. En particulier les surconsommations liées à l'exemple ci-dessus sont représentées.

⇒ **L'influence des auxiliaires dans le cas des voitures électriques est donc un paramètre influent sur la consommation spécifique et donc sur l'autonomie.**

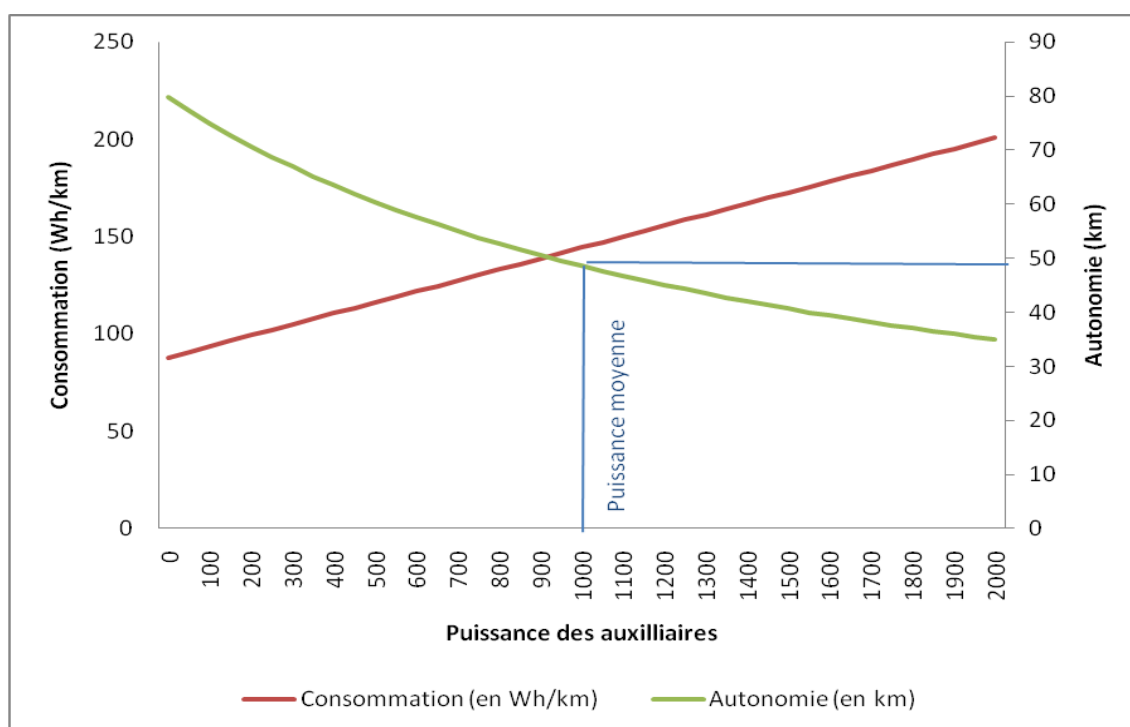


Figure 19 : Influence de la puissance des auxiliaires sur la consommation du véhicule étudié

Performances de la chaîne de traction et résultats à intégrer dans l'ACV

Les consommations présentées jusqu'ici étaient les consommations spécifiques (les expérimentations ont considéré l'énergie puisée dans la batterie). Or, les données de consommation qui seront entrées dans l'ACV seront représentatives des quantités d'électricité prélevées au niveau du réseau. Il faut donc en plus considérer le rendement du chargeur et celui de la batterie. La consommation finale du véhicule au réseau correspond donc à la consommation mesurée lors des essais multipliée par le rendement du chargeur (90%) et par celui de la batterie (95%). Ces rendements sont donnés par le constructeur.

Ainsi les consommations finales à entrer dans nos analyses de cycle de vie sont présentées dans le tableau 15 :

| | Type de cycle | Consommations Spécifiques moyenne mesurées (Wh/km) | Plages d'incertitudes Consommations spécifiques (Wh/km) | Consommations moyennes réseau (Wh/km) | Plages d'incertitudes Consommations réseaux (Wh/km) |
|----------------|--|--|---|---------------------------------------|---|
| mode 60 | ECE 15 | 65,1 | [58,6 ; 71,6] | 76,1 | [68,5; 83,7] |
| | Artémis urbain | 88,7 | [79,9 ; 97,6] | 103,7 | [93,4; 114,15] |
| | Artémis routier modifié (V_{max}=60km/h) | 82,9 | [74,6 ; 91,2] | 96,9 | [87,2;106.7] |
| | Cycle urbain enregistré | 80,6 | [72.5; 88,6] | 94,3 | [84,8; 103,6] |
| Mode 45 | ECE 15 | 61,0 | [54,9 ; 67,1] | 71,3 | [64,2;78,5] |
| | Artémis urbain modifié (V_{max}=45 km/h) | 83,7 | [75,3 ; 92,1] | 97,9 | [88.1;108,3] |
| | Artémis routier modifié (V_{max}=45 km/h) | 62,4 | [56,2 ; 68,6] | 73,0 | [65,7; 80,3] |

Tableau 15 : Consommations en tenant compte du rendement du chargeur et de celui des batteries

➤ *Résultats obtenus pour le VCI équivalent*

Les émissions mesurées seront utilisées comme données d'entrée pour réaliser l'ACV du VCI et permettre la comparaison avec le VE. Les gaz d'échappement sont prélevés à débit constant via un système de prélèvement et d'analyse de polluant.

Les résultats détaillés sont présentés en annexe 8. Le tableau 16 présente les principaux résultats obtenus.

Interprétation des résultats sur cycle ECE15

Des écarts important sont à constater entre les mesures départ froid et départ chaud :

- -33% pour les émissions d'oxyde de carbone,
- -30% pour les émissions d'hydrocarbures totaux,
- les émissions d'oxydes d'azote sont restées quasi-stables,
- - 6% pour les émissions de CO₂ et de ce fait également un gain de 7% sur la consommation de carburant,
- -7 % pour les émissions de particules.

Interprétation des résultats pour les cycles routier et urbain

Bien que le véhicule soit très souvent à ses performances maximales, on constate des différences entre le cycle routier et le cycle urbain.

Le cycle urbain modifié ($V_{\max} = 45$ km/h) présente en effet plus de phase transitoire, générant des consommations (+27%) et émissions de CO_2 (+27%), de particules(+25%) et d'hydrocarbures (+80%) plus élevées par rapport à celles obtenues avec le cycle routier. A l'inverse, les émissions d'oxydes d'azote sont diminuées de 31%.

| | ECE 15 Départ moteur froid | ECE 15 départ moteur chaud | Artémis urbain modifié ($V_{\max} = 45\text{km/h}$) | Artémis routier modifié ($V_{\max} = 45\text{km/h}$) |
|------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--|---|
| Distance (km) | 4.0 | 4.0 | 4.5 | 14.5 |
| CO (g/km) | 0.60 | 0.40 | 0.37 | 0.38 |
| HC (g/km) | 0.10 | 0.07 | 0.09 | 0.05 |
| NOx (g/km) | 0.59 | 0.61 | 0.22 | 0.32 |
| CO₂ (g/km) | 95.84 | 89.82 | 94.71 | 74.40 |
| Particules (g/km) | 0.015 | 0.014 | 0.020 | 0.016 |
| Conso (l/100km/ | 3.64 | 3.40 | 3.58 | 2.82 |

Tableau 16 : Emissions mesurées sur cycle ECE15 avec départ moteur chaud

Ces résultats alimenteront l'inventaire de la phase d'usage du véhicule thermique.

E. Bilan des essais

Ces essais ont permis d'obtenir des données de consommations spécifiques au véhicule étudié.

Les cycles testés donnent des consommations spécifiques différentes, ce qui montre qu'énoncer une consommation de véhicule sans spécifier son usage, a peu de sens. Par ailleurs, les résultats obtenus avec le cycle enregistré montrent que le cycle de référence le plus adapté à évaluer un usage urbain est le cycle Artémis urbain, et que le cycle ECE sous-évalue la consommation spécifique réelle.

Ces expérimentations ont également permis de démontrer l'influence de différents paramètres, accrue par rapport au VCI :

- le type de conduite de l'utilisateur, car la consommation spécifique n'est pas seulement liée à l'accélération du conducteur, mais aussi au freinage récupératif qu'il génère,
- l'utilisation des auxiliaires, qui diminuera l'autonomie du véhicule et aura donc une influence accrue par rapport au VCI. L'utilisation de l'air conditionné, en particulier aura une incidence importante.

Enfin, les essais avec le VCI permettent la collecte et la mesure des gaz d'échappement et donc la mesure des émissions massiques réelles sur les cycles testés, ce qui permettra de réaliser l'ACV du VCI équivalent dont les résultats seront comparés à ceux obtenus pour le VE.

Ces résultats renseigneront les ACV de véhicules, ainsi que le modèle permettant d'évaluer les consommations de VE. Ce modèle permettra de tester les différents scénarios d'usages envisagés.

2.3. Des essais au modèle

A. Objectifs

Le modèle doit permettre de prévoir les consommations et autonomies spécifiques à un usage particulier représenté par un cycle de conduite choisi, nécessaires à la réalisation d'ACV de VE.

Les résultats d'essais expérimentaux sur le véhicule MICROCAR seront utilisés comme référence pour étalonner le modèle. Il sera validé au moyen de jeux de données obtenus via des tests réalisés sur des VE différents.

B. Principe

Le modèle est développé sur Excel à partir de l'équation du déplacement du véhicule présenté figure 14. Il calcule ce bilan des forces auxquelles est soumis le VE à chaque instant, c'est-à-dire pour chaque point du déplacement considéré (cycles de conduite : MVEG, cycle Artemis, ...). L'objectif étant d'obtenir pour chacun de ces points (vitesses et accélérations spécifiques), une bonne estimation de la consommation énergétique.

Le modèle calcule les puissances de la roue à la source d'énergie (la batterie). Les paramètres du véhicule peuvent être approximés ou déduits par des essais. Ces derniers permettront de vérifier la pertinence du modèle avec des résultats expérimentaux.

En appliquant ce principe, le modèle calcule à chaque instant la force motrice et en déduit la puissance utile à fournir. Les données suivantes sont nécessaires :

- certaines caractéristiques du véhicule : masse M , coefficient C_d , surface S , etc. Elles peuvent être fournies par le constructeur, ou mesurées lors d'essais sur pistes.
- le cycle de conduite : vitesse V en fonction du temps, les calculs peuvent être faits sur tout type de cycle de conduite exprimé sous la forme d'un tableau (temps, vitesse).
- la pente de la piste α
- la consommation des auxiliaires
- quelques constantes : masse volumique de l'air μ , accélération de la gravité g

La puissance utile étant fournie à l'arbre de roues du véhicule, la puissance effectivement consommée dépendra également des pertes en amont que nous calculerons en fonction :

- du rendement de la batterie
- du rendement du moteur
- du rendement de la transmission

Les pertes liées à ces rendements sont précisées dans les diagrammes suivants (figures 20 et 21).

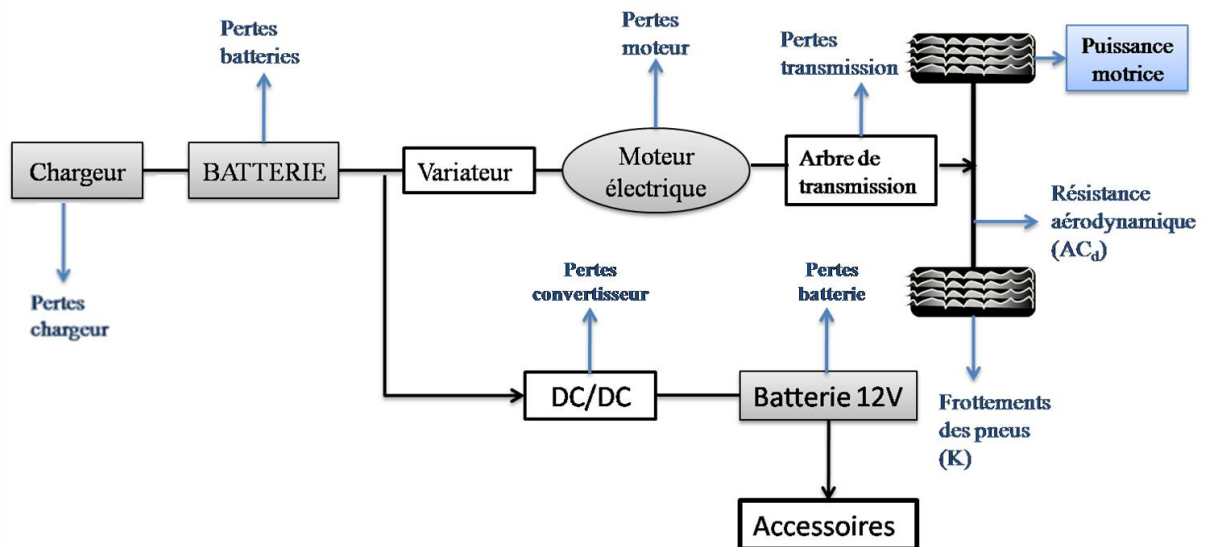


Figure 20 : Phase de traction, la batterie fournit la puissance motrice et les pertes

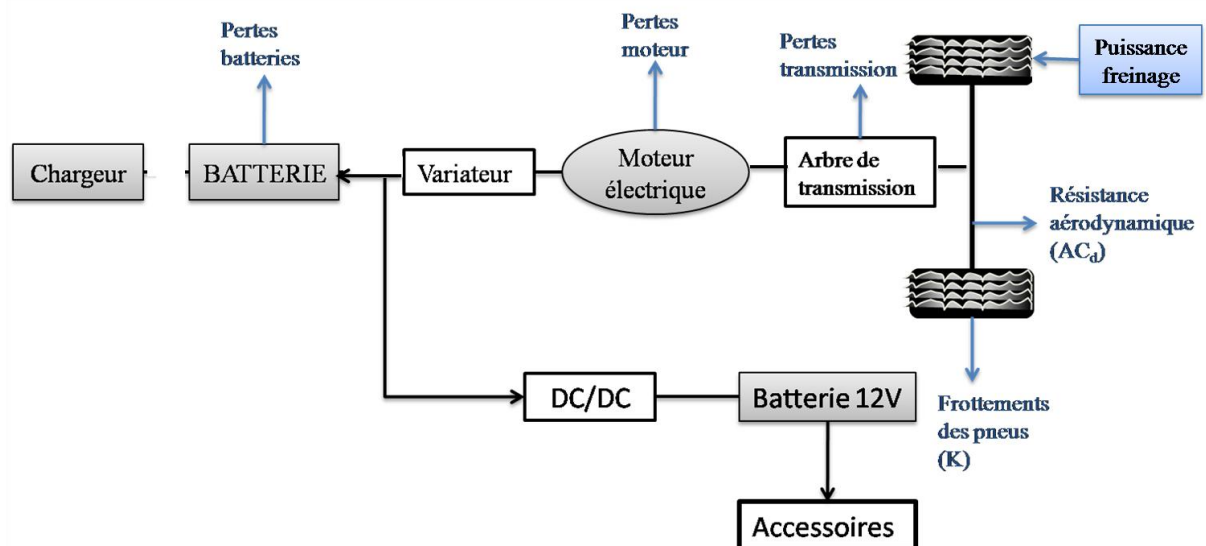


Figure 21 : Phase de freinage, la batterie emmagasine une partie de l'énergie restituée

La puissance fournie ou reçue par la batterie mène au calcul de son état de charge (SOC, de l'anglais State Of Charge), qui doit rester entre ses limites minimale (SOC min) et maximale (SOC max). Ce point sera développé dans la partie 2-§3, spécifique aux batteries.

La figure 22 présente la loi de commande du diagramme ainsi modélisé.

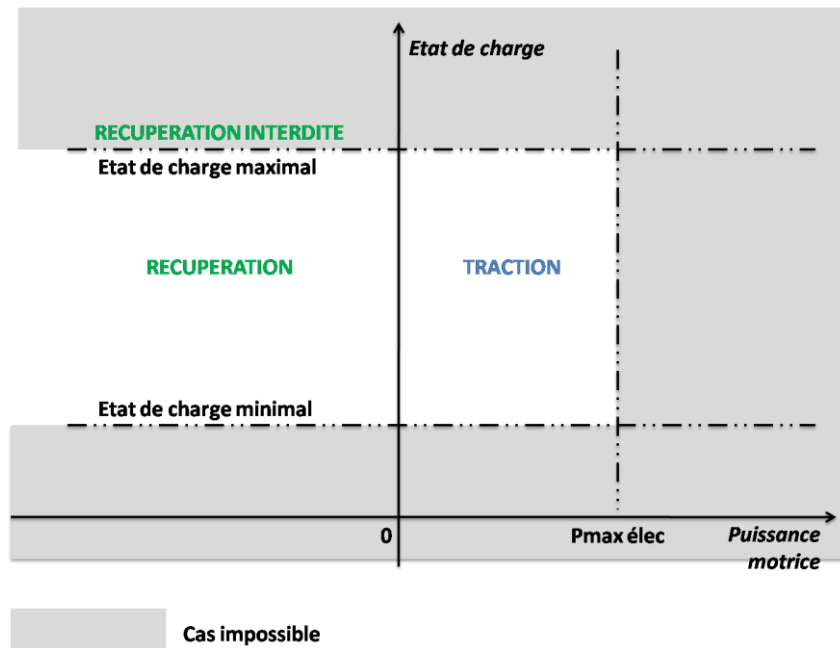


Figure 22 : Diagramme de la loi de commande

Les auxiliaires (ventilation, chauffage, ...) peuvent être considérés. Ainsi, de bonnes approximations des surconsommations et de la perte d'autonomie qu'ils engendrent sont obtenues.

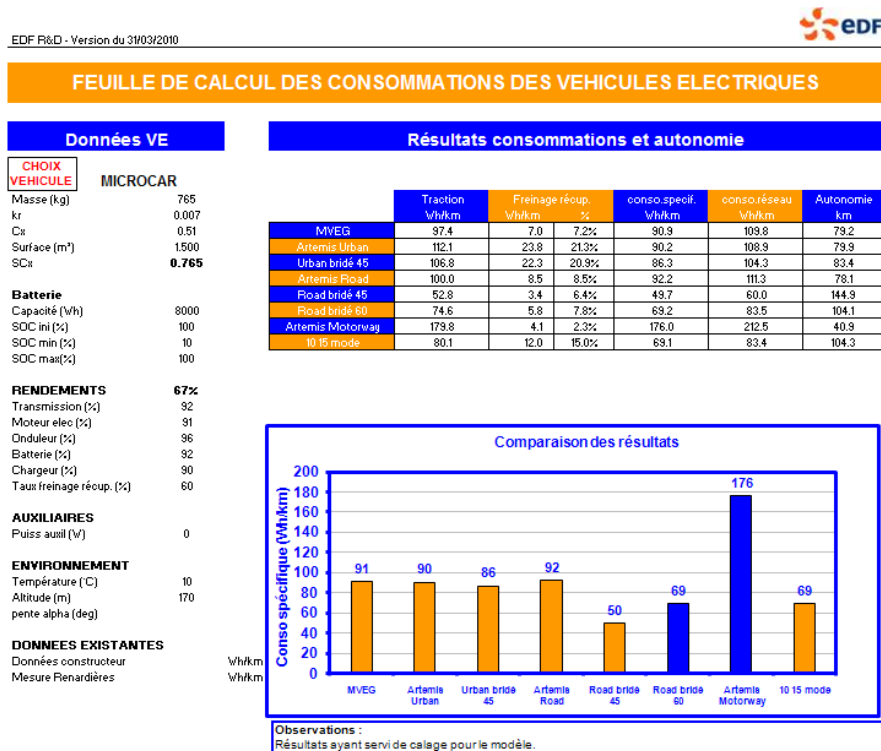


Figure 23 : Visualisation de la macro Excel utilisée pour prévoir les consommations de véhicules

A la fin du cycle de conduite, le modèle calcule la consommation spécifique du véhicule en Wh/km.

C. Validation

Le modèle a été calé validé avec des résultats expérimentaux réalisés sur différents véhicules électriques non utilisés lors du calage du modèle. Le modèle produit des résultats cohérents et peut donc être utilisé.

La figure 23 permet de visualiser la page principale du modèle. Les consommations totales obtenues peuvent alors être utilisées comme données d'entrées pour l'analyse du cycle de vie du VE étudié.

3. Détermination des paramètres spécifique à l'usage de la batterie

3.1. La durée de vie des batteries

3.1.1. Définition

Il s'agit d'évaluer l'influence sur les résultats du nombre de batteries, utilisées pendant la durée de vie du véhicule. Or, ce nombre dépend de la **durée de vie de la batterie** (DV_{bat}), paramètre qu'il faut donc approfondir.

DV_{bat} dépend de multiples éléments (figure 24). Là encore, particulièrement pour la technologie Lithium, le faible retour d'expérience induit des incertitudes sur la stabilité des performances de la batterie dans le temps (rendement, capacité, sécurité). En attendant plus de données, elles seront considérées stables sur DV_{bat} .

Deux types de durées de vie sont à considérer : la **durée de vie calendaire** et la **durée de vie cyclique** déjà définie dans le premier chapitre de ce manuscrit – Partie 1.2.2.B.

La durée de vie calendaire est une donnée fixe, alors que la durée de vie cyclique dépend de la fréquence de recharge du véhicule et donc de l'usage de son propriétaire. La durée de vie de la batterie ($DV_{batterie}$) est égale au minimum entre ces deux durées de vie :

$$DV_{batterie} = \min(DV_{calendaire}, DV_{Cyclique})$$

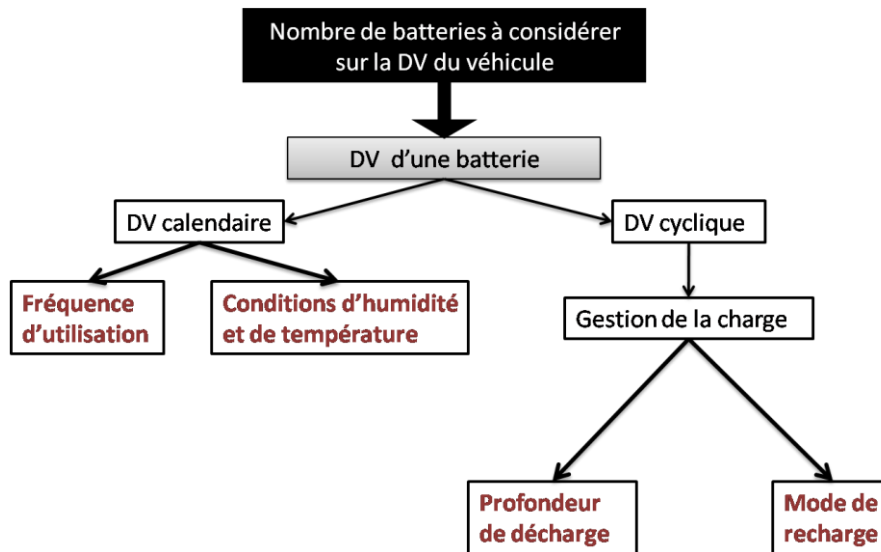


Figure 24 : Paramètres influant sur la durée de vie d'une batterie

3.1.2. Durée de vie cyclique et gestion de la charge

L'utilisateur, aidé par des signaux lumineux, décidera **quand** il devra faire « son plein », et donc du niveau de décharge de la batterie avant recharge.

La figure 25 montre l'influence de la profondeur de décharge sur la durée de vie cyclique d'une batterie Plomb-acide. Si on ne trouve pas dans la littérature les courbes similaires pour toutes les chimies de batteries, il semble y avoir consensus sur le fait que toutes sont affectées de manière négative par la profondeur de décharge [AXSEN, 2008]. Les batteries dont la durée de vie cyclique est faible seront donc plus affectées par ce facteur que les autres.

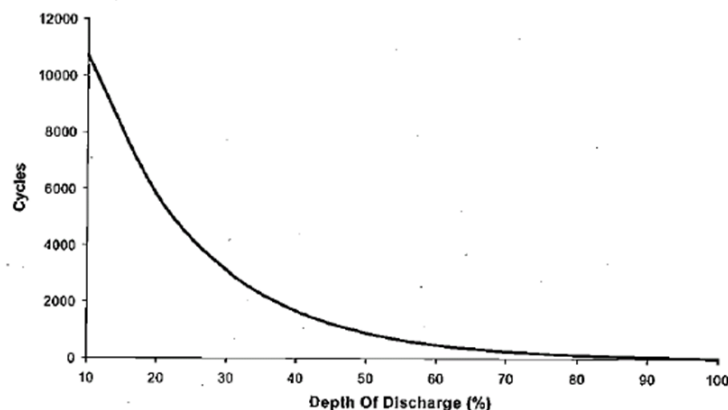


Figure 25 : Influence de la profondeur de décharge sur la DV cyclique d'une batterie Plomb-acide [RANTIK, 1999]

Ainsi la profondeur de décharge de la batterie au **moment** où l'utilisateur recharge son véhicule est un paramètre important. On considère :

- **La décharge profonde** (en anglais : Deep Of Discharge, DOD) : lorsque la décharge imposée à la batterie est supérieure à la limite minimale spécifiée par le constructeur de la batterie. Ce type de décharge entraîne une perte de capacité de la batterie.
- **Faible décharge** (en anglais : Low Level of Discharge) : décharger une batterie de son maximum d'état de charge (en anglais de 100% SOC , avec SOC = « State of charge ») à une profondeur de décharge inférieure à 80% est en règle générale bénéfique pour sa durée de vie[AXSEN, 2008].

3.1.3. Mode de recharge

Le mode de recharge est aujourd'hui au cœur du débat entre acteurs pour le développement du VE. En effet, le mode de recharge influe à la fois sur la sollicitation du parc de production d'électricité (courbe de charge), mais aussi, pour certaines technologies sur la durée de vie des batteries. Deux modes de recharges sont possibles :

- **La charge normale (16 à 32 ampères)**
- **La charge rapide (plus de 32 ampères)**

La charge rapide est défendue par les constructeurs automobiles. Ils considèrent d'une part qu'il induira des recharges plus fréquentes (favorable à la durée de vie cyclique de la batterie) mais moins importantes et permettra d'autre part également de limiter le temps que l'utilisateur aura à passer sur les stations de recharge.

Cependant, la recharge rapide induit des courants plus importants [AXSEN, 1999] ce qui pourrait **augmenter l'effet joule et donc la température**. S'il est vrai qu'utiliser une ventilation peut limiter les effets de la chaleur sur la batterie, il reste que la perte d'énergie à l'origine de cette chaleur induit une diminution du rendement de la batterie. Michail Rantik publie en 2008 un article [RANTIK, 1999] où il considère le rendement énergétique d'une batterie rechargée rapidement 10% plus bas que celui d'une batterie de voiture rechargée normalement. Il montre de plus que la charge rapide a tendance à diminuer la DV des batteries, quelque soit la chimie de batterie utilisée.

Toutefois, le peu de retour d'expérience concernant l'influence du mode de charge sur la durée de vie et le rendement des batteries actuellement dans les prototypes de véhicule, ne permet pas la prise en compte de ce facteur.

3.2. Etablissement de scénarios batteries

3.2.1. Principe

Il s'agit d'établir les scénarios d'usage qui seront testés dans les analyses de cycles de vie de la troisième partie de ce mémoire. Ils vont concerner un paramètre essentiel : la durée de vie des batteries (DV_{bat})

La durée de vie de la batterie à considérer dans nos études, celle qui conditionne la masse de batterie à produire et à éliminer, est telle que : $DV_{batterie} = \min(DV_{calendaire}, DV_{cyclique})$

où la durée de vie cyclique est fonction de la profondeur de décharge moyenne appliquée à la batterie.

La décharge de la batterie est liée à l'usage du véhicule par son propriétaire, et l'énergie ainsi déchargée lui a permis une certaine autonomie fonction de son usage (traduite en Wh/km). Ainsi, on peut considérer que la profondeur de décharge moyenne traduit une autonomie moyenne pour un usage particulier entre chaque recharge.

⇒ **Estimer la durée de vie d'une batterie passe donc par l'établissement d'hypothèses sur les usages.**

Les différentes technologies de batteries présentent des caractéristiques bien différentes, en particulier, l'influence de la profondeur de décharge est variable. Il convient donc de mener une réflexion pour chacune d'entre elles.

3.2.2. Batteries Plomb-acide

La batterie Plomb-acide a une durée de vie calendaire estimée à 8 ans et une durée de vie cyclique plus pénalisante (Avis d'expert : M. Brincourt, EDF R&D). Celle-ci dépend de la profondeur de décharge moyenne que l'utilisateur va lui appliquer.

Pour l'exemple du VE à usage urbain étudié précédemment, équipé cette fois-ci de batteries Plomb-acide. Les hypothèses sont les suivantes :

- **la capacité de batterie est égale 8000 Wh**, soit 200 kg de batterie Plomb-acide (énergie spécifique de l'ordre de 40 Wh/kg).
- **Le scénario d'usage** : comme défini dans la partie 2.2, on considère un usage de 41% en centre ville et de 59% sur route. La durée de vie du véhicule est fixée à 120 000 km

(estimation du constructeur et hypothèse retenue dans une étude récente relative à un petit VE [HELMS, 2010]). La durée de vie du véhicule est estimée à 10 ans.

- **Les consommations** à considérer sont les consommations spécifiques, il s'agit ici de mesurer l'effet de la profondeur de décharge sur la DV batterie, aussi le rendement du chargeur ne doit pas être pris en compte. On considère par convention 100 kg supplémentaires pour le véhicule liés au poids du conducteur (et autres charges éventuelles : bagages, courses...), soit une masse totale de 897 kg pour le VE avec batteries Plomb-acide. Le modèle de prévision de consommation donne les résultats présentés dans le tableau 17.

| | Cycle ARTÉMIS urbain bridé à 45 km/h | Cycle ARTÉMIS route bridé à 45 km/h |
|--|---|--|
| Consommation spécifique (Wh/km) | 104 | 55 |

Tableau 17 : Résultats du modèle pour la consommation spécifique du VE, batteries Plomb-acide

Donc pour notre scénario d'usage, la consommation spécifique sera de 75 Wh/km (voir annexe 9).

La figure 26 présente la DV_{cy} des batteries Plomb-acide en fonction de la profondeur de décharge qui y est appliquée. Plus celle-ci est importante, moins la DV_{cy} de la batterie est importante.

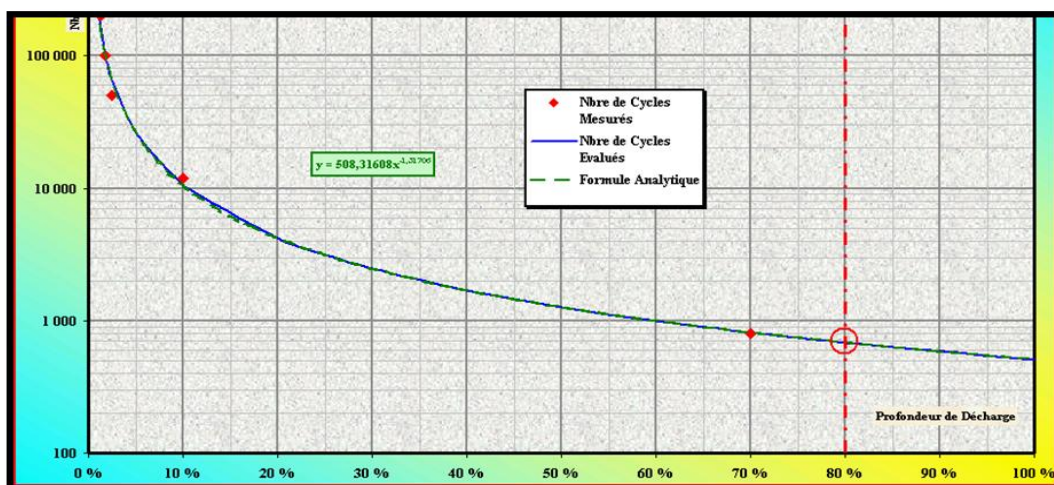


Figure 26 : Nombre de cycles des batteries Plomb-acide en fonction de la profondeur de décharge (source interne EDF R&D - LME)

Il s'agit de traduire les durées de vie cycliques annoncées dans le graphique ci-dessus en années pour émettre des hypothèses de DV de batteries réalistes.

Le ratio capacité utilisée / consommation spécifique permet d'estimer le nombre de kilomètres parcourus pour l'usage moyen évalué (scénario 1) entre chaque recharge. En multipliant cette autonomie par la durée de vie cyclique déduite de la figure 26, on obtient le nombre de kilomètres que peut parcourir le véhicule avec la même batterie. On en déduit alors, grâce à l'hypothèse de durée de vie kilométrique du VE (120 000 km), la traduction de la durée de vie cyclique en années. Le tableau 18 regroupe les résultats de ces calculs :

| profondeur de décharge moyenne (en %) | Capacité utilisée (Wh) | Distance parcourue entre chaque recharge (km) | DV_{Cy} (nbre de cycles) | DV_{Cy} rapportée en années avec comme hypothèse DV VE = 120 000 km en 10 ans |
|--|-------------------------------|--|---|--|
| 30 | 2400 | 32 | 1150 | 3.1 |
| 40 | 3200 | 43 | 1090 | 3.7 |
| 50 | 4000 | 53 | 1040 | 4.5 |
| 60 | 4800 | 64 | 1000 | 5.3 |
| 70 | 5600 | 75 | 700 | 4.3 |
| 80 | 6400 | 85 | 600 | 4.3 |

Tableau 18 : DV cyclique des batteries Plomb-acide en fonction de la profondeur de décharge

Cela confirme la prépondérance de la durée de vie cyclique pour la technologie Plomb-acide, la traduction de la DV cyclique en années étant toujours inférieure à 8 ans. Ainsi le nombre de batteries à considérer pour l'ACV du VE batterie Plomb est compris entre 2 et 3. La prédominance de la durée de vie cyclique fait que cette technologie est particulièrement sensible aux usages (comportement de conduite et trafic) et à leur fréquence. Aussi, pour vérifier l'influence de la durée de vie des batteries Plomb-acide sur le cycle de vie du véhicule, celle-ci est considérée entre 2 et 5 ans. Deux remarques semblent importantes:

- Pour optimiser la DV de la batterie Plomb-acide, la profondeur de décharge maximale moyenne idéale est de 60% (véhicule rechargé tous les 64 km, d'après les hypothèses). Pour préserver la batterie, les constructeurs feront sans doute en sorte qu'un signal (voyant lumineux) indique à l'utilisateur qu'il est temps de recharger son véhicule.

- Il apparaît d'autre part clairement que la batterie Plomb-acide est plus intéressante pour des utilisateurs dont le nombre de kilomètres parcourus à l'année est faible. En effet, moins le véhicule sera utilisé, plus longue sera la durée de vie cyclique de la batterie, or elle est plus limitante que la durée de vie calendaire pour cette chimie de batterie.

3.2.3. Batterie Nickel-Métal Hydrure

Le même raisonnement que pour les batteries Plomb-acide est suivi ici. La durée de vie calendaire des batteries Ni-MH est estimée à 8 ans (Avis d'expert : M. Brincourt, EDF R&D)

En considérant le même véhicule et les mêmes usages, on souhaite la même capacité de batterie soit 114 kg de batterie Ni-MH (énergie spécifique de l'ordre de 70 Wh /kg) et une masse de 811 kg pour le VE avec batteries Nickel Métal Hydrure.

Le modèle de consommation donne les résultats présentés dans le tableau 19 :

| | Cycle ARTÉMIS urbain bridé à 45 km/h | Cycle ARTÉMIS route bridé à 45 km/h |
|--|---|--|
| Consommation spécifique (Wh/km) | 95 | 52 |

Tableau 19 : Résultat du modèle pour la consommation spécifique du VE, batterie Ni-MH

Donc pour le scénario considéré, la consommation à considérer sera 69 Wh/km.

La figure 27 présente la DV_{cy} des batteries Ni-MH en fonction de la profondeur de décharge qui y est appliquée.

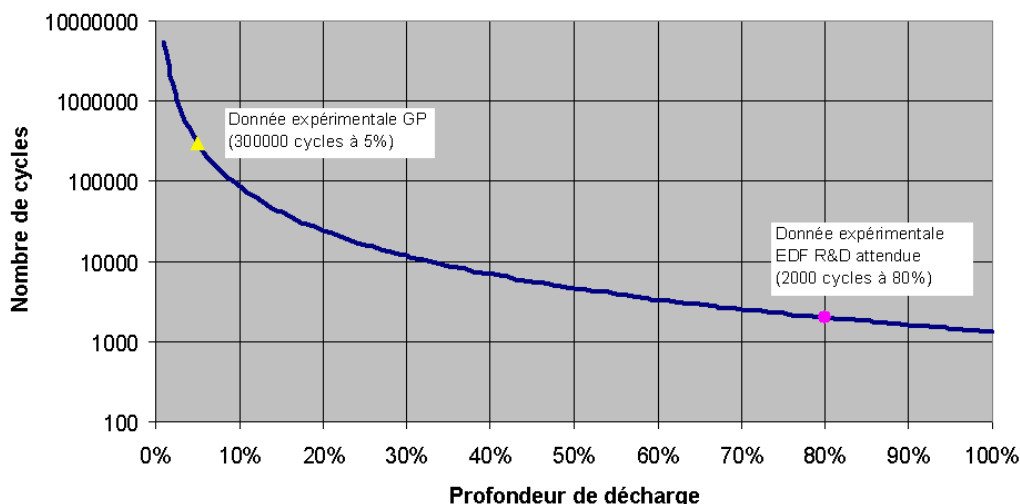


Figure 27 : Nombre de cycles des batteries Ni-MH en fonction de la profondeur de décharge (source interne EDF R&D - LME)

Suivant le même raisonnement que pour la batterie Plomb-acide, on en déduit le tableau 20 :

| Profondeur de décharge maximale moyenne | Capacité utilisée (Wh) | Distance parcourue entre chaque recharge (km) | DV _{Cy} (nbre de cycles) | Durée de vie cyclique rapportée en années avec l'hypothèse DV VE = 120 000 km en 10 ans |
|---|------------------------|---|-----------------------------------|---|
| 30 | 2400 | 35 | 11000 | 32 |
| 40 | 3200 | 46 | 9000 | 34 |
| 50 | 4000 | 58 | 6500 | 31 |
| 60 | 4800 | 70 | 5500 | 32 |
| 70 | 5600 | 81 | 4500 | 30 |
| 80 | 6400 | 93 | 3000 | 23.2 |

Tableau 20 : DV cyclique des batteries Ni-MH en fonction de la profondeur de décharge

Ce tableau montre que c'est la durée de vie calendaire qui définit la durée de vie de la batterie Ni-MH, la traduction de la durée de vie cyclique en année étant toujours très supérieure à 8 ans

⇒ En conséquence, on considère la durée de vie de la batterie Ni-MH égale à 8 ans.

3.2.4. Les batteries Lithium

Cette technologie de batterie étant la plus récente, il n'existe pas encore d'étude publique analysant l'influence de la profondeur de décharge sur la durée de vie cyclique de la batterie. Toutefois, celle-ci est largement supérieure à celle des batteries Ni-MH. Il paraît donc logique de considérer la durée de vie des batteries Lithium égale à celle de leur durée de vie calendaire.

Le manque de retour d'expérience sur cette technologie explique l'absence de consensus entre spécialistes quant à sa durée de vie. On trouve peu de chiffres dans la littérature scientifique, et surtout il est notable que ceux avancés varient entre 5 et 10 ans (Dr Torcheux, EDF R&D, [HELMS, 2010]). Il semble de plus que les durées de vie de ces batteries vont sans doute rapidement évoluer dans les années à venir, c'est pourquoi nous considérerons deux valeurs différentes : **5 ans et 10 ans**.

3.2.5. Scénarios retenus

Il est fait ici la synthèse des durées de vie et rendements de recharges fixés précédemment (tableau 21). Il semble y avoir un bon consensus sur les rendements des différentes technologies aussi il ne semble pas nécessaire d'effectuer d'analyse de sensibilité. En ce qui concerne les durées de vie, les valeurs minimales et maximales seront considérées et l'influence de ce paramètre sera ainsi vérifiée.

| Technologies de batterie | Energie spécifique (Wh/kg) | Durée de vie minimale considérée (années) | Durée de vie maximale considérée (années) | Rendement charge normale (%) | Etat de charge minimum (%) | Etat de charge maximum (%) |
|---------------------------------|-----------------------------------|--|--|-------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Plomb-acide | 40 | 2 | 5 | 75 | 40 | 100 |
| Nickel Métal Hydrure | 70 | 8 | 8 | 75 | 10 | 100 |
| Lithium fer phosphate | 125 | 5 | 10 | 95 | 10 | 100 |

Tableau 21 : Synthèse des scénarios retenus pour les batteries

4. Synthèse

Dans les sous parties précédentes, la définition d'hypothèses d'usage pour le VE étudié (scénarios S1 : 41% urbain et 59% route) a permis de spécifier l'unité fonctionnelle (km parcouru selon l'usage S1),

et de choisir parmi les cycles de conduite existants, les plus représentatifs de cet usage. Lors des analyses de sensibilité, différents scénarios d'usages seront testés.

Les consommations du VE peuvent être estimées via le modèle, calé grâce aux résultats expérimentaux et dont on a vérifié la pertinence grâce aux résultats d'essais réalisés sur d'autres véhicules électriques.

Les aspects liés aux batteries ont été étudiés, et des hypothèses quant à leur performances (profondeur de décharge maximum, rendement, durées de vies) ont été fixées. Il faut noter que la chimie de batterie choisie influe à la fois sur le nombre de batterie à considérer sur le cycle de vie du VE et sa consommation du fait de sa masse et de son rendement.

Ces données seront utilisées dans la troisième partie de cette étude tel que présenté dans la figure 28.

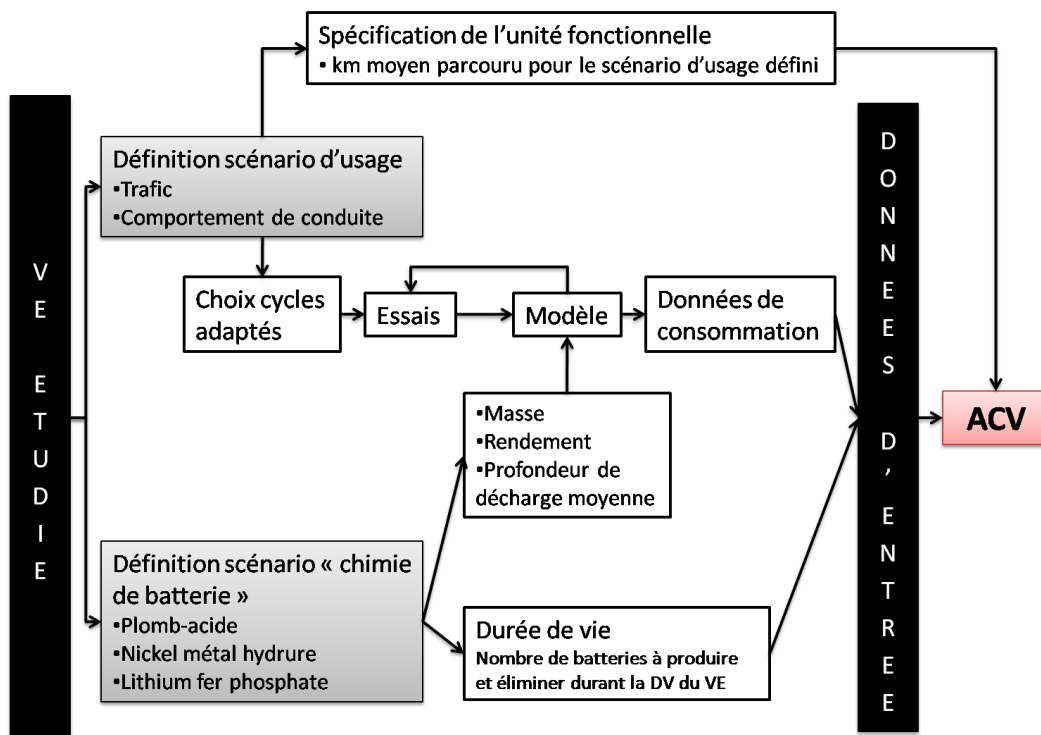


Figure 28 : Schéma du mode d'acquisition des données entrées dans l'ACV

**Partie 3 : Mise en perspective des résultats de la seconde partie - ACV
d'un véhicule électrique**

Objectif de l'étude

La deuxième partie de mémoire de thèse de doctorat a permis, à travers des études bibliographiques, des rencontres d'experts, et surtout des expérimentations/modélisations, l'obtention de données de consommation spécifique à l'usage particulier d'un petit véhicule électrique et de son équivalent thermique, et la définition d'hypothèses relatives à la durée de vie des batteries.

La troisième et dernière partie de ce mémoire est une mise en perspective de ces données et résultats, à travers l'application de la méthodologie ACV à un petit véhicule électrique.

Cette évaluation permettra d'analyser l'influence des paramètres qui ont été identifiés dans la deuxième partie, selon les trois étapes suivantes :

- L'application de la méthodologie ACV au véhicule étudié : le cycle de vie du véhicule et les hypothèses considérées seront explicités de manière synthétique, les résultats obtenus seront présentés et interprétés au niveau des flux, et également au niveau des indicateurs d'impacts potentiels.
- La comparaison des résultats précédents avec ceux obtenus pour un véhicule thermique équivalent,
- La réalisation d'analyses de sensibilité visant à identifier les paramètres clés de l'étude, et ainsi à démontrer l'intérêt de l'ACV pour l'évaluation de technologies en développement.

1. Application de la méthodologie ACV à un petit véhicule électrique

1.1. Définition du champ de l'étude

Le champ d'une étude ACV spécifie de manière claire les fonctions du produit, et définit l'unité fonctionnelle (UF), les limites du système, les règles d'allocations, et les méthodologies d'évaluation d'impact utilisées.

1.1.1. Fonction et unité fonctionnelle

La deuxième partie de ce mémoire conclut à la nécessité de spécifier l'usage du véhicule dans l'unité fonctionnelle.

Ici, il s'agit d'évaluer un petit véhicule pour un usage particulier, car limité à une vitesse maximale de 45 km/h (puissance moteur 4 kW, capacité de batterie 8 kWh, batterie Plomb-acide). Le choix de la chimie plomb acide a été particulièrement développé dans cette partie car elle est celle dont les données sont les plus disponibles (production, usage, recyclage). L'annexe 11 propose les premiers résultats obtenus pour la batterie lithium-fer-phosphate.

Un **scénario d'usage** (nommé **S1**) a été défini pour le véhicule étudié dans la partie 2, avec une répartition kilométrique (en %) de la distance parcourue tout au long de la vie du véhicule tel que :

- X, la proportion de kilomètres urbains est égale à 41 %
- Y, la proportion de kilomètre route est égale à 59 %
- Z, la proportion de km autoroute est égale à 0 % (car vitesse minimale de 45 km/h)

Ainsi, pour la présente étude, l'unité fonctionnelle est :

« **Le km moyen parcouru pour le scénario d'usage S1** »

A. Frontières du système

- *Choix des frontières du système*

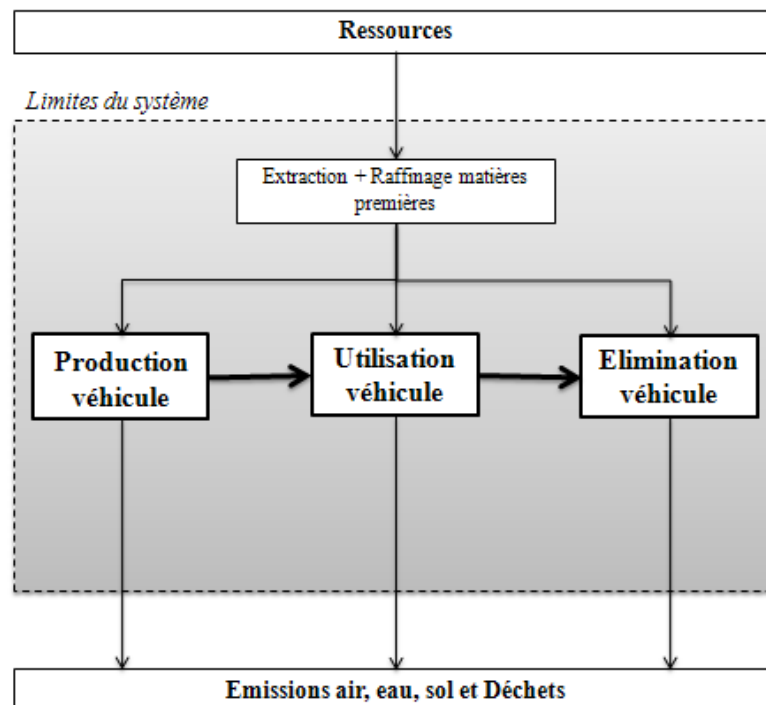


Figure 29 : Principales étapes du cycle de vie du véhicule étudié

Le cycle de vie du véhicule est découpé en 3 phases distinctes (voir figure 29).

⇒ La **phase de production** du véhicule comprenant les étapes suivantes :

- Extraction, transformation des matières premières et énergies nécessaires à la production du véhicule,
- Production de la caisse et de la chaîne de traction, assemblage du véhicule (énergie et consommables).

⇒ La **phase d'utilisation** de la voiture inclut la consommation d'électricité lors des recharges.

⇒ La **phase d'élimination** du véhicule comprend :

- Le démantèlement du véhicule avant broyage, séparation des résidus de broyage, et traitement des déchets : mise en valeur possible sous forme de réutilisation (pneus, moteur), recyclage des métaux et valorisations énergétique des matériaux composites,
- Le recyclage des batteries.

⇒ Les étapes non prises en compte sont les suivantes :

- Production des infrastructures et des biens d'équipements (bâtiments, machines de production, réseau routier...) utilisés tout au long de la vie du véhicule,
- Maintenance des véhicules.

Ces points devront être considérés et leurs influences évaluées en perspectives de ces travaux de thèse.

- *Règles d'allocation*

La présente étude ne comporte pas d'allocation. Les entrées/sorties de chaque procédé étudié lui sont imputées et lorsque nécessaire, le recyclage interne a été pris en compte.

Par exemple, dans le cas de la batterie Plomb-acide (annexe 10), le recyclage du Plomb a été alloué en totalité au cycle de vie de celle-ci. Cette valorisation a été prise en compte au travers d'une réduction de matière utilisée lors de la production de la batterie, car 85 % du plomb utilisé lors de la production de batteries plomb-acide est du plomb recyclé (les 15 % restant sont du Plomb primaire). Ainsi, la fraction de plomb secondaire qui ne peut être réinjecté dans le système sera considérée « sortant du système », et utilisé en dehors. Celle-ci a une valeur marchande et peut être considérée comme un produit secondaire. De ce fait, les émissions et les consommations liées au recyclage du plomb

auraient pu ne pas être allouées en totalité au cycle de vie de la batterie. Le scénario choisi peut donc être considéré comme pénalisant (figure 30).

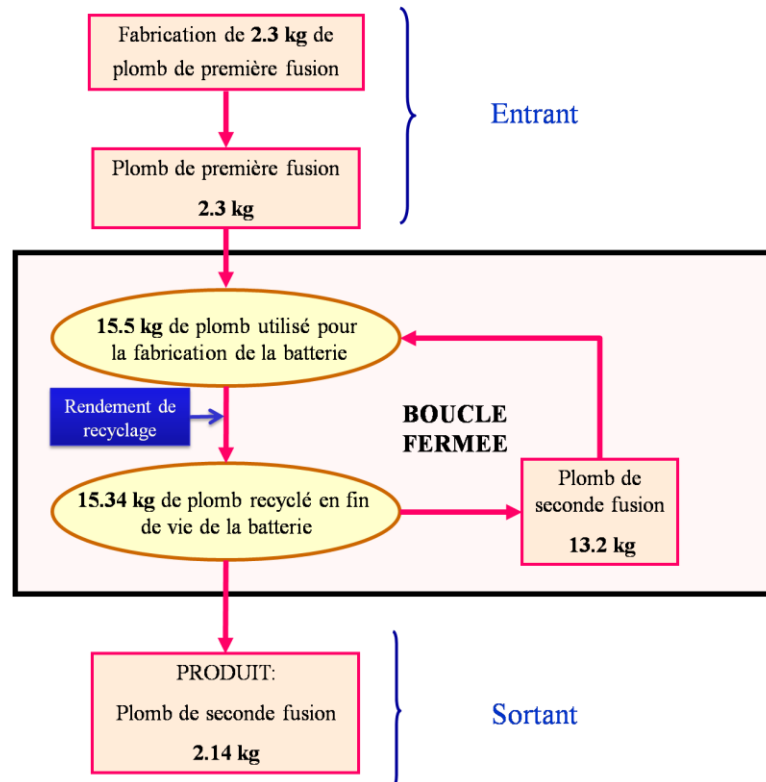


Figure 30 : Recyclage du Plomb considéré

1.1.2. Méthodes d'évaluation des impacts du cycle de vie

L'inventaire quantifie les différents flux (consommations et émissions intervenant dans le système). Il va être analysé avec une sélection d'indicateurs d'impact potentiel ACV. Ces indicateurs visent à relier les valeurs de l'inventaire à leurs impacts potentiels sur l'environnement.

Rappel : le terme « indicateur d'impact potentiel » est ici utilisé, dans la mesure où les indicateurs ne quantifient pas des impacts réels, mais la contribution potentielle du système à des problèmes environnementaux globaux, indépendamment du lieu et de la date des émissions.

L'annexe 2 dresse un panorama des méthodes d'évaluation d'impact ACV existantes et justifie la sélection réalisée. Les indicateurs d'impact potentiel ainsi que les méthodes d'analyses de l'impact correspondantes sont indiqués dans le tableau 22 ci-dessous :

| INDICATEURS | METHODE | UNITE |
|---|---|--|
| Effet de serre 100 ans <i>GWP100</i> | IPCC 2007 | g éq. CO₂ |
| Acidification <i>AP</i> | CML 2000 | g éq SO₂ |
| Eutrophisation <i>NP</i> | CML 2000 | g éq. PO₄²⁻ |
| Appauvrissement de la couche d'ozone <i>ODP</i> | WMO 1998 | g éq. CFC-11 |
| Formation d'ozone troposphérique <i>POCP</i> | WMO 1991 | g éq. C₂H₄ |
| Epuisement des ressources énergétiques <i>ADP</i> | CML 2000 | kg éq. Sb |
| Epuisement des ressources non énergétiques <i>ADP</i> | CML 2000 | kg éq. Sb |
| Toxicité humaine | Aucun indicateur retenu (cf. partie 1) | |
| Ecotoxicité | Aucun indicateur retenu (cf. partie 1) | |

Tableau 22 : Indicateurs d'impact potentiel retenus et sources des méthodes

Les facteurs de caractérisation utilisés dans ces méthodes sont inclus dans le logiciel TEAM® : ils permettent de calculer à partir de l'inventaire les différents indicateurs d'impact potentiel. Ces facteurs de caractérisation font l'objet d'un contrôle minutieux de la part d'Ecobilan PWC, développeur du logiciel TEAM®.

1.2. Analyse de l'inventaire du cycle de vie

L'inventaire du « **kilomètre moyen parcouru par le VE étudié pour le scénario d'usage S1** » est réalisé sous le logiciel ACV TEAM®. Une description synthétique des inventaires relatifs aux trois principales étapes du cycle de vie du véhicule est présentée ci-après.

1.2.1. Description générale synthétique de l'inventaire du cycle de vie

A. La phase de production

Le véhicule étudié est produit, assemblé et vendu en France. Le transport entre l'usine de production et le distributeur n'a pas été pris en compte. Des études précédentes ont montré que les phases de transport étaient négligeables pour les véhicules classiques [LE BORGNE, 1996], [EUCAR, 1996], ce qui conforte l'hypothèse.

La caisse comprend une armature autoporteuse en aluminium, une carrosserie en polyester armé (verre), le hayon (porte arrière) et le capot en polyuréthane injecté.

La durée de vie des batteries Plomb-acide peut varier de 2 à 5 ans (cf. partie 2- 3.2.5). Les résultats obtenus par la suite seront ainsi exprimés sous forme de fourchette qui permettra d'évaluer l'importance du paramètre « DV batterie » et de gérer l'incertitude liée à ce paramètre, dépendant de l'usage du véhicule (fréquence d'utilisation, mode de recharge, température etc.).

B. La phase d'utilisation

On considère un véhicule à l'usage **S1**, défini plus avant.

Le kilométrage du véhicule est fixée à 120 000 km (estimation du constructeur et hypothèse retenue dans une étude récente [HELMS, 2010]). Une étude de sensibilité vérifiera l'influence de ce paramètre.

C. La phase d'élimination

- *La caisse*

Le véhicule est démantelé puis broyé avant une séparation des résidus de broyage obtenus (RdB). Trois fractions seront ainsi récupérées : le verre, les composites et l'aluminium. On néglige, faute d'information, les consommations et émissions liées au tri des RdB.

L'aluminium (26 kg) et le verre (15 kg) à recycler sont considérés comme sortant du système. La fraction composite (106 kg) est valorisée énergétiquement par incinération.

- *La chaîne de traction*

- La batterie est considérée comme entièrement recyclée,
- Le moteur électrique a une durée de vie bien supérieure à celle du véhicule étudié (100 000 heures de fonctionnement - estimation expert EDF : M. DESSOUDE). Par exemple, pour une heure d'utilisation quotidienne du véhicule, le moteur électrique s'épuiserait au bout de 273 ans. On estime alors que le moteur électrique pourra être réemployé. Malgré cela, on a choisi d'allouer l'ensemble des émissions et consommations liées à sa production au véhicule. Cette hypothèse est largement pénalisante, car on aurait pu considérer la durée de vie du moteur 27 fois celle du VE et par exemple choisir d'affecter au cycle de vie du véhicule la production d'1/27ième de moteur,
- L'onduleur électrique sera broyé avec la caisse,
- Les pneus usagés peuvent être triés en deux groupes [Alliapur, 2010] :
 - les pneus usagés réutilisables (PUR, 14.5% des pneus). Ils peuvent être rechapés et vendus sur le marché de l'occasion ou encore être utilisés directement en génie civil (mur de soutènement, répartiteur de contraintes, raidissement de pente...),
 - les pneus usagés non réutilisables (PNUR, 85.5% des pneus). Ils sont destinés à la valorisation matière (terrain de tennis, sol de gymnase, aire de jeu pour enfant, roulettes de brouettes etc.) ou énergétique (cimenterie), ces deux voies nécessitent en général leur déchetage (mis à part la cimenterie qui utilise des pneus de véhicule de tourisme entiers).

On choisit :

- de ne pas valoriser environnementalement les 14.5 % de pneus réutilisables,
- de ne pas considérer la valorisation matière ou énergétique des 85.5 % de pneus réutilisables.

Ces deux hypothèses sont pénalisantes pour le bilan du VE.

1.2.2. Recueil des données

A. Traçabilité et mise sur papier de la base

L'ensemble des données relatives «**kilomètre moyen parcouru pour le scénario d'usage S1**» renseigne la base de données disponible sous le logiciel TEAM®.

Un classeur inventaire a été élaboré. Il permet d'accéder rapidement à l'ensemble des données sans avoir à utiliser le logiciel et garantit la traçabilité de la base. L'annexe 10 présente, à titre d'exemple, le travail réalisé pour les batteries Plomb-acide. Le classeur pourra être facilement actualisé.

B. Analyse de la qualité des données de l'inventaire

- *Pour les phases production et élimination du véhicule*
 - ⇒ Les données concernant **la caisse** (véhicule hors batterie, pneus, moteur et électronique de puissance) ont été en quasi-totalité fournies par un constructeur (matériaux et consommables) via des rapports et des entrevues courant 2008 et 2009.
 - ⇒ Les données relatives **aux pneus** proviennent de l'ACV d'un pneu moyen de voitures européennes réalisée par Pré consultants B.V [PRE CONSULTANT, 2001] et de l'ACV des pneus usagés non réutilisables (PNUR) pour 9 voies de valorisation publiée en 2010 par ALLIAPUR [ALLIAPUR, 2010], société regroupant des producteurs de pneus (Bridgestone/Firestone, Continental, Dunlop, Goodyear, Michelin, Kléber, Pirelli) et chargée d'animer la filière d'élimination, de la collecte à la valorisation.
 - ⇒ Les données relatives à **l'électronique de puissance et au moteur électrique** sont issues à la fois d'un constructeur et d'avis d'expert (M. DESSOUDE, EDF en 2008)
 - ⇒ Les données relatives à la **batterie Plomb-acide** proviennent d'une étude réalisée par Bio Intelligence Service en 2004 [BIO IS, 2004]. Les hypothèses concernant leur phase d'usage

(rendement, durée de vie, etc.) définies dans la partie 2 ont été validées par avis d'expert (Dr TORCHEUX, EDF en 2010). On rappelle que cette technologie de batterie a été choisie pour le cas d'application car il s'agit d'une technologie mature sur laquelle peu d'incertitudes demeurent.

- *Pour la phase utilisation :*

- ⇒ Il n'existe pas de données fiables et représentatives dans la littérature scientifique aujourd'hui. Les données de consommation utilisées proviennent donc **des essais détaillés en partie 2**, et de la **modélisation** à laquelle on a abouti partie 2 - § 2.3.
- ⇒ Le mix utilisé est le mix français, il tient compte des pertes au niveau du réseau (module ECOINVENT « **electricity, medium voltage, at grid, France** »).

- *Evaluation de la qualité d'inventaire*

- ⇒ Les données issues des constructeurs ont été utilisées autant que possibles. Lorsque celles-ci n'étaient pas disponibles, ont été utilisés :
 - les données de la littérature spécialisée, validée de manière systématique par des experts,
 - la base de données ECOINVENT, développée par le centre suisse pour l'ACV qui contient plus de 2500 process [FRISCHKNECHT, 2005].

L'évaluation de la qualité des données est importante lorsqu'il s'agit de publier des résultats d'ACV. S'inspirant des travaux de SCHWAB CASTELLA & al. appliquant la méthodologie ACV aux trains coréens, un tableau est utilisé pour référencer et qualifier toutes les données afin de fournir un bon aperçu de leurs forces et faiblesses et pour permettre leur usage dans la phase d'évaluation [SCHWAB CASTELLA, 2009]. Les données ont été qualifiées à trois niveaux différents (tableau 23) :

- Exhaustivité de l'inventaire
- Qualité de la nature des données, i.e. la fiabilité des données d'extraction et d'émission inventoriées et des bases et sources de données utilisées
- Précision des quantités extraites/émises pour chaque flux inventoriées

Pour chacun de ces points, l'inventaire est qualifié avec les termes « bon », « moyen », ou « faible ».

Partie 3 : Mise en perspective des résultats de la seconde partie - ACV d'un véhicule électrique

| | | Sources de données | Base de données utilisée | Exhaustivité de l'inventaire | Qualité de la nature des données d'inventaire | Précision des quantités extraites / émises |
|----------------------------------|-------------------------------------|---|----------------------------------|---|---|---|
| Caisse et assemblage | | MICROCAR (mesures dans l'usine + accès à leurs consommations d'énergies) | ECOINVENT v2.2 | Bonne | Bonne | Moyenne |
| PHASE DE PRODUCTION DU VE | | | | | | |
| CHANE DE TRACTION DU VE | Moteur et Electronique de puissance | MICROCAR Avis d'expert : M Dessoude EDF R&D - Groupe machine électrique | ECOINVENT v2.2 | Bonne | Moyenne | Moyenne-faible |
| | Roues Jantes | ACV MICHELIN MICROCAR | ECOINVENT v2.2 | Bonne | Moyenne | Bonne |
| | Batteries | Avis d'expert : Dr Torcheux EDF R&D - Groupe Batteries et gestionnaires d'énergie Rapport bio-IS Bibliographie | ECOINVENT v2.2 | Moyenne - lithium (<i>énergie de production</i>) Bonne (<i>autres chimies</i>) | Moyenne - | Moyenne - lithium (<i>énergie de production</i>) Bonne (<i>autres chimies</i>) |
| PHASE D'USAGE DU VE | | | | | | |
| Scénario d'usage | Donnée MICROCAR | ECOINVENT v2.2 | Bonne | Bonne | Moyenne (<i>hypothèses</i>) | |
| Durée de vie VE | Hypothèse → préconisation MICROCAR | | | | | |
| Durées de vie pneus | Hypothèse → préconisation MICHELIN | | | | | |
| Consommation | Essais expérimentaux /modèle | ECOINVENT v2.2 | Moyenne <i>Emissions hors</i> | Bonne | Bonne | |

| | Sources de données | Base de données utilisée | Exhaustivité de l'inventaire | Qualité de la nature des données d'inventaire | Précision des quantités extraites / émises |
|--|---|--------------------------|--------------------------------------|---|--|
| | | | <i>échappement</i> | | |
| Batteries | Hypothèses → Avis d'expert T. Brincourt EDF R&D – Chef de projet VE-VHR (rendement, SOC min et max, durées de vie cyclique et calendaires) | ECOINVENT v2.2 | Moyenne/faibles | Bonne | Moyenne/faible <i>(hypothèses)</i> |
| PHASE D'ELIMINATION DU VE | | | | | |
| Caisse + moteur + électronique de puissance | MICROCAR + son prestataire Re-source Industries | ECOINVENT v2.2 | Moyenne | Moyenne | Moyenne |
| Roues | ACV MICHELIN ACV ALLIAPUR | ECOINVENT v2.2 | Moyenne | Bonne | Moyenne |
| Batteries | Avis d'expert : Dr Torcheux EDF R&D - Groupe Batteries et gestionnaires d'énergie Rapport bio-IS Bibliographie | ECOINVENT v2.2 | Moyenne -Faible lithium Bonne | Moyenne lithium Bonne <i>(autres chimies)</i> | Moyenne |

Tableau 23: Qualification des données inventoriées

C. Données d'inventaire

L'inventaire exhaustif obtenu comporte un nombre de flux élevés, aussi seule une sélection est présentée dans les tableaux 24 et 25, proposant respectivement les quantités des substances émises et extraites les plus importantes le long du cycle du VE étudié.

| | Flux | Unité | Pour un km moyen parcouru avec le scénario d'usage S1 | | Différence entre les résultats obtenus pour les deux durées de vie testées (%) |
|----------------------------|------------------|-------|---|-------------------|--|
| | | | DV batterie 2 ans | DV batterie 5 ans | |
| Phase de production | CO ₂ | g | 17.4 | 11.8 | 47 |
| | CH ₄ | mg | 43.5 | 32.8 | 33 |
| | N ₂ O | mg | 2.5 | 2.4 | 7 |
| | SO _x | mg | 107.3 | 63.5 | 69 |
| | NO _x | mg | 56.7 | 39.2 | 45 |
| | Poussières | mg | 56.8 | 39.1 | 45 |
| | COV | mg | 19.9 | 16.8 | 18 |
| Phase d'usage | CO ₂ | g | 9.8 | 9.8 | 0 |
| | CH ₄ | mg | 14.2 | 14.2 | 0 |
| | N ₂ O | mg | 0.8 | 0.8 | 0 |
| | SO _x | mg | 38.0 | 38.0 | 0 |
| | NO _x | mg | 26.9 | 26.9 | 0 |
| | Poussières | mg | 20.4 | 20.4 | 0 |
| | COV | mg | 2.2 | 2.2 | 0 |
| Phase d'élimination | CO ₂ | g | 3.3 | 2.6 | 27 |
| | CH ₄ | mg | 4.0 | 1.7 | 139 |
| | N ₂ O | mg | 0.1 | 0.0 | 54 |
| | SO _x | mg | 22.8 | 9.3 | 146 |
| | NO _x | mg | 5.1 | 2.4 | 113 |
| | Poussières | mg | 1.3 | 0.6 | 122 |
| | COV | mg | 1.2 | 0.5 | 123 |

Tableau 24 : Inventaire des substances émises pour le kilomètre moyen parcouru pour le scénario d'usage S1

Il est intéressant d'interpréter les résultats au niveau de l'inventaire avant toute agrégation supplémentaire. L'incidence du paramètre durée de vie des batteries semble jouer sur la majorité des flux. La production et l'élimination des batteries génèrent donc des émissions de polluants importantes (en particulier des émissions de SO_x, liées en grande partie, après analyse de l'inventaire plus détaillé,

à la préparation du Plomb primaire et au recyclage du Plomb) et consomment des ressources énergétiques.

| | | | Pour un km moyen parcouru avec le scénario d'usage S1 | |
|----------------------------|----------------------------------|-------|---|-------------------|
| | Flux | Unité | DV batterie 2 ans | DV batterie 5 ans |
| Phase de production | Pétrole (42,6 GJ/tep) | g | 2.8E+00 | 2.2E+00 |
| | Charbon (30 MJ/kg) | g | 2.6E+00 | 1.7E+00 |
| | Gaz naturel (43 MJ/kg) | g | 2.8E+00 | 2.0E+00 |
| | Uranium (420 000 MJ/kg) | g | 1.7E-04 | 1.1E-04 |
| | Fer dans minerai | g | 4.1E-01 | 3.7E-01 |
| | Nickel dans minerai | g | 1.3E-01 | 1.3E-01 |
| | Cuivre dans minerai | g | 1.2E-03 | 8.0E-04 |
| | Chrome dans minerai | g | 9.0E-02 | 8.4E-02 |
| | Aluminium dans minerai (bauxite) | g | 2.5E-04 | 1.4E-04 |
| Phase d'usage | Pétrole (42,6 GJ/tep) | g | 4.5E-01 | 4.5E-01 |
| | Charbon (30 MJ/kg) | g | 3.1E+00 | 3.1E+00 |
| | Gaz naturel (43 MJ/kg) | g | 7.4E-01 | 7.4E-01 |
| | Uranium (420 000 MJ/kg) | g | 2.1E-03 | 2.1E-03 |
| | Fer dans minerai | g | 7.6E-02 | 7.6E-02 |
| | Nickel dans minerai | g | 8.8E-03 | 8.8E-03 |
| | Cuivre dans minerai | g | 6.3E-03 | 6.3E-03 |
| | Chrome dans minerai | g | 3.9E-03 | 3.9E-03 |
| | Aluminium dans minerai (bauxite) | g | 1.2E-04 | 1.2E-04 |
| Phase d'élimination | Pétrole (42,6 GJ/tep) | g | 4.4E-01 | 1.9E-01 |
| | Charbon (30 MJ/kg) | g | 2.5E-01 | 1.1E-01 |
| | Gaz naturel (43 MJ/kg) | g | 1.2E-01 | 5.2E-02 |
| | Uranium (420 000 MJ/kg) | g | 1.6E-05 | 6.8E-06 |
| | Fer dans minerai | g | 5.5E-03 | 2.9E-03 |
| | Nickel dans minerai | g | 1.9E-04 | 1.0E-04 |
| | Cuivre dans minerai | g | 1.5E-04 | 6.8E-05 |
| | Chrome dans minerai | g | 6.3E-05 | 3.6E-05 |
| | Aluminium dans minerai (bauxite) | g | 2.4E-06 | 1.1E-06 |

Tableau 25: Inventaire des quantités extraites pour le kilomètre moyen parcouru pour le scénario d'usage S1

1.3. Evaluation de l'impact du cycle de vie

Le tableau 26 présente les résultats obtenus après application des méthodes d'analyses de l'impact retenues et présentées dans le § 1.1.2.C de cette partie. Elles ont été appliquées à l'inventaire exhaustif.

| Indicateur | Unité | Impact potentiel | | Différence entre les résultats obtenus pour les 2 durées de vie testées (%) |
|--|-------------------------------------|----------------------|----------------------|---|
| | | DV batterie 2 ans | DV batterie 5 ans | |
| Effet de serre <i>IPCC-Greenhouse effect 2008 (direct, 100 years)</i> | g eq. CO ₂ | 33 | 27 | 22 |
| Acidification de l'atmosphère <i>CML-Air Acidification</i> | g eq. SO ₂ | 2.05E-01 | 1.39E-01 | 47 |
| Eutrophisation <i>CML2000-Eutrophication</i> | g eq. PO ₄ ³⁻ | 4.17E-02 | 3.24E-02 | 29 |
| Appauvrissement de la couche d'ozone <i>WMO-Depletion of the ozone layer (average)</i> | g eq. CFC-11 | 2.42E-06 | 1.94E-06 | 25 |
| Smog photochimique <i>WMO-Photochemical oxidant formation (average)</i> | g. eq. éthylène | 9.75E-03 | 8.14E-03 | 20 |
| Épuisement des ressources abiotiques <i>CML2000-Depletion of abiotic resources</i> | kg eq. Sb | 2.46E-04 | 1.90E-04 | 29 |
| • Ressources énergétiques | kg eq. Sb | 2.46E-04 | 1.90E-04 | 29 |
| • Ressources non énergétique | kg eq. Sb | 1.19E-07 | 1.11E-07 | 7 |

Tableau 26 : Evaluation de différents indicateurs d'impact, selon différentes méthodes d'évaluation retenues

L'analyse des résultats obtenus au niveau des impacts potentiels étudiés confirme l'interprétation de l'inventaire. Le paramètre durée de vie des batteries influe sur tous les impacts potentiels et a moins d'incidence sur l'épuisement des ressources non énergétiques. En particulier, les importantes

émissions de SOx identifiées lors de l'analyse de l'inventaire, se retrouvent au niveau de l'indicateur acidification de l'atmosphère.

1.4. Interprétation du cycle de vie

Les résultats obtenus peuvent être détaillés au niveau des flux de l'extrait d'inventaire présenté dans les tableaux 24 et 25, ainsi qu'au niveau des valeurs des indicateurs d'impacts potentiels présentés dans le tableau 26.

1.4.1. Analyse des flux d'inventaire

Les flux retenus pour l'analyse sont les suivants :

- Le bilan CO₂, essentiel pour évaluer l'impact effet de serre.
- Les bilans SOX, NOX, COV et poussières, classiquement associés à la pollution atmosphérique au sens large.

Remarque : la phase utilisation ne considère que la consommation d'électricité produite en France (Module ECOINVENT: electricity, medium voltage, at grid, at grid (RER, 1992-2004)).

A. Bilan CO₂

Le bilan CO₂ est compris entre 24 g/km (DV_{batterie} = 5ans) et 30 g/km (DV_{batterie} = 2 ans), cf. tableau 27. La contribution en CO₂ de chaque étape du cycle de vie est présentée figure 31. Pour mieux distinguer les flux propres à la batterie, ils ont été séparés des phases de production et d'élimination du véhicule.

| DV Batterie (années) | Cycle de vie total | Phase de production | Phase d'utilisation | Phase d'élimination | Production + Elimination batterie(s) |
|----------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------------------------|
| 2 | 30 | 17 | 10 | 3 | 10 |
| 5 | 24 | 12 | 10 | 3 | 4 |

Tableau 27 : Bilan CO₂ par phase, en g/km

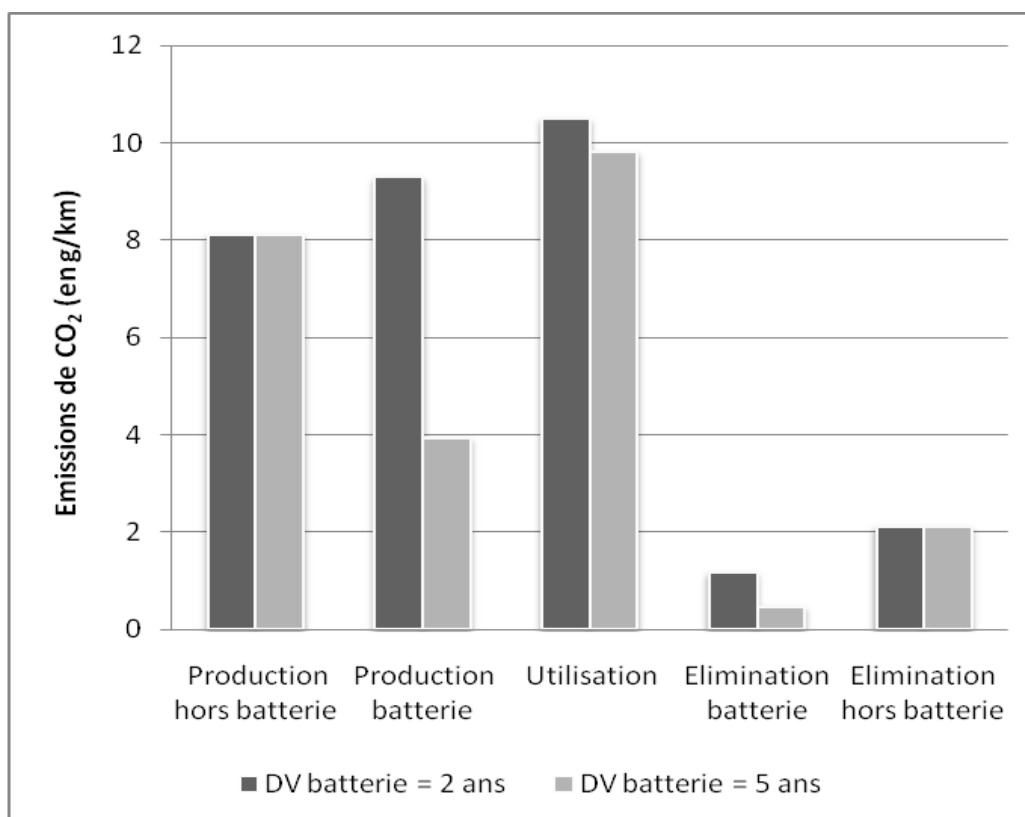


Figure 31 : Bilan CO₂ par phase, en g/km

L'étape production du véhicule (production batteries + production hors batteries) est la plus émettrice de CO₂ (entre 49 et 56%). La part liée à la production et l'élimination des batteries représente 18 à 34% des émissions de CO₂ selon la DV de la batterie.

Entre 33 et 40% des émissions ont lieu pendant l'étape d'utilisation et sont dues à la production de l'électricité. Le kWh retenu est un kWh France, au contenu CO₂ 88.3 g/kWh (source : module ECOINVENT utilisé). Le bilan global serait plus élevé si la recharge du véhicule avait lieu dans un pays au mix électrique plus « carboné » (cf. étude de sensibilité correspondante).

B. Bilan SOX

Le bilan d'émission de SOX est compris entre 111 mg/km (DV_{batterie} = 5ans) et 168 mg/km (DV_{batterie} = 2 ans), cf. tableau 28.

| DV Batterie (années) | Cycle de vie total | Phase de production | Phase d'utilisation | Phase d'élimination | Production + Elimination batterie(s) |
|----------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------------------------|
| 2 | 1.6E-01 | 1.1E-01 | 3.8E-02 | 2.3E-02 | 9.5E-02 |
| 5 | 1.1E-01 | 6.3E-02 | 3.8E-02 | 9.2E-03 | 3.8E-02 |

Tableau 28 : Bilan SOX par phase, en g/km

Dans la figure 32, il apparaît que la majorité du bilan SOX relève des étapes de production (entre 58 et 64%) et d'utilisation du véhicule (entre 23 et 34%). La part liée aux batteries représente 32 à 57% des émissions de SOX selon la durée de vie des batteries.

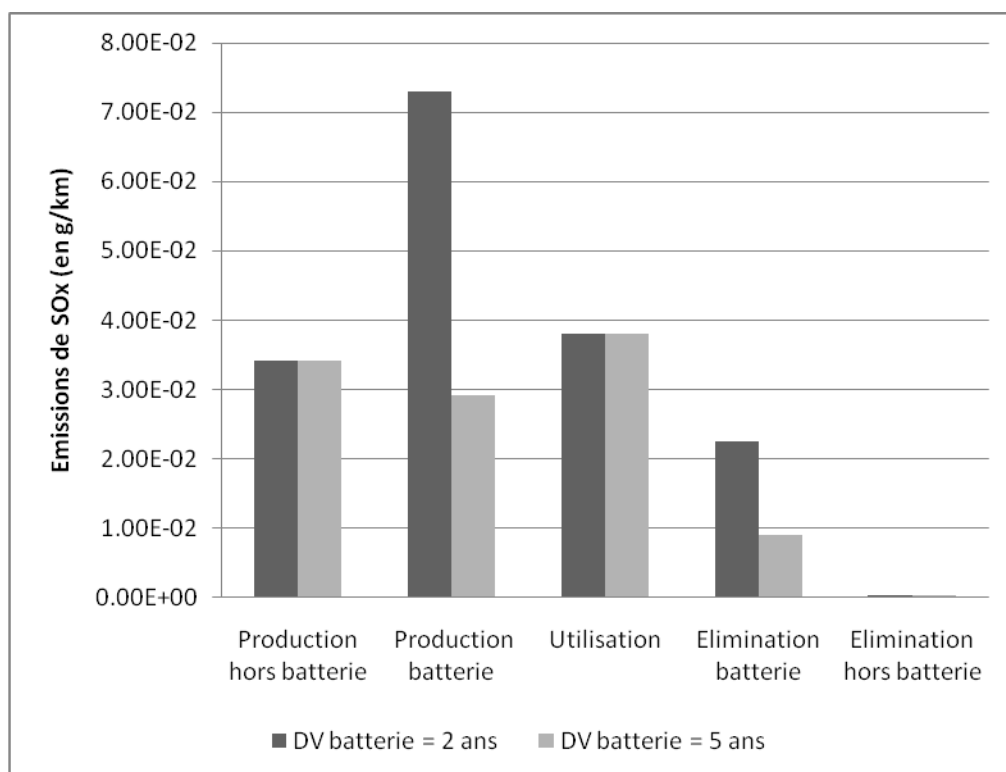


Figure 32 : Bilan SOx par phase, en g/km

C. Bilan NOx

Le bilan NOX est de 69 mg/km (DV batterie = 5ans) à 89 mg/km (DV batterie = 2 ans), cf. tableau 29. La figure 33, montre que les phases les plus contributrices sont les phases de production (57 à 64%) et d'utilisation (30 à 39%). La part liée aux batteries est de 20 à 38% des émissions de NOx.

| DV Batterie (années) | Cycle de vie total | Phase de production | Phase d'utilisation | Phase d'élimination | Production + Elimination batterie(s) |
|----------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------------------------|
| 2 | 8.9E-02 | 5.7E-02 | 2.7E-02 | 5.1E-03 | 3.48E-02 |
| 5 | 6.9E-02 | 3.9E-02 | 2.7E-02 | 2.4E-03 | 1.3E-02 |

Tableau 29 : Bilan NOX par phase, en g/km

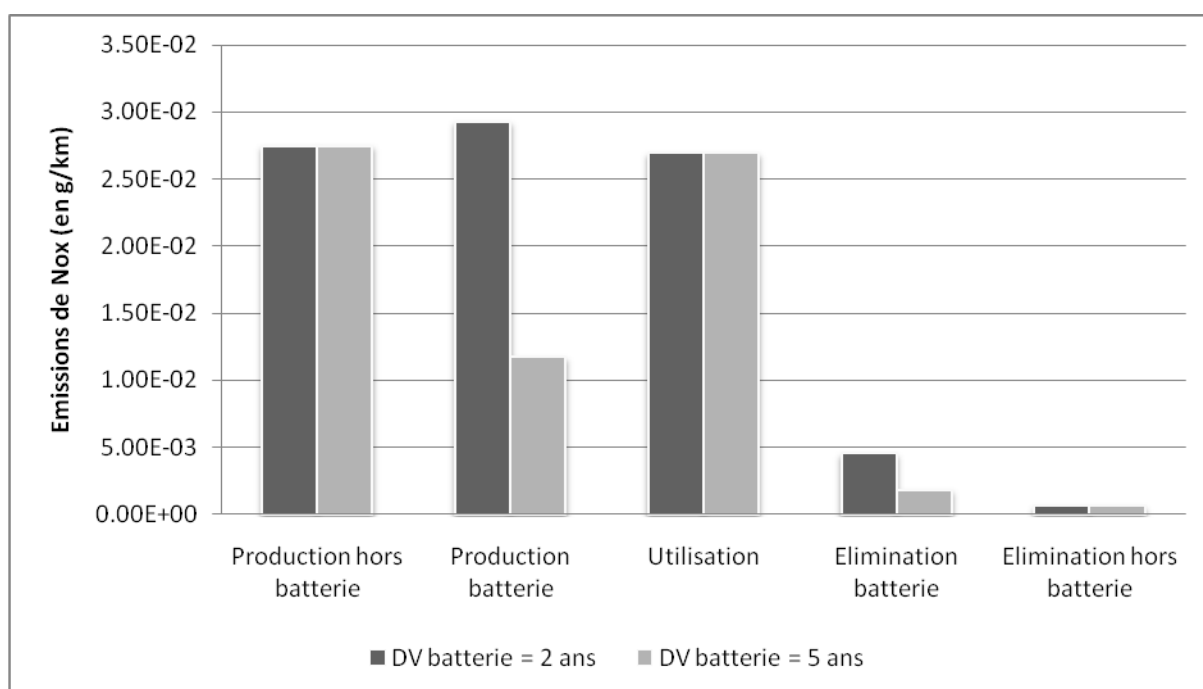


Figure 33 : Bilan NOX par phase, en %

D. Bilan particules

- Particules et ACV : rappel

L'impact sanitaire des particules dépend de leur taille (cf. partie 1, § 1.1.2) :

- Au dessus d'une taille de 10 µm, les particules sont stoppées par les voies respiratoires,
- Entre 2.5 et 10 µm, les petites particules pénètrent profondément dans les bronches,
- En dessous de 2.5 µm, les particules pénètrent dans les alvéoles.

Le flux « particule » est particulièrement difficile à appréhender en ACV car il faudrait connaître pour l'ensemble des processus étudié la taille des particules émises. Or ce n'est pas le cas car toutes les

bases de données ne sont pas aussi précisément renseignées. Ce flux doit donc être interprété avec prudence.

- Résultats

| DV Batterie (années) | Cycle de vie total | Phase de production | Phase d'utilisation | Phase d'élimination | Production + Elimination batterie(s) |
|----------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------------------------|
| 2 | 7.85E-02 | 5.68E-02 | 2.04E-02 | 1.29E-03 | 3.07E-02 |
| 5 | 6.01E-02 | 3.91E-02 | 2.04E-02 | 5.84E-04 | 1.23E-02 |

Tableau 30 : Bilan Poussières par phase, en g/km

Les résultats obtenus pour le flux « particules » présentés dans le tableau 30 sont donnés pour un regroupement des différentes tailles de particules. La majorité du bilan provient des étapes de production du véhicule (65 à 73%) et d'utilisation (26 à 34%) (cf. figure 34).

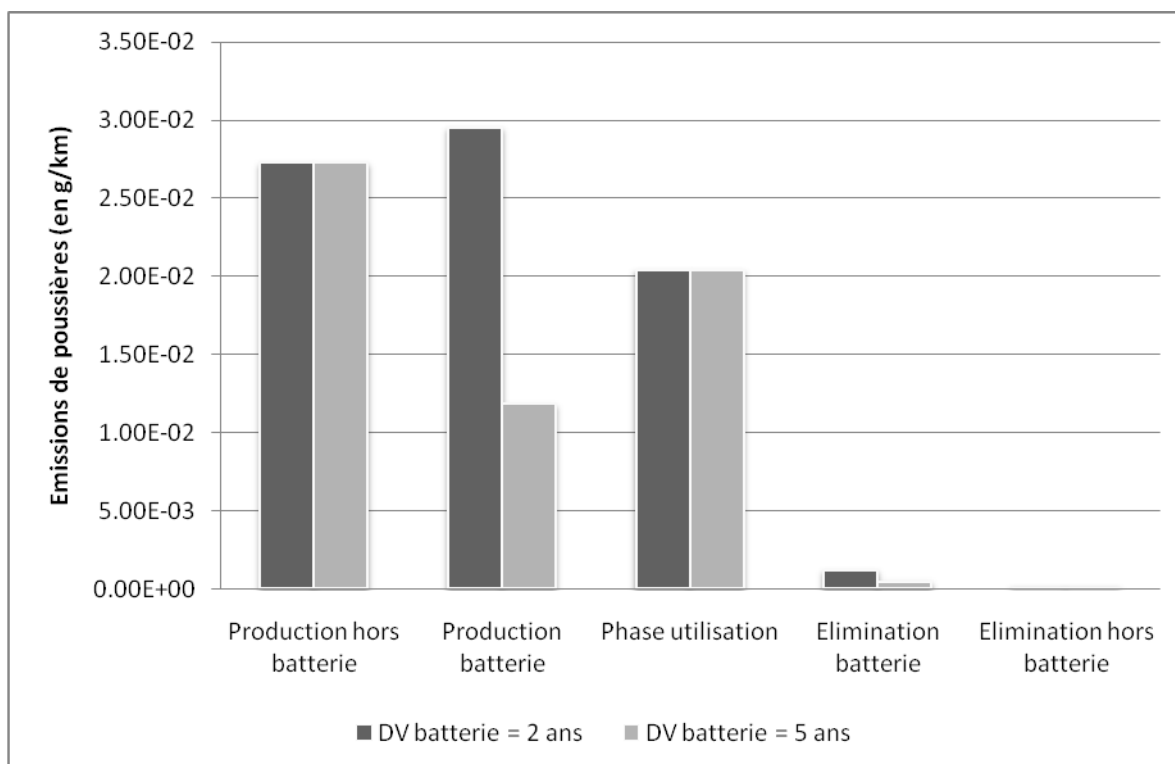


Figure 34 : Bilan Poussières par phase, en g/km

E. Bilan COV

Le bilan COV est de 19.5 ($DV_{\text{batterie}} = 5 \text{ ans}$) à 23.3 mg/km ($DV_{\text{batterie}} = 2 \text{ ans}$) cf. tableau 31.

Elles ont lieu à grande majorité pendant l'étape de production du véhicule (85 à 87%), D'après la figure 35, l'étape de production hors batteries est responsable de 76 à 87% des rejets. Les émissions de COV sont essentiellement liées à la production du véhicule hors batterie.

| DV_{Batterie} (années) | Cycle de vie total | Phase de production | Phase d'utilisation | Phase d'élimination | Production + Elimination Batterie(s) |
|------------------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|--|
| 2 | 2.33E-02 | 1.99E-02 | 2.16E-03 | 1.20E-03 | 6.27E-03 |
| 5 | 1.95E-02 | 1.68E-02 | 2.16E-03 | 5.37E-04 | 2.51E-03 |

Tableau 31 : Bilan COV par phase, en grammes

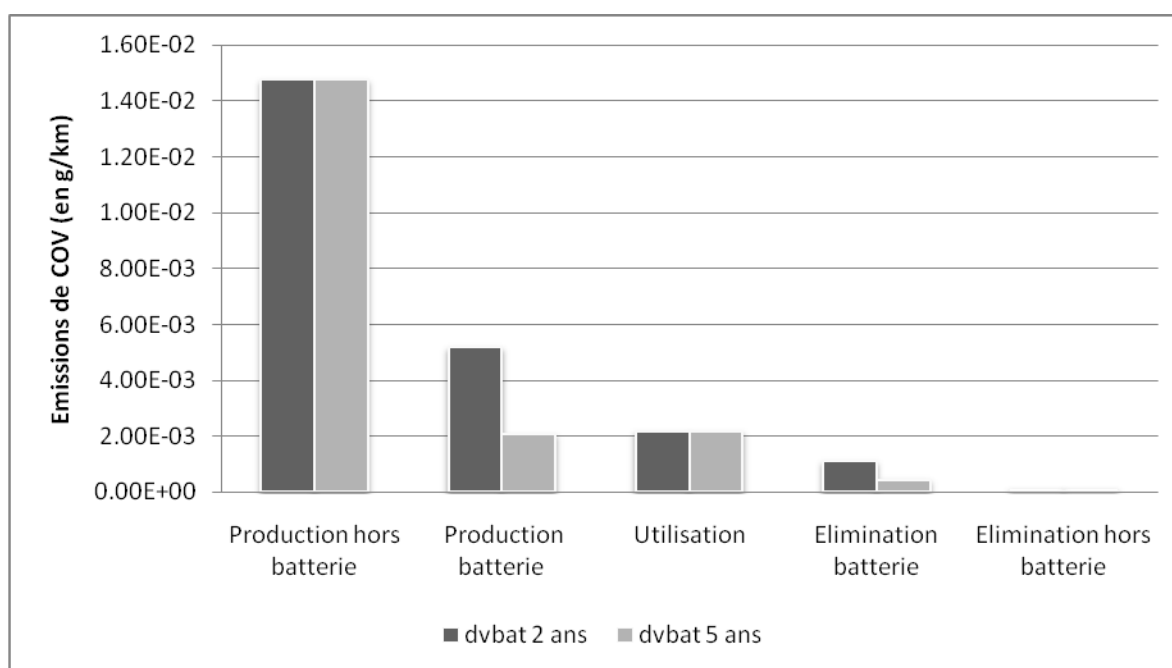


Figure 35 : Bilan COV par phase, en g/km

1.4.2. Analyse des indicateurs d'impacts potentiels

Les indicateurs analysés sont ceux énoncés et calculés au 1.3 de cette partie.

A. L'effet de serre

La valeur de l'impact potentiel sur l'effet de serre est comprise entre **27 et 33 g eq. CO₂/km S1** (figure 36).

L'analyse détaillée du résultat d'impact potentiel permet d'interpréter la contribution relative des différents gaz à effet de serre. Le CO₂ en est le principal contributeur (91%), suivi du CH₄ (4.6%), du N₂O (3%), du CF₄ (1%) et du SF₆ (0.4%).

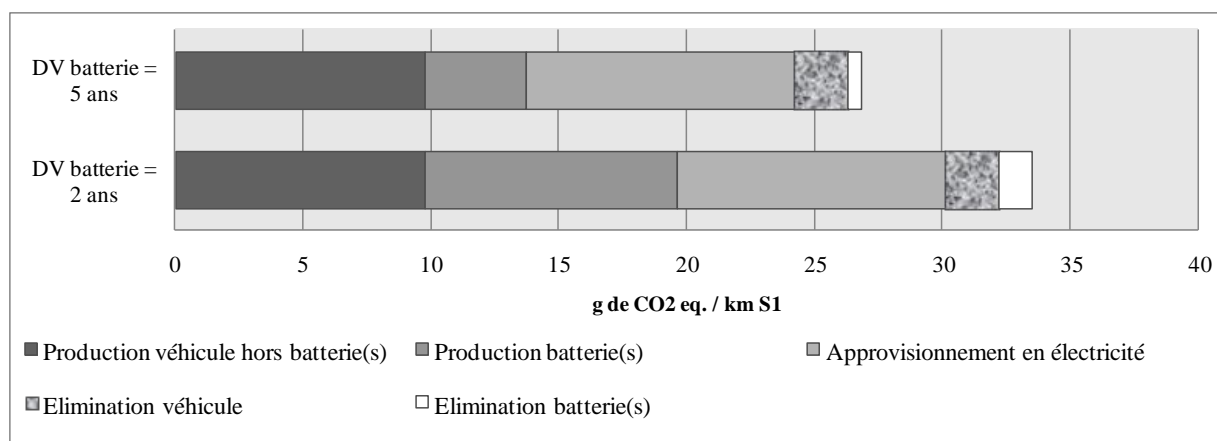


Figure 36 : Impact potentiel sur l'effet de serre (IPCC 2008, 100 ans)

La répartition de cet impact potentiel sur les différentes étapes du cycle de vie du VE est telle que :

- ⇒ La phase de construction du véhicule est prédominante : 51% pour DV batterie = 5 ans et à 59% pour DV batterie = 2 ans.
- ⇒ La phase « utilisation » contribue au bilan GES à hauteur de 31% pour DV batterie = 5 ans et 39% pour DV batterie = 2 ans.
- ⇒ La phase « élimination » contribue à hauteur de 10%.

B. L'acidification

Les résultats obtenus pour l'indicateur « acidification atmosphérique » entraînent sensiblement les mêmes commentaires que ceux obtenus pour l'effet de serre (figure 37).

- ⇒ La phase de construction du véhicule est prédominante (50 à 59%).
- ⇒ Les phases « utilisation » et « élimination » contribuent respectivement à hauteur de 28 à 42% et 8 à 13% à la valeur de l'impact.

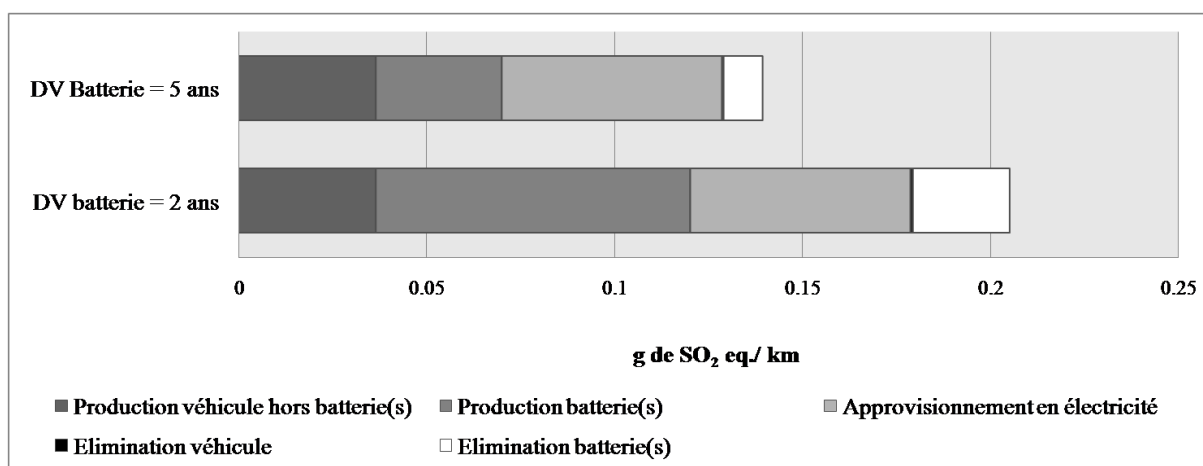


Figure 37 : Impact potentiel sur l'acidification atmosphérique (CML 2000-baseline)

C. La consommation de ressources

L'indicateur utilisé (CML-2000 – *Depletion of abiotic resources*) est basé à la fois sur l'état du gisement et la vitesse d'épuisement des ressources.

Il faut signaler que cet indicateur est discuté en ACV (cf. annexe 2) car il repose sur des données incertaines. En effet, les quantités de ressources évoluent constamment avec les quantités extraites pour les produits de consommations courants, les produits innovants et les découvertes régulières de gisement.

L'épuisement des ressources énergétiques représente plus de 99.9% du total de l'indicateur d'impact « épuisement des ressources ». Il a donc été retenu de dissocier les ressources énergétiques (pétrole, charbon, gaz naturel ...) et non énergétiques (cuivre, cadmium...).

- *Ressources énergétiques*

| Ressources énergétiques | DV batterie= 2 ans | DV batterie= 5 ans |
|-------------------------|--------------------|--------------------|
| Charbon | 32% | 35% |
| Lignite | 10% | 8% |
| Gaz | 27% | 27% |
| Pétrole | 30% | 30% |
| Uranium | 0% | 0% |

Tableau 32 : Répartition de l'indicateur Ressources énergétiques par substance

Cet indicateur est dominé par le charbon, le pétrole et le gaz naturel (tableau 32). L'influence liée à la consommation d'uranium apparaît marginale.

Les étapes prédominantes (figure 38) sont la production (au total 60% de l'indicateur) et la consommation d'électricité durant l'utilisation (35% de l'indicateur). Lorsque la DV batterie considérée est de 5 ans, la part liée aux batteries (construction + élimination) représente 19% de cet impact potentiel.

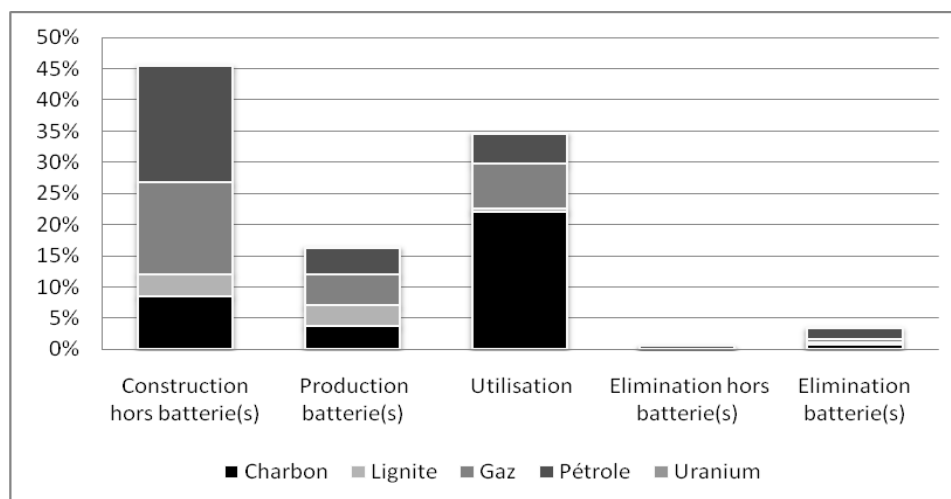


Figure 38 : Impact potentiel sur la consommation de ressources énergétiques par étape et par substance (en %) et pour une DV de batterie de 5 ans

- *Ressources non énergétiques*

Le tableau 33 présente la répartition de l'indicateur ressources non énergétiques par substance. Il est calculé à partir de l'état du gisement et de la vitesse d'épuisement des ressources.

| Ressource non énergétiques | DV batterie= 2 ans | DV batterie= 5 ans |
|----------------------------|--------------------|--------------------|
| Chrome | 68% | 67% |
| Cuivre | 10% | 12% |
| Molybdène | 3% | 3% |
| Nickel | 13% | 13% |
| Soufre | 1% | 1% |
| Etain | 2% | 1% |

Tableau 33 : Répartition de l'indicateur Ressources non énergétiques par substance

Le chrome, suivi du nickel et du cuivre sont les substances les plus contributrices de l'impact. Ces ressources sont consommées essentiellement lors de la construction de la caisse du véhicule (72 à 81%), comme le montre la figure 39. En particulier, le cuivre sert à la production du moteur électrique, moteur et de la batterie.

L'étape d'utilisation contribue pour 17-18% à la valeur de l'indicateur. Elle est liée à la production d'électricité.

L'incidence de la phase élimination sur l'impact potentiel épuisement des ressources non énergétiques est faible comparée à celles des autres phases du cycle de vie.

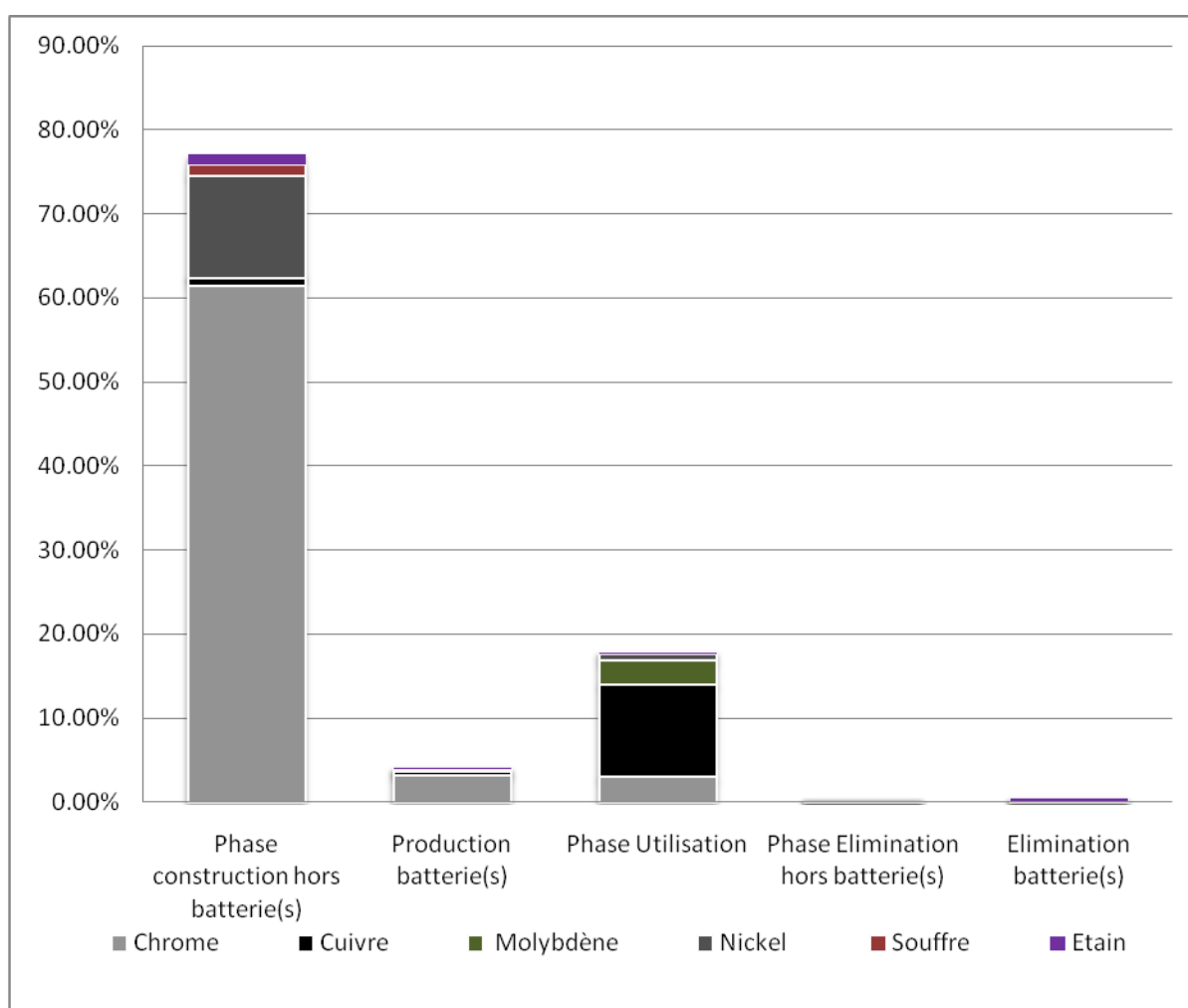


Figure 39 : Impact potentiel sur la consommation de ressources non énergétiques par étape et par substance (en %) et pour une DV de batterie de 5 ans

D. Les autres indicateurs

Les résultats obtenus pour l'indicateur « smog photochimique », « destruction de la couche d'ozone », montrent que la majorité des impacts ont lieu pendant la phase construction pour le VE (figure 40). Par contre l'impact potentiel « eutrophisation » est essentiellement lié à la production d'électricité.

Compte tenu de la fiabilité accordée à ces indicateurs (cf. partie 1), leur analyse ne sera pas approfondie.

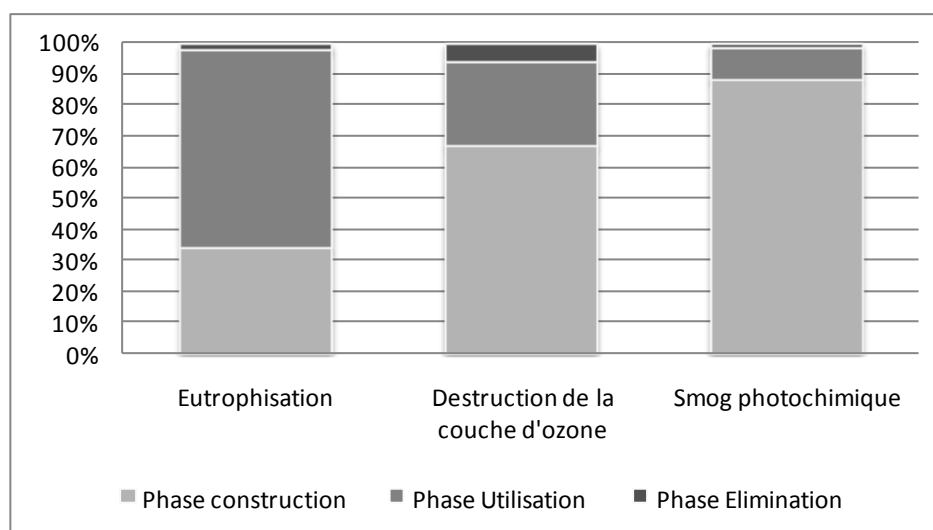


Figure 40 : Résultats obtenus pour les autres indicateurs testés et pour DV batterie de 5 ans

E. Synthèse

Les résultats montrent qu'avec les hypothèses considérées (véhicule produit, assemblé et conduit en France, scénario d'usage S1) la phase de production est la principale contributrice aux impacts potentiels évalués.

Pour l'ensemble des indicateurs, hormis l'épuisement des ressources non énergétiques, la sensibilité des résultats à la durée de vie de la batterie est importante (cf. tableaux 24, 25 et 26).

2. Comparaison avec un véhicule thermique équivalent

2.1. Objectif et champ de l'étude:

Il s'agit de comparer les résultats obtenus pour le VE à ceux obtenus pour un VCI diesel équivalent : même modèle de véhicule, puissance moteur identique 4 kW, même vitesse maximale égale à 45 km/h.

Les frontières de l'étude et l'unité fonctionnelle restent les mêmes (UF = « le km moyen parcouru pour le scénario d'usage S1 »).

2.2. Description générale synthétique du cycle de vie du VCI étudié

⇒ Pour l'étape de production et d'élimination :

L'inventaire de la caisse est identique à celui du véhicule électrique.

Les modifications de la chaîne de traction du VCI par rapport à celle du véhicule électrique portent essentiellement sur le retrait des modules liés à l'onduleur, au moteur électrique et à la batterie et l'ajout des modules suivants :

- **Le moteur thermique** : il s'agit d'un moteur Yanmar pesant 103 kg [Re-Source INDUSTRIES, 2008]. Il dure toute la vie du VCI et sera broyé avec le reste de la caisse lors de la phase de fin de vie
- **La batterie de démarrage** est une batterie Plomb-acide de 13 kg. On utilisera le module « batterie Plomb-acide » détaillé dans l'annexe 10. La durée de vie d'une batterie est égale à 5 ans. Deux batteries seront donc utilisées sur la durée de vie du véhicule (10 ans).

⇒ Pour l'étape d'utilisation :

On conserve l'hypothèse de 120 000 km parcourus le long de la vie du véhicule, les données de consommations et d'émissions ont été mesurées lors des essais sur banc à rouleau (cf. partie 2).

Après avoir déterminé le champ de l'étude et précisé l'inventaire, l'analyse de cycle de vie est réalisée, de la même façon que pour le véhicule électrique. On obtient alors les résultats ci-dessous.

2.3. La consommation d'énergie primaire

L'énergie primaire n'est pas un indicateur d'impact ACV reconnu. On trouve néanmoins parfois dans la littérature des résultats relatifs au CED, Cumulative Energy Demand. Cet indicateur vise à traduire la consommation énergétique du système, en affectant aux différentes consommations de ressources énergétiques leurs PCI (Potentiel de Combustion Interne, exprimé MJ/kg), les rendant ainsi agrégeables en MJ d'énergie primaire.

Mais cet indicateur reste contesté et difficile d'interprétation. La principale critique étant lié au fait d'additionner des ressources aussi différentes que le gaz, le charbon et l'uranium en terme physique (via leur contenu en chaleur PCI).

Toutefois, l'indicateur reste utilisé. On propose donc de comparer avec cet outil, la consommation d'énergie primaire du VE étudié et de son VCI équivalent. Seront affectés aux consommations de ressources énergétiques, les coefficients correspondants au PCI de la ressource brute: uranium : 420 000 MJ/kg, charbon 18 MJ/kg, gaz 43 MJ/kg, pétrole 42 MJ/kg.

Le graphique 41 présente les résultats obtenus.

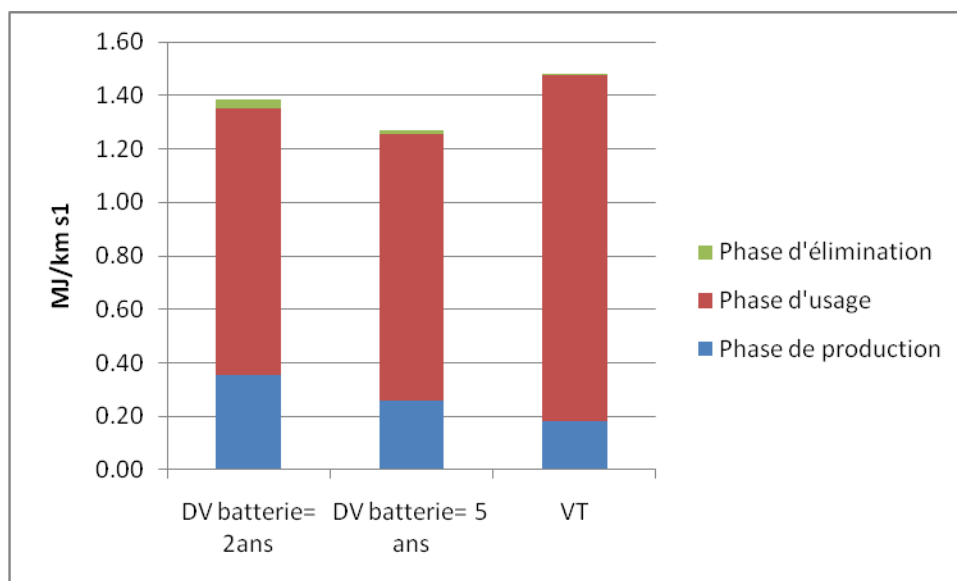


Figure 41 : Bilan CED par phase, en MJ/km S1

Les résultats obtenus montrent que la consommation d'énergie primaire du VCI est plus importante (+7 à 16%) que celle du VE.

La phase prédominante est la phase d'usage des véhicules. Elle représente respectivement :

- 72 à 79% de l'indicateur pour le VE et principalement liée à la consommation d'uranium lors de la production de l'électricité en France,
- 87% de l'indicateur pour le VCI, liée à la combustion du diesel dans le véhicule.

La phase de production représente 20 à 26% pour le VE et 12% pour le VCI.

2.4. Interprétation et comparaison des cycles de vie VE et VT

Les résultats obtenus sont interprétés au niveau des valeurs des impacts potentiels de chaque véhicule, sur l'effet de serre, l'acidification, et l'épuisement des ressources (figure 42). Pour le VE, on conserve les 2 hypothèses de durée de vie de batterie considérées plus haut.

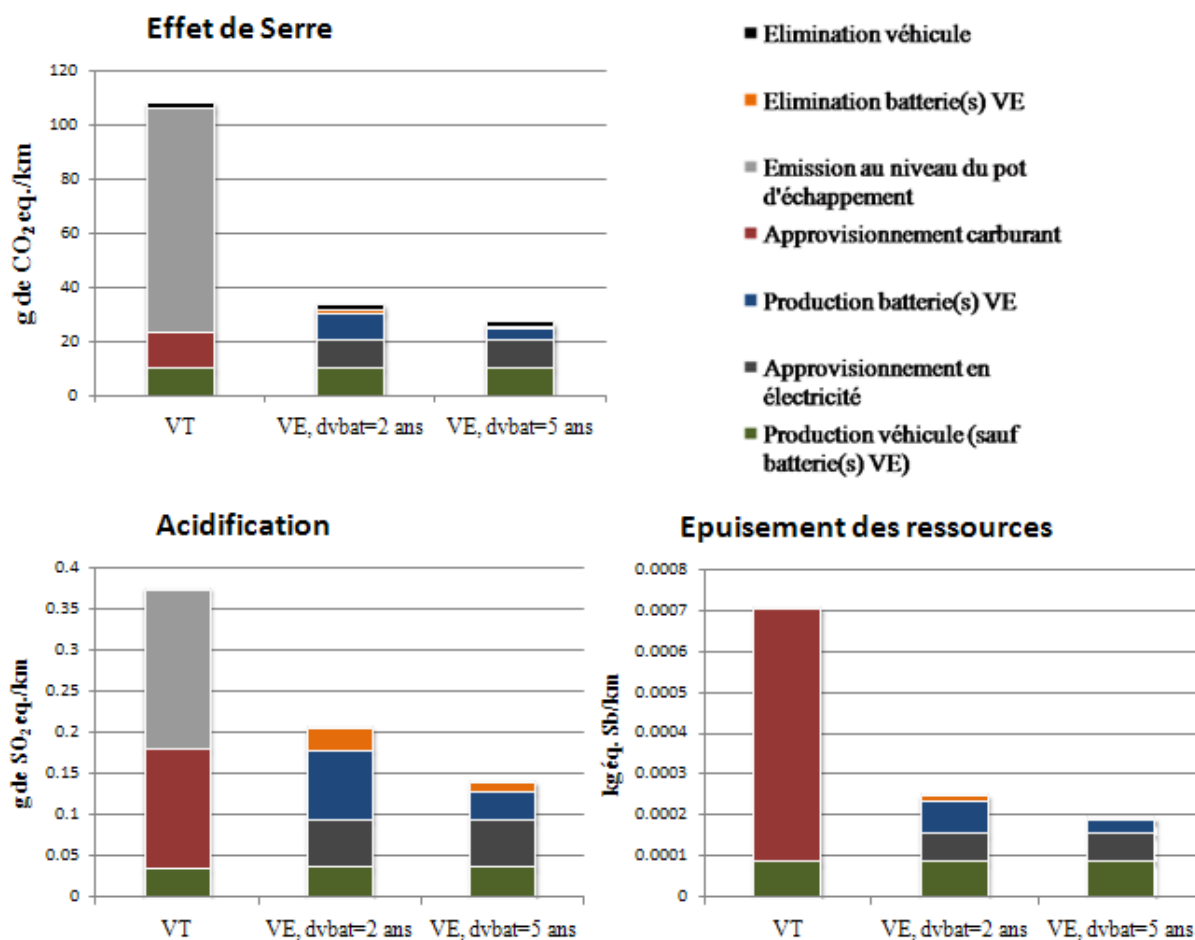


Figure 42 : Comparaison des impacts potentiels « effet de serre », « acidification » et « épuisement des ressources » entre VE et VCI équivalent

Le bilan « effet de serre » du VCI est de 3.2 à 3.9 fois supérieur à celui identifié pour le VE testé. Pour l'acidification, il est de 1.8 à 2.7 fois supérieur et pour l'épuisement des ressources, de 2.8 à 3.7 fois supérieur à celui identifié pour le VE testé (figure 42).

⇒ **Les valeurs des indicateurs sont plus élevées pour le VCI que pour le VE. Ainsi, notamment, le bilan GES du VE est meilleur que celui du VCI.**

Remarque : Il convient de tenter de situer les résultats du VCI par rapport à ceux de la littérature. Il n'a pas été trouvé de résultats d'ACV appliquées à des véhicules sans permis ici étudiés. De plus, les résultats des différentes études ne sont pas comparables du fait des hypothèses différentes (scénarios d'usages, consommations, etc.) considérées par les auteurs. Toutefois, HELMS et SIMONS concluent à des valeurs comprises entre 150 et 200 g de CO₂eq/ km pour des petits véhicules (respectivement Golf et Twingo), comme le montrait la figure 11. La valeur d'impact effet de serre trouvée pour le VCI est ici de 105 g. La différence doit s'expliquer en partie par la différence de masse et d'usage (véhicule limité à 45 km/h) du VCI étudié.

Pour mieux comprendre ces résultats, le tableau 34 présente la répartition de ces trois impacts potentiels sur les différentes étapes du cycle de vie :

| Impact potentiel considéré | Véhicules étudiés | Contribution (en %) à l'impact potentiel considéré | | |
|----------------------------|-------------------------|--|-------------------|-------------------|
| | | Phase production | Phase utilisation | Phase élimination |
| Effet de serre | VCI | 8.9 | 89.1 | 2.0 |
| | VE, DV batterie = 2 ans | 58.5 | 31.3 | 10.1 |
| | VE, DV batterie = 5 ans | 49.0 | 37.5 | 9.4 |
| Acidification | VCI | 9.0 | 90.6 | 0.4 |
| | VE, DV batterie = 2 ans | 58.6 | 28.5 | 12.9 |
| | VE, DV batterie = 5 ans | 50.2 | 42.0 | 7.9 |
| Epuisement des ressources | VCI | 12.2 | 87.6 | 0.2 |
| | VE, DV batterie = 2 ans | 66.5 | 26.7 | 6.7 |
| | VE, DV batterie = 5 ans | 61.7 | 34.6 | 3.8 |

Tableau 34 : Contribution à l'impact potentiel des étapes du cycle de vie VE et VCI (en %)

Les résultats présentés dans la figure 42 montrent que les impacts des phases de production et d'élimination sont plus importants pour le VE que pour le VCI. Ceci est facilement explicable, car la

chaîne de traction de la version électrique est plus lourde du fait des batteries. Pour autant, les impacts liés à l'approvisionnement du carburant et à la combustion interne sont loin d'être compensés par les impacts supplémentaires liés à la batterie du VE (figure 42).

Pour le VCI, la grande majorité des impacts potentiels est liée à la phase utilisation alors que pour le VE, l'étape de production est largement prépondérante.

- *Interprétation pour l'impact potentiel sur l'Effet de Serre*

La phase d'usage du véhicule est responsable de 89% de l'impact potentiel pour le VCI. Ces émissions sont dues pour 12.5% à l'approvisionnement en carburant et pour 76.6% aux émissions directes au pot d'échappement lors de la combustion interne du carburant.

- *Interprétation pour l'impact potentiel acidification*

90.6% de l'impact potentiel acidification est lié à la phase d'utilisation. L'approvisionnement en carburant et les émissions directes au pot d'échappement sont respectivement responsables de 39 et 51.6% de l'impact potentiel sur le cycle de vie.

- *Interprétation pour l'impact potentiel Epuisement des ressources*

La comparaison des répartitions des consommations en ressources énergétiques par substance et par étape des cycles de vie des véhicules est représentée dans la figure 43.

L'épuisement des ressources énergétiques représente plus de 99.9 % de l'indicateur global. L'étape « approvisionnement en carburant » contribue à elle seule à 82.2% de l'impact (cf. figure 43).

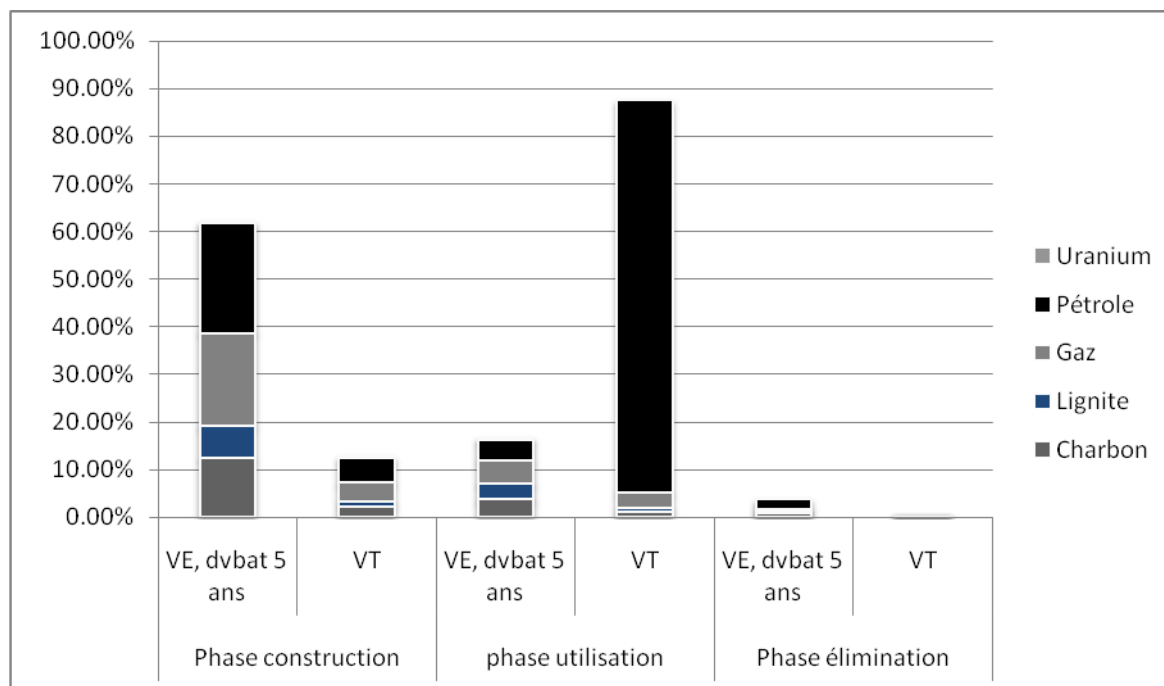


Figure 43 : Comparaison de l'impact potentiel VE et VCI sur l'Épuisement des ressources énergétiques, en %

2.5. Synthèse

Les résultats obtenus pour les différents impacts potentiels testés et selon les hypothèses de l'étude (véhicule produit, assemblé et utilisé en France, scénario d'usage S1) sont favorables au véhicule électrique. Par ailleurs, on observe une modification de la répartition des impacts potentiels entre les étapes du cycle de vie, l'étape prépondérante pour le VCI est celle d'utilisation, tandis que celle prépondérante pour le VE utilisé en France est celle de la production.

Par ailleurs, pour l'indicateur CED, la phase prédominante est la même pour les deux technologies de véhicule : la phase d'usage (essentiellement du fait de la consommation d'uranium pour les VE et de diesel pour les VCI). De plus, les résultats obtenus montrent que la consommation d'énergie primaire du VCI est plus importante (+7 à 16%) que celle du VE.

Remarque : Dans le cas du VE, une partie des émissions liées à la phase utilisation ne sont pas comme pour le VCI rejetées au niveau du pot d'échappement, mais déplacées géographiquement sur les lieux de production d'électricité. Ce n'est pas l'objet de ce mémoire, mais il pourrait être intéressant de chercher à déterminer les conséquences de ce transfert pour l'environnement et la santé publique.

Enfin, il reste à vérifier :

- la robustesse de ces résultats quand aux hypothèses fixées : hypothèses relatives à la batterie et hypothèses méthodologiques,
- l'influence de scénarios différents (chimie de batteries et usages) sur le bilan environnemental du VE étudié.

Ce sera l'objet des analyses de sensibilité proposées dans la partie suivante.

3. Analyse et études de sensibilité : importance des paramètres liés à la batterie ou l'usage

Il s'agit d'utiliser les analyses de sensibilité et de tester différents scénarios pour identifier les paramètres clés du bilan environnemental des VE (figure 44). En particulier, sera évaluée l'influence

- **du nombre de batteries à produire et à éliminer au long de la vie du véhicule**
- **de la consommation électrique** : paramètre dépendant de nombreux facteurs (infrastructures, caractéristiques véhicules, trafic et comportement de conduite).
- **de différentes hypothèses liées au VE et à son utilisation** : mix électrique, durée de vie kilométrique du VE et sa durée de vie en années

Pour évaluer l'importance des paramètres liés à l'usage (trafic et comportement de conduite), différents scénarios seront testés, faisant varier la proportion d'usage route / urbain, l'utilisation d'auxiliaires ...

Différentes chimies de batteries étant envisagées, on évaluera également leurs différentes influences sur le cycle de vie du véhicule

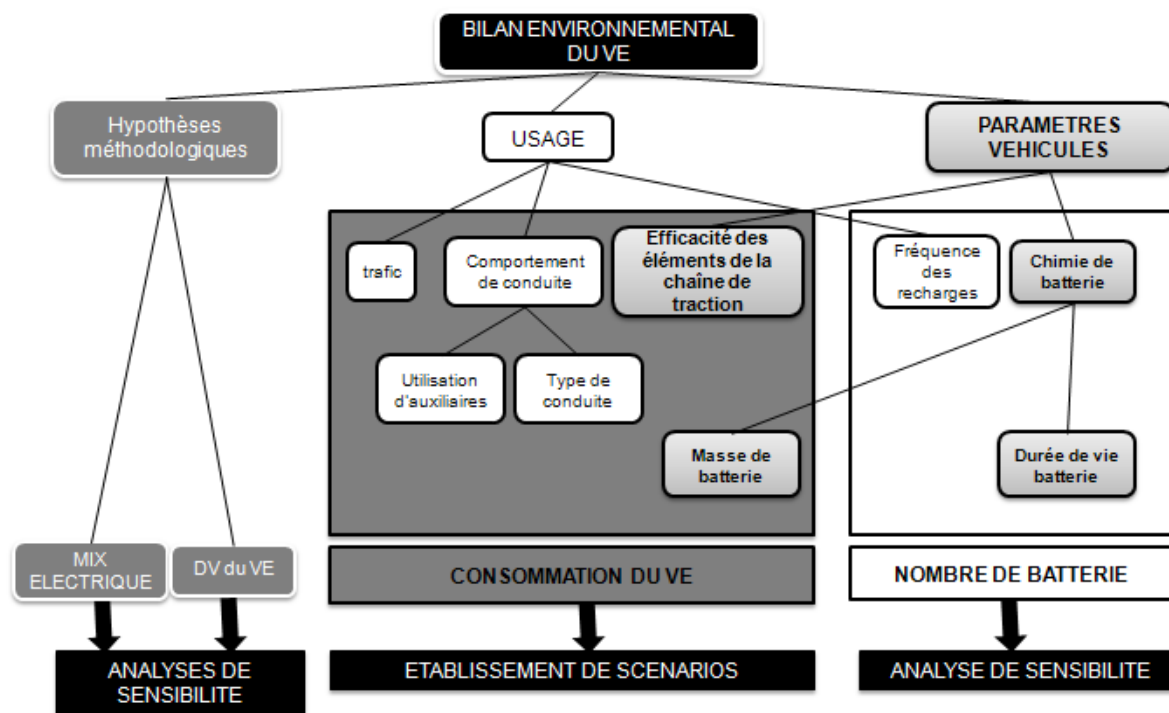


Figure 44 : Identification des paramètres clés

3.1. Les paramètres liés aux batteries

3.1.1. Sensibilité à la chimie de batterie

A. Objectif de l'analyse

En considérant différents véhicules avec chacun la même capacité de batterie égale à 8000 Wh, l'objectif de cette analyse de sensibilité est de comparer des chimies de batteries différentes : Plomb-acide, nickel-métal-hydrure (Ni-MH), et lithium fer phosphate (LFP). Les hypothèses et les résultats de consommations obtenus grâce au modèle dans la partie 2 sont résumés dans le tableau 35.

| Chimie de batterie | Poids de batterie | Cycle ARTEMIS Urbain bridé à 45 km/h (Wh/km) | Cycle ARTEMIS Route bridé à 45 km/h (Wh/km) | Conso. retenue comme donnée ACV pour le scénario S1 |
|-----------------------|-------------------|--|---|---|
| Plomb-acide | 200 | 154 | 81 | 111 |
| Nickel-Métal-Hydrure | 114 | 141 | 77 | 103 |
| Lithium Fer Phosphate | 67 | 100 | 60 | 76 |

Tableau 35: Bilan des consommations au réseau obtenues via l'utilisation du modèle pour des VE, 8 kW de batterie

B. Description synthétique des inventaires du cycle de vie des différentes batteries étudiées

Batterie Plomb-acide

L'inventaire pour le cycle de vie de cette batterie est présenté dans l'annexe 10.

Batterie NiMH

Les données relatives au cycle de vie de la batterie NiMH proviennent d'une étude réalisée par Bio Intelligence Service en 2004 [BIO IS, 2004]. Les hypothèses liées à la phase d'usage (rendement, durée de vie, etc) ont été validées par avis d'expert (Dr Torcheux, EDF R&D, 2010).

Batterie LFP

Les données de l'inventaire relatives à la batterie lithium-fer-phosphate ont été fournies par le Dr Torcheux, EDF R&D. Une donnée demeure incertaine : la consommation d'énergie liée à sa production.

Pour préciser cette consommation, une étude bibliographique complète l'inventaire déjà réalisé. Faute de donnée spécifique à la technologie LFP, on a émis l'hypothèse que toutes les batteries de type lithium-ion ont le même coût énergétique. Les résultats sont alors uniquement utilisés pour vérifier leur sensibilité à ce paramètre, par comparaison de valeurs relatives et non absolues.

Les 3 références suivantes proposent des résultats d'ACV de batteries lithium-ion, et plus précisément de lithium-manganèse. On notera « LFP, Scel », les résultats obtenus avec les hypothèses de la source 1, etc. Ainsi :

⇒ **Source 1, Scel** : [HISCHIER, 2007], rapport expliquant l'inventaire du module modélisant les batteries lithium-ion pour les applications mobiles (téléphone portables, ordinateurs...) et disponible dans la base de données ECOINVENT. .

Les données relatives aux énergies consommées pour produire la batterie et utilisées dans le module sont présentées dans le tableau 36.

| Consommable | Quantité / kg de pack de batteries |
|-----------------|------------------------------------|
| Fuel domestique | 15,95 MJ |
| Gaz Naturel | 112,05 MJ |
| Electricité | 41,31 kWh |
| Eau | 346,1 m ³ |

Tableau 36 : Inventaire des consommables par pack de batteries [HISCHIER, 2007]

Enfin, on considère les hypothèses suivantes :

- Les batteries sont produites à 60% en Chine et 40% au Japon [HISCHIER, 2007]. Les modules pour les mix énergétiques sont choisis en conséquence.
 - Les batteries sont importées par bateau vers l'Europe, ce qui représente un trajet moyen de 10 000 km, intégré à l'analyse de sensibilité.
- ⇒ **Source 2, Sce2** : [GAUCH, 2009], étude proposant des résultats d'ACV appliqués au VE. GAUCH, dans son étude, estime ainsi l'impact potentiel de la batterie sur l'effet de serre à 56 g eq. CO₂/kWh. Les hypothèses relatives à l'origine des mix énergétiques utilisés ne sont pas précisées.
- ⇒ **Source 3, Sce3** : [ISHIHARA, 2010], étude présentant les impacts environnementaux des batteries lithium-ion. L'article annonce un impact potentiel sur l'effet de serre à hauteur de 5 kg de CO₂ eq. / kWh de batterie. Cette étude a été réalisée avec des mix énergétiques japonais.

C. Analyse de l'indicateur d'impact potentiel « Effet de serre »

Les résultats obtenus sont présentés figure 45 et tableau 37 :

| | | Résultats obtenus pour l'indicateur effet de serre (en g CO ₂ eq./km) | | | |
|--------------------------------------|--------------------------------|---|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| <i>Chimie de batterie considérée</i> | <i>DV batterie considérées</i> | <i>Cycle de vie VE</i> | <i>Etape de production</i> | <i>Etape d'utilisation</i> | <i>Etape d'élimination</i> |
| <i>Plomb-acide</i> | 2 ans | 33. | 20 | 10 | 3 |
| | 5 ans | 27 | 14 | 10 | 3 |
| <i>NiMH</i> | 8 ans | 30 | 17 | 10 | 5 |
| <i>LFP, Sce1</i> | 10 ans | 58 | 48 | 7 | 2 |
| | 5 ans | 96 | 86 | 7 | 2 |
| <i>LFP, Sce2</i> | 10 ans | 23 | 14 | 7 | 2 |
| | 5 ans | 27 | 18 | 7 | 2 |
| <i>LFP, Sce3</i> | 10 ans | 24 | 15 | 7 | 2 |
| | 5 ans | 29 | 20 | 7 | 2. |

Tableau 37 : Analyse de sensibilité des chimies de batteries pour l'indicateur "effet de serre"

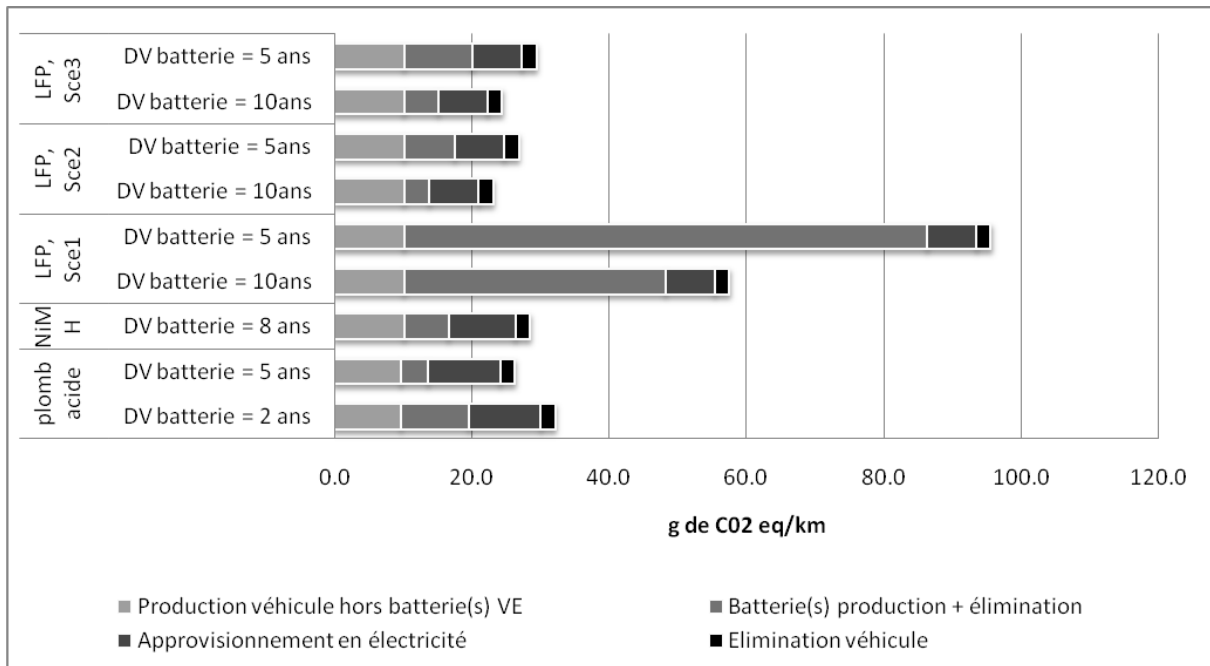


Figure 45 : Analyse de sensibilité des chimies de batteries pour l'indicateur "effet de serre"

Il est possible d'interpréter les valeurs d'impact potentiel sur l'effet de serre de la façon suivante :

- L'impact potentiel de la phase d'utilisation varie avec la chimie de batterie. Par exemple, la différence entre les résultats obtenus pour cette phase pour les batteries LFP et Plomb-acide est de 46%. Elle est liée à la différence de consommation d'électricité au kilomètre, due aux densités énergétiques propres à chaque chimie de batterie. Plus simplement, la batterie Plomb-acide est plus lourde que la batterie lithium ion (même capacité de batterie), et le transport de cette masse supplémentaire induit une surconsommation.
- Le paramètre de consommation d'énergie lors de la phase de production des batteries LFP est important, étant donnée la différence de résultats obtenus selon les 3 différentes sources utilisées. Il concerne à la fois les quantités d'énergie en jeu mais également leur origine. La donnée ECOINVENT date de 2007 et les consommations peuvent être considérées comme surestimées [HELMS, 2010]. Les résultats obtenus avec les données récentes semblent convergents. L'analyse de sensibilité montre l'importance de cette donnée, il faudra donc, lorsque la technologie lithium-ion sera mieux connue, actualiser et approfondir son inventaire,
- Même si on exclut les résultats obtenus avec les données ECOINVENT, l'influence du paramètre « chimie de batterie » sur le cycle du véhicule pour l'indicateur 'Effet de serre' reste importante

3.1.2. Sensibilité au paramètre « DV batterie »

La plupart des études proposant des évaluations de véhicules électriques considèrent la durée de vie de la batterie égale à celle du véhicule [HELMS, 2010], [SIMONS, 2010], [GAUCH, 2009]. Aujourd'hui, pour la technologie lithium en particulier, il n'y a pas de retour d'expérience et on ne peut affirmer avec certitude la durée de vie réelle d'une batterie lithium utilisée dans un véhicule. De plus on sait que cette technologie est en développement, la DV des batteries est donc amenée à évoluer.

Il s'agit ici de vérifier l'influence de ce paramètre sur les résultats. Les résultats obtenus avec les données ECOINVENT (Sce 1, pour source 1) sont exclus, jugées surestimées, et les résultats obtenus pour les véhicules aux batteries LFP (Sce 2, pour source 2) et LFP (Sce 3, pour source 3) pour les durées de vie 5 et 10 ans sont comparés.

L'analyse du tableau 38 montre :

- **pour le VE, batteries LFP Sce 2** : une augmentation de 17% entre les résultats d'impacts potentiels obtenus pour la DV batterie égale à 10 ans et ceux obtenus pour la DV batterie égale à 5 ans. En valeur absolue, la différence est de 4 g de CO₂ eq./km.
- **pour le VE, batteries LFP Sce3** : une augmentation de 21% entre les résultats d'impacts potentiels obtenus pour la DV batterie égale à 10 ans et ceux obtenus pour la DV batterie égale à 5 ans. En valeur absolue, la différence est de 5 g de CO₂ eq./km

Les résultats obtenus pour la batterie Plomb-acide montrent une différence de 22 % entre les différentes durées de vie de véhicules testées (2 et 5 ans).

⇒ Ce paramètre a donc une influence importante sur les résultats d'impacts potentiels sur l'effet de serre lorsque le véhicule est alimenté par un mix électrique français.

3.1.3. Synthèse et perspectives pour les paramètres liés à la batterie

Les résultats obtenus montrent que les différentes chimies de batterie envisagées pour les véhicules électriques considérés ont un impact important sur le bilan effet de serre.

Les durées de vies batteries des technologies matures (Plombs acide - NiMH) sont faciles à appréhender et les résultats montrent que, pour les hypothèses considérées, leur impact potentiel sur l'effet de serre est comparable.

Par ailleurs, le fait que les batteries LFP soient encore en développement complique l'analyse. Il sera important d'actualiser l'inventaire quand aux quantités d'énergies nécessaires à la production des batteries LFP et à leur recyclage. De plus, si la durée de vie de cette technologie n'est pas connue avec certitude, l'analyse de sensibilité a montré le caractère primordial de ce paramètre.

3.2. Sensibilité aux hypothèses liées au VE et son utilisation

Dans l'analyse de cycle de vie présentée, des hypothèses ont été émises quand à la durée de vie kilométrique du véhicule (120 000 km), et le mix électrique considéré (mix France).

Il faut donc vérifier l'influence de ces deux paramètres sur le bilan obtenu pour le cycle du VE étudié.

3.2.1. Sensibilité à la durée de vie kilométrique et calendaire du véhicule

A. Sensibilité à la durée de vie du VE en années

Le paramètre temps en ACV est pris en compte lorsque les composants du produit à évaluer ont une durée de vie qui peut être limitée par celui-ci, indépendamment de tout autre paramètre (usure kilométrique par exemple). Par exemple, pour le VE, la DV des batteries est égale à la DV minimale entre leurs DV cyclique et calendaire. Ainsi, la durée de vie du VE n'a d'influence sur le bilan que lorsque la DV calendaire de la batterie est inférieure à sa DV cyclique.

Le peu d'éléments dont nous disposons aujourd'hui implique un raisonnement basé sur des valeurs moyennes (consommations représentatives d'un usage moyen, profondeurs de décharge moyennes appliquées à la batterie). Malgré les limites de cette approche, on se propose d'essayer, via ces raisonnements simplifiés de la réalité, de dégager des grandes tendances.

Pour le VE équipé d'une batterie Plomb-acide, la durée de vie calendaire du véhicule n'a donc d'influence sur le bilan que lorsque la DV cyclique de la batterie rapportée en année est supérieure à 8. La partie 2 a permis d'identifier que la profondeur de décharge moyenne idéale à appliquer à la batterie Plomb-acide est de 60 %. La durée de vie cyclique de la batterie est alors de 1000 cycles. La consommation au kilomètre du scénario S1 permet dans ces conditions, et d'après le modèle, une autonomie de 40 kilomètres par cycle, et donc de 40 000 kilomètres par batterie. Le paramètre « DV du véhicule » n'intervient alors que lorsque l'utilisateur réalise moins de 40 000 km en 8 ans (ce qui, s'il roule de manière régulière, équivaut à moins de 14 km / jour). Ainsi, on considère que la durée de vie du véhicule en années influe peu sur les impacts potentiels de ce véhicule.

Pour les VE avec batterie LFP ou NIMH, la durée de vie de la batterie est toujours la durée de vie calendaire, soit de l'ordre de 8 ans (cf. partie 2). Pour évaluer l'influence de la durée de vie du véhicule lorsqu'ils sont équipés de ces technologies de batteries, l'exercice est réalisé sur le VE, batterie NiMH. La durée de vie kilométrique est fixée à 120 000 km, et l'impact potentiel sur l'effet de serre est calculé pour les DV de véhicule égale à 10, 15 et 20 ans. Pour cet exercice, on considèrera le nombre de batteries à utiliser tel que par exemple, pour DV véhicule égale à 10 ans, le nombre de batteries à considérer est $10/8 = 1.25$.

Les résultats de cette analyse de sensibilité sont présentés figure 46.

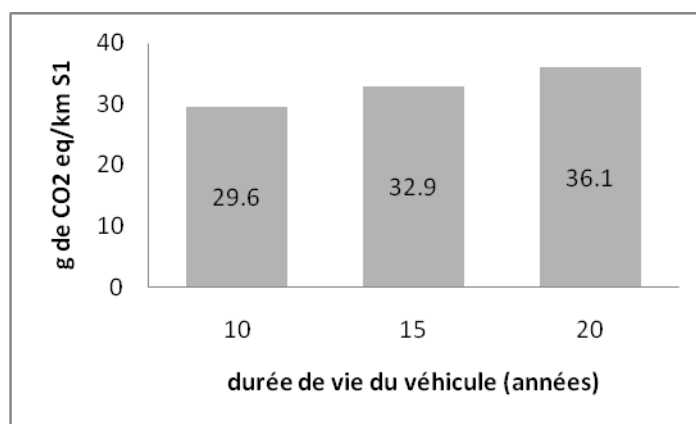


Figure 46 : Influence de la DV calendaire du VE avec batterie NiMH, pour l'indicateur effet de serre

Le bilan Effet de serre augmente avec la durée de vie du véhicule (il est augmenté de près de 11 % tous les 5 ans). En fait, indépendamment du nombre de kilomètres parcourus et du niveau de consommation lié au trafic et au comportement de conduite, la batterie devra être remplacée tous les 8 ans. Etant données la DV cycliques importante de ces batteries, les véhicules qui en sont équipés sont plus adaptés pour un nombre de kilomètre parcourus important, et sont moins sensible à l'usage que les VE équipées de batteries Plomb-acide.

B. Sensibilité à la durée de vie kilométrique

La partie 2 a montré que le paramètre « durée de vie kilométrique » était difficile à fixer compte tenu du fait que l'on ne connaît pas encore les usages futurs. Il s'agit donc ici d'évaluer l'influence de ce paramètre sur le résultat final.

Soit la durée de vie du véhicule fixée à 10 ans, et une répartition égale des kilomètres parcourus le long de cette durée de vie. Différentes durées de vie kilométriques sont testées, sans être forcément réalistes : il s'agit d'évaluer la sensibilité de ce paramètre. Il va impliquer la modification du **nombre**

de batteries à produire et à éliminer pour la durée de vie du VE. En effet, augmenter le kilométrage annuel signifie également augmenter le nombre de charges/décharges imposées à la batterie et donc en diminuer la durée de vie en années.

Le tableau 38 présente les données d'inventaire modifiées pour réaliser l'analyse de sensibilité et les résultats obtenus pour chaque durée de vie kilométrique testée.

| Durée de vie en km du Véhicule | Nombre de batteries à produire et recycler | Impact potentiel sur l'Effet de serre (g de CO₂ eq./km) |
|---------------------------------------|---|---|
| 50 000 | 1.25 | 43 |
| 100 000 | 2.5 | 32 |
| 150 000 | 3.75 | 28 |
| 200 000 | 5 | 27 |
| 300 000 | 7.5 | 25 |

Tableau 38 : Influence de la DV kilométrique sur l'indicateur effet de serre pour le VE batteries Plomb-acide

Les résultats obtenus sont présentés dans la figure 47. Plus la durée de vie kilométrique considérée est grande, plus l'impact du véhicule sur l'effet de serre est faible. Il s'agit d'utiliser le véhicule suffisamment pour amortir les émissions liées à la construction du véhicule et de ses batteries.

- ⇒ **Pour le VE équipé de batteries Plomb – acide** : si l'on considère des durées de vie réalistes pour ce type de véhicule; entre 100 000 et 150 000 kilomètres parcourus, alors la différence de bilan entre ces deux bornes est de 14%.
- ⇒ **Pour le VE équipé de batteries NiMH** : Entre 100 00 et 150 000 km parcourus, la différence de bilan entre les deux bornes est de 31%.

Cette différence est liée aux performances des différentes technologies de batterie. La technologie NiMH ayant une durée de vie cyclique supérieure, le renouvellement des batteries est peu lié au nombre de kilomètres parcourus. En conclusion, pour un utilisateur parcourant un nombre de kilomètres annuels important, un VE équipé de batterie NiMH ou Lithium sera plus intéressant pour le bilan Effet de serre du véhicule.

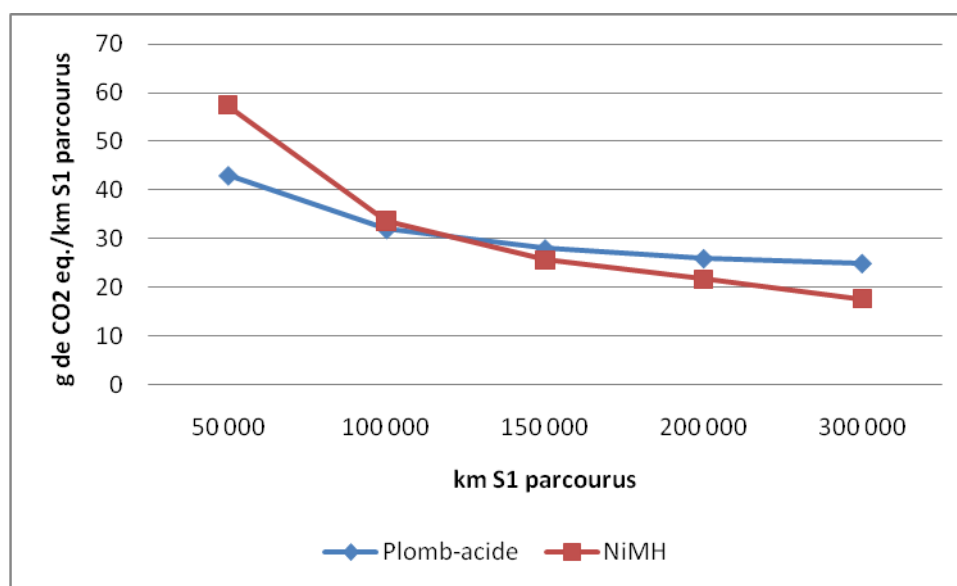


Figure 47 : Influence du paramètre DV kilométrique sur les bilans à effet de serre des VE NiMH et Plomb-acide

3.2.2. Synthèse

La durée de vie calendaire est peu influente pour les véhicules équipés de batteries dont la DV limitante est la DV cyclique (Plomb-acide). Pour les autres (équipés de NiMH, Lithium...), ce paramètre est plus influent. Pour la batterie NiMH, l'impact potentiel sur l'effet de serre est augmenté de près de 11% tous les 5 ans de vie supplémentaire du VE.

La durée de vie kilométrique influe sur les bilans de VE équipés de toutes technologies de batteries : Toutefois, l'incidence de ce paramètre est plus importante sur les batteries à DV calendaire prédominante, car il y a moins de batteries à produire et éliminer sur le cycle du véhicule. Pour le scénario testé et pour l'indicateur effet de serre, le bilan obtenu est favorable à la batterie Plomb-acide lorsque le véhicule a une durée de vie inférieure à 100 000 km, et devient défavorable au-delà.

Ces conclusions plaident pour un choix de la chimie de batterie d'un VE en fonction de la fréquence d'utilisation et de l'usage (trafic et comportement de conduite) qu'en fera le futur utilisateur

3.2.3. Sensibilité liée au mix énergétique utilisé lors de la phase d'usage

Différents mix électriques peuvent être utilisés : mix électriques spécifiques à la production d'un pays (actuels, ou prospectifs), mix électrique à vocation commerciales (offres vertes, ou spécifiques à un usage).

Pour vérifier l'influence de ce paramètre, les mix électriques de différents pays seront utilisés à la place du mix français pour alimenter les véhicules. Les modules ECOINVENT utilisés dans cette étude, tiennent compte des pertes en ligne sur le réseau de distribution. Le tableau 39 présente les contributions (en %) des différents moyens de production d'électricité pour différents pays européens. Les données datent de 2000, elles sont issues du rapport ECOINVENT n° 5 [DONES, 2007].

| | Fossiles | Déchet | Hydraulique | Renouvelables | Nucléaire | Importation |
|-----------------|----------|--------|-------------|---------------|-----------|-------------|
| Irlande | 93.4 | | 5 | 1.5 | 0 | |
| Grèce | 87.7 | 0.3 | 7.8 | 0.9 | 0 | 3.3 |
| Suède | 3.2 | 0.2 | 48.6 | 2.5 | 34.2 | 11.4 |
| Grande Bretagne | 71.9 | 0 | 2 | 1.4 | 20.9 | 3.8 |
| Allemagne | 56.8 | 0.5 | 4.4 | 1.8 | 27.7 | 8.7 |
| Pologne | 94.4 | 0.2 | 2.9 | 0.2 | 0 | 2.3 |
| France | 8.9 | 0.4 | 13.6 | 0.4 | 75.9 | 0.9 |

Tableau 39: Contribution des différents moyens de production pour la production électrique de différents pays européens [DONES, 2007]

Les résultats obtenus, pour différents mix européens, sont interprétés sur le plan des impacts potentiels « l'effet de serre » et « acidification de l'atmosphère », respectivement figures 48 et 49. L'impact potentiel du VCI équivalent est ici représenté par une droite verticale, pour permettre une comparaison.

Dans les analyses de sensibilité effectuées ici, les véhicules considérés (VE comme VT) sont toujours construits en France, utilisant des mix énergétiques nationaux. Il convient de signaler que les résultats auraient été différents si on avait également fait varier les mix énergétiques de la phase de production.

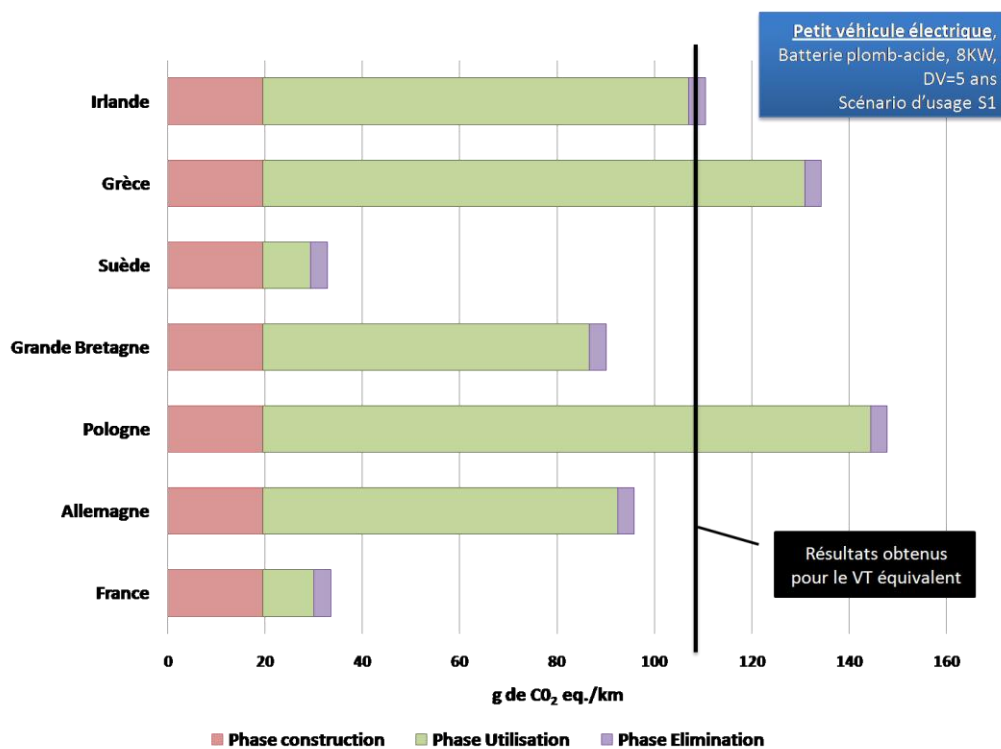


Figure 48 : Influence du mix électrique sur les résultats obtenus pour l'indicateur effet de serre

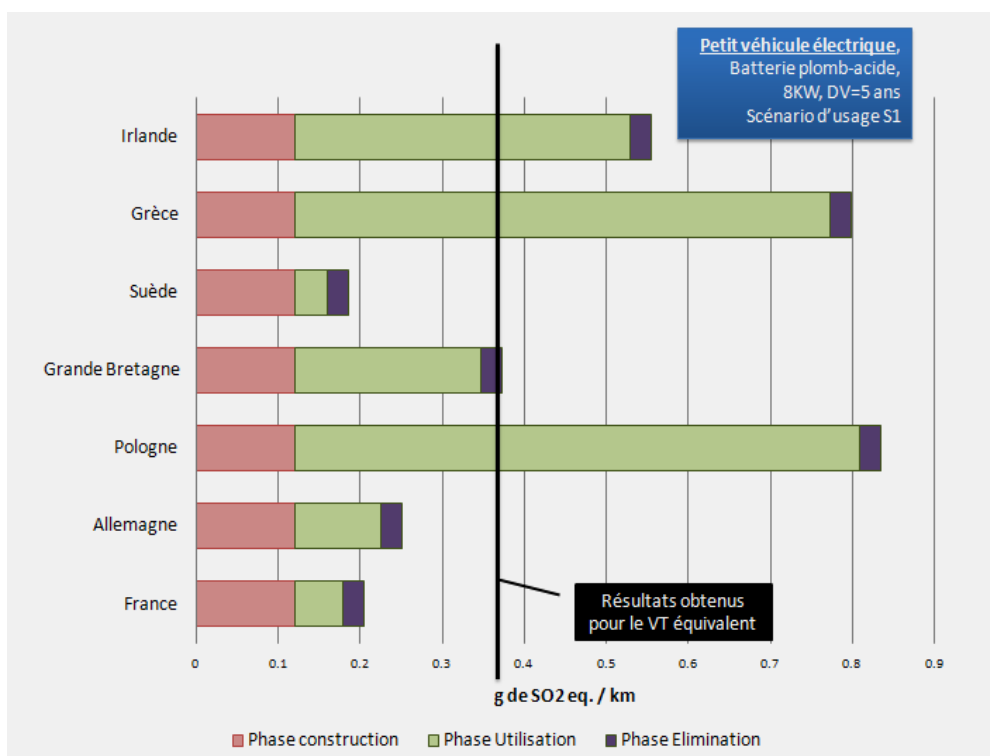


Figure 49 : Influence du mix électrique sur les résultats obtenus avec l'indicateur « Acidification de l'atmosphère »

Les résultats obtenus pour chacun des indicateurs montrent que le paramètre « mix électrique » est primordial. Par exemple, le VE utilisé en Suède (qui produit l'essentiel de son électricité via des centrales hydrauliques et nucléaires cf. tableau 39) présente un impact potentiel 4.5 fois moindre sur l'effet de serre que s'il est utilisé en Pologne qui produit l'essentiel de son électricité via la combustion de charbon (cf. tableau 39).

Par ailleurs, il apparaît également que les bilans obtenus pour l'impact effet de serre comme sur l'acidification de l'atmosphère ne sont pas toujours favorables au VE.

Enfin, ce paramètre est susceptible de modifier la répartition de la contribution de l'indicateur entre les différentes étapes du cycle de vie et l'étape prépondérante. Ainsi, le véhicule utilisé dans un pays au mix peu carboné (mix français, et suédois) aura comme étape prépondérante celle de production, tandis qu'un pays au mix plus carboné (mix grec ou mix polonais) aura comme étape prépondérante celle d'utilisation.

3.2.4. Synthèse et conclusion

Le choix du mix électrique est primordial pour le bilan environnemental du VE. Par exemple, selon le mix choisi, la comparaison des résultats obtenus pour le VE et le VCI sur les indicateurs effets de serre et acidification de l'atmosphère n'est pas toujours favorable au VE.

Les durées de vie du véhicule, en années et en kilomètres sont des paramètres dont l'influence est moindre. Toutefois, ils deviennent importants lorsque le mix considéré est peu carboné.

3.3. Sensibilité liée à l'usage du véhicule

3.3.1. Objectif

Comme montré dans la partie 2, les usages (trafic et comportement de conduite) influencent la consommation du véhicule. Il s'agit ici d'évaluer la sensibilité des résultats des ACV à ce paramètre.

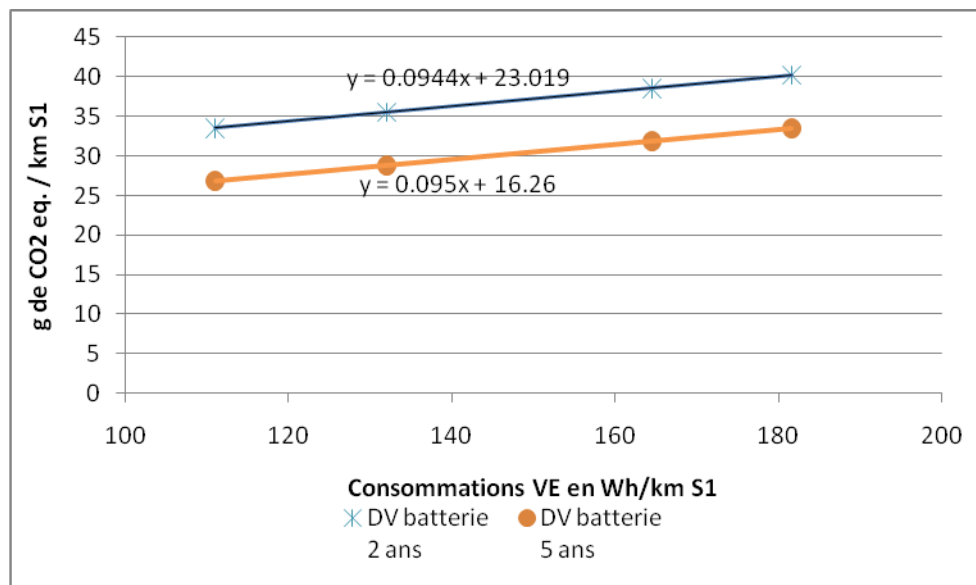


Figure 50 : Influence de la consommation sur l'impact potentiel sur l'effet de serre

Les données de consommations utilisées seront obtenues grâce au modèle présenté à la partie 2. La figure 50 montre que l'impact potentiel du véhicule sur l'effet de serre augmente de manière linéaire avec le paramètre consommation.

Pour évaluer la sensibilité du VE étudié au paramètre consommation, il faut déterminer la plage de ses consommations possibles. Celles-ci dépendent de ce que l'on a défini comme « scénarios d'usage » (proportion d'usage urbain, route, et autoroute), variables selon les usagers, mais aussi des 'surconsommations' liées à l'usage des auxiliaires.

3.3.2. Sensibilité aux différents scénarios d'usage

Le seul scénario évalué jusqu'à présent est S1, défini dans la partie 2. L'exercice ici consiste à faire varier les proportions d'usage urbain et routier pour déterminer la plage des consommations possibles.

La figure 51 présente les résultats de consommations obtenus en Wh/km. L'abscisse exprime la proportion de conduite urbaine en %.

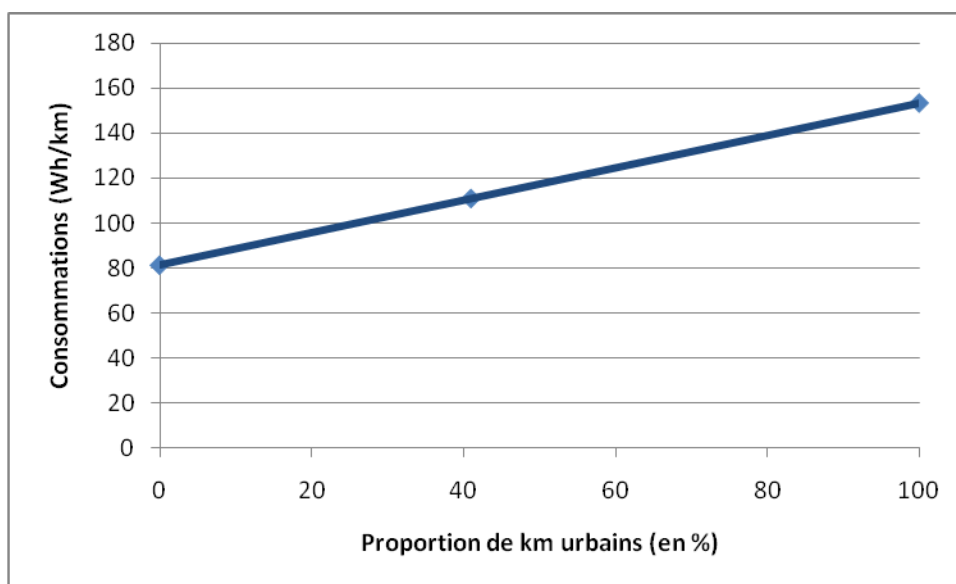


Figure 51 : Influence de la proportion de km urbain sur la consommation de VE

En considérant l'ensemble des scénarios possibles, la consommation est comprise entre 81 et 153 Wh/km.

D'autre part, la figure 52 présente l'influence du scénario d'usage sur l'impact potentiel Effet de serre pour le VE et le VCI. Comme dans la figure précédente l'abscisse est exprimée en proportion de kilomètres urbains.

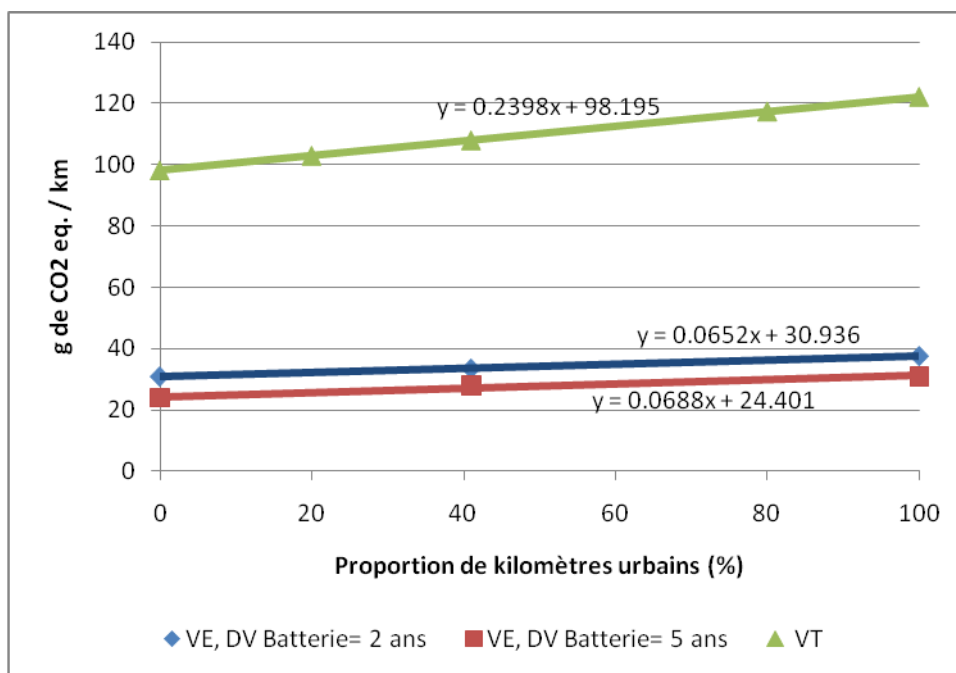


Figure 52 : Influence du scénario d'usage sur l'impact potentiel sur l'effet de serre pour VE et VCI

La conduite urbaine étant plus énergétivore que la conduite sur route, plus l'usage est urbain, plus le bilan 'effet de serre' du kilomètre parcouru est important. En progressant de 0% à 100% de proportion de kilomètres urbains, on constate une augmentation du bilan effet de serre de 22% à 29% selon la DV de batterie pour le VE et de 24% pour le VCI. Si on considère l'augmentation en valeur absolue, elle est respectivement de +7 g eq. CO₂/km pour le VE et +30 g eq. CO₂/km pour le VCI.

Le coefficient directeur de la droite représentant l'impact potentiel du VCI est de l'ordre de 3 fois celui de la droite présentant l'impact potentiel du VE. Le véhicule électrique est donc moins sensible aux scénarios d'usage et plus avantageux en mode rural. Il faut ici souligner encore que ces résultats sont spécifiques du petit véhicule sans permis limité à 45 km/h, ce qui limite considérablement la dynamique de conduite (caractéristiques de vitesse, accélérations, etc.). Les résultats obtenus pour un véhicule plus conventionnels seraient donc différents.

3.3.3. Influence de l'utilisation des auxiliaires

Il reste à évaluer l'influence sur le bilan d'Effet de serre de la surconsommation d'électricité lors de la phase d'usage liée à l'utilisation des auxiliaires. L'air conditionné (puissance estimée à 1 kW) est de loin celui qui consomme le plus. Aussi, on admet que pour le VE étudié, la consommation maximale est celle obtenue pour un usage exclusivement urbain, roulant avec l'air conditionné. Le modèle évalue alors cette consommation à 234 Wh/km.

La plage de consommations à considérer pour évaluer la sensibilité de nos résultats aux paramètres « consommation » est donc : **81 et 234 Wh/km.**

Pour calculer le plus faible impact potentiel, sera considérée la valeur obtenue pour 81.3 Wh/km de consommation et pour la durée de vie de batterie égale à 5 ans.

Pour calculer l'impact potentiel le plus fort, sera considérée la valeur obtenue pour 233.6 Wh/km de consommation et pour la DV de batterie égale à 2 ans.

- ⇒ **On obtient alors un impact potentiel sur l'effet de serre compris entre 24 g et 45 g de CO₂ eq. /km. Entre les niveaux de consommations étudiées, l'impact potentiel a été multiplié par 1.8. La sensibilité au paramètre est donc confirmée.**

3.3.4. Conclusion et synthèse

Les analyses de sensibilité à l'usage (trafic et comportement de conduite), montrent l'influence du paramètre consommation sur le bilan effet de serre du VE.

Il est important de noter que la plupart des VE atteindront des vitesses maximales bien supérieures, et permettront une palette d'usages bien plus large (ils pourraient être utilisés sur autoroute notamment), la variabilité des consommations sera alors plus importante. Il faut ajouter que dans le cas des véhicules électriques, ce paramètre est d'autant plus important qu'il influe sur l'autonomie du véhicule, plus limitée que celle du véhicule thermique.

Le paramètre consommation énergétique lors de l'usage du véhicule est donc un paramètre essentiel, qui implique une réflexion systématique sur les usages possibles des véhicules à évaluer.

3.4. Conclusion relatives aux analyses de sensibilités

Les analyses de sensibilités permettent de confirmer les paramètres clés de l'analyse.

Les paramètres dont l'influence est déterminante sont liés à la phase d'utilisation du véhicule.

- ⇒ **Le mix électrique** : L'impact potentiel sur l'effet de serre du VE étudié rechargé dans le pays possédant le mix électrique le plus carboné d'Europe est 5 fois celui du même véhicule rechargé dans le pays dont le mix est le moins carboné.
- ⇒ **La consommation** : Après avoir déterminé les bornes minimales et maximales de consommations d'énergie lors de l'utilisation des véhicules en considérant tous les scénarios d'usage possibles, l'étude révèle qu'entre ces bornes le bilan effet de serre peut être multiplié par 1.8.

Les autres paramètres évalués : chimie de batterie, durée de vie calendaire et kilométrique du véhicules ont également une incidence non négligeable sur le bilan effet de serre lorsque le véhicule est évalué pour une utilisation dans un pays dont le mix électrique est peu carboné. L'étude a en particulier montré qu'ils l'étaient dans le cas du VE utilisé en France.

Toutefois, l'influence de l'ensemble de ces paramètres influençant les phases de production et d'élimination du véhicule, est à relativiser. En effet, l'utilisation d'un mix électrique très carboné pour la recharge du VE est susceptible d'écraser leur incidence.

Ainsi, on peut classer les paramètres par ordre d'influence :

- Paramètres d'ordre 1 : Ce sont les paramètres les plus influents. En faisant varier leurs valeurs, le bilan effet de serre du VE peut varier de plus de 50 %. Ils sont au nombre de deux : mix énergétique et consommation du véhicule.
- Paramètres d'ordre 2 : Ils sont sensibles lorsque le mix considéré est peu carboné, comme c'est le cas en France. Ils sont : la chimie de batterie, les durées de vie calendaires et kilométriques du VE.

Les études de sensibilité ont également permis de montrer que pour obtenir le meilleur bilan environnemental possible, la chimie de batterie à utiliser varie selon la fréquence d'utilisation du véhicule.

Conclusion

Le contexte actuel semble favorable à l'essor de solutions alternatives aux véhicules à combustion interne, visant à la fois à limiter l'épuisement des énergies fossiles et l'émission de polluants atmosphériques locaux et GES. En particulier, le véhicule électrique est présenté comme une possibilité séduisante, de par le rendement de sa chaîne de traction, l'absence d'émissions à l'échappement, etc. Il convient donc d'en évaluer les avantages et inconvénients.

Ce mémoire de thèse de doctorat s'intéresse à l'application de la méthodologie « Analyse de Cycle de Vie » au véhicule électrique, l'**objectif étant la mise en évidence des paramètres clés du bilan environnemental de ce dernier**. De plus, ces travaux proposent une première comparaison de ses performances environnementales avec celles du véhicule à combustion interne. Ainsi, l'unité fonctionnelle doit être choisie de manière à permettre la comparaison entre différentes technologies de véhicules, et donc traduire le même « service rendu ». Or, compte tenu de leurs caractéristiques spécifiques (autonomie, temps de recharge, etc.), les véhicules électriques correspondront probablement à des utilisations différentes de celle des véhicules à combustion interne. Il est donc nécessaire de spécifier l'usage évalué dans l'unité fonctionnelle.

L'application de l'ACV au VE présente certaines difficultés, liées en grande partie au caractère émergent de ces véhicules et au peu de retours d'expérience disponibles (peu de données existantes, et qualité insuffisante de celles-ci).

L'objectif fixé nécessite donc en premier lieu la création de jeux de données robustes.

Pour ce faire, une approche a dû être développée pour contourner les difficultés liées au manque de données fiables constaté dans la littérature existante (consommation et durée de vie des batteries principalement). Elle repose notamment sur la combinaison d'une approche spécifique au monde du transport (test de véhicules sur banc à rouleau), de la définition de scénarios considérant les caractéristiques présentes et futures des batteries, et de l'exploitation des fonctionnalités de l'outil ACV pour évaluer la sensibilité d'un paramètre selon différents scénarios (chimie de batteries et usages). Pour la détermination de données de consommation de VE, un modèle simplifié a été construit sur les principes de la dynamique. Ce modèle permet l'estimation des consommations selon

les caractéristiques du véhicule et l'usage qui en est fait (comportement de conduite et trafic). Différents scénarios, relatifs à la durée de vie des batteries et à l'usage du véhicule ont été bâtis.

Le jeu de données ainsi obtenu à partir de ce banc d'essai a permis la constitution de l'inventaire du cycle de vie de référence pour le véhicule étudié et la spécification d'une typologie d'usages dans l'unité fonctionnelle.

Les résultats obtenus confirment que le bilan effet de serre global du véhicule électrique est particulièrement intéressant lorsque la recharge est réalisée avec un mix électrique peu carboné. Avec les mix électriques de certains pays d'Europe, le véhicule à combustion interne peut même présenter des impacts potentiels effet de serre et acidification inférieurs.

La comparaison avec un véhicule à combustion interne équivalent, selon les mêmes hypothèses, est favorable au véhicule électrique pour l'ensemble des impacts potentiels étudiés (effet de serre, acidification, épuisement des ressources). La répartition de la contribution des différentes étapes varie aussi puisqu'il a été montré que la phase d'utilisation est prépondérante pour le véhicule à combustion interne (89 à 91% selon l'impact potentiel considéré).

Avec les hypothèses de l'étude (véhicule équipé de batteries plomb-acide produit, assemblé et utilisé en France), la contribution de la phase de production aux impacts potentiels étudiés est prépondérante (50 à 60 % selon les impacts et la DV des batteries) quel que soit l'indicateur étudié : effet de serre, acidification de l'atmosphère, épuisement des ressources naturelles, eutrophisation, smog photochimique et destruction de la couche d'ozone

Les études de sensibilité menées sur ce cas concret révèlent deux paramètres primordiaux : le **mix électrique** et **l'usage moyen du véhicule** défini par le trafic et le comportement de conduite (usage des auxiliaires, etc.). La prépondérance de ces paramètres sera probablement accrue lorsqu'il s'agira d'évaluer des véhicules électriques plus polyvalents, et plus lourds (berlines, utilitaires légers, etc).

Les paramètres « **chimie de batterie** », « **durée de vie de batterie** », « **durée de vie kilométrique du véhicule électrique** » et « **durée de vie du véhicule en années** » apparaissent de second ordre. Leurs incidences respectives en termes de proportion dépendent toutefois des hypothèses de l'étude : par exemple, leurs incidences sur l'indicateur effet de serre restent faibles si le véhicule est rechargé avec un mix carboné mais deviennent significatives lorsque la recharge est effectuée avec un mix électrique peu carboné (cas du mix électrique français). Ainsi, si l'on considère que le VE utilise les mix électriques nationaux actuels, l'étape de production du véhicule contribue de 13 à 61 % à l'indicateur effet de serre selon le pays européen considéré.

Enfin, la diversité des véhicules électriques est importante (chimie et capacité de batterie, taille et donc masse du véhicule, etc.) et l'outil ACV tel qu'il a été utilisé dans ce mémoire peut permettre de dégager les usages les plus pertinents à chacun des modèles évalués. Par exemple, il a été montré qu'un utilisateur dont le kilométrage annuel est faible et qui n'a pas besoin de beaucoup d'autonomie, a intérêt, du point de vue effet de serre, à opter pour un véhicule équipé de batteries Plomb-acide. A l'inverse, pour un conducteur dont le kilométrage annuel est important, une chimie de batterie à durée de vie cyclique plus importante (Lithium-ion, Ni-MH) est plus pertinente.

Limites de l'approche

Les travaux de recherche identifient la sensibilité des résultats aux scénarios d'usage (trafic et comportement de conduite) et au mix électrique alimentant le véhicule lors de la phase d'usage. Or, ces deux paramètres pourraient être difficiles à appréhender dans un avenir proche, car dépendants à la fois des politiques mises en œuvre pour utiliser le VE (politiques de transports, politiques fiscales, etc.), de leur appropriation par les citoyens, et des politiques énergétiques menées (mix prospectifs, offres vertes, smart grid, etc.). Réduire l'incertitude de ces paramètres est donc difficile, et seule une approche par scénario est possible.

Par ailleurs, il conviendra de compléter ces travaux par la prise en compte de l'entretien des véhicules et celles des infrastructures dans le périmètre de l'étude.

Perspectives

La spécification de l'usage dans l'unité fonctionnelle apparaît essentielle, au vu de la sensibilité des résultats obtenus aux différents scénarios d'usage. Celle-ci impose l'obtention de données représentatives de consommations / émissions spécifiques à chaque usage retenu (mode de conduite, trafic, comportement de conduite etc.). Par ailleurs, elle peut permettre une meilleure appréhension des impacts locaux des véhicules. En effet, s'il est vrai que les limites géographiques entre « villes », « routes » et « autoroutes » sont floues, il reste que caractériser les usages implique également une caractérisation de l'espace. Cette spécificité sera exploitée en perspective de la thèse pour développer

Conclusion

une approche permettant la prise en compte des impacts locaux (émissions à l'échappement et hors échappement).

De nouveaux comportements de mobilité (auto-partage, multi-modalité) devraient s'imposer avec l'épuisement du pétrole et la prise de conscience environnementale. Par ailleurs, toute solution alternative au véhicule à combustion interne doit être explorée. L'outil ACV tel qu'il a été mis en œuvre dans cette recherche, évaluant des scénarios via des analyses de sensibilité, et associé à une approche dynamique faisant appel à des outils spécifiques du transport (cycles, expérimentation, etc.) et à la contribution d'experts pourrait permettre l'évaluation crédible de ces alternatives et l'identification de leurs usages les plus pertinents au regard des considérations environnementales. Ainsi, l'évaluation de ces alternatives, pourrait permettre de passer de l'échelle du système « véhicule » à celle de « flotte de véhicules », et conduire à la comparaison de différents scénarios de pénétration des VE sur le marché, ou encore, à une meilleure appréhension des solutions de mobilité au regard de l'environnement.

Références bibliographiques

ANDRÉ M., Real world driving cycles for measuring cars polluting emissions, Part A: The Artemis European driving cycle, 2004, Bron : Report INRETS-LTE 0411, 97 pages

ANDRÉ M. , The Artemis European driving cycles for measuring car pollutant emissions, 2004, Science of the Total Environment, Volumes 334-335, December 1st 2004, p. 73-84

ALLIAPUR, Analyse du cycle de vie pour 9 voies de valorisation des pneus usagés non réutilisables, 2010, Alliapur, 8 p.

ANTOINE L. et al, Evaluation du bilan en émissions de gaz à effet de serre d'un autobus pile à combustible, 2003, Ministère de l'Équipement - Direction de la Recherche Recherche et des Affaires Scientifiques. Bron, France: INRETS, Rapport LTE0330, ISRN INRETS/RR/03-554-FR, 226 pages.

ANTOINE L. et al, Greenhouse Gas Balance: FC vehicles vs. Conventional vehicles, What are the conditions for success?, 2003, EVS 20 - The 20th international electric vehicle symposium, Long Beach, California, USA, November 15-19, 23 p.

ARTECONI A. et al, Life-cycle greenhouse gas analysis of LNG as a heavy vehicle fuel in Europe, 2009, Applied energy, 9 p.

AXSEN J. et al, Batteries for plug-in Hybrid Electric Vehicles (PHEVs): Goals and the states of technology circa 2008, 2008, Institute of transportation studies university of California, Davis CA, 26 p.

BADIN F, L'électrification du transport routier, 2009, Panorama IFP, 8 p.

BEER T. et Al, Life-Cycle Emissions Analysis of Fuels for Light Vehicles, 2004, Report to the Australian greenhouse office, , 125p .

BIO INTELLIGENCE SERVICE, Mission de collecte de données sur la production de 4 types de batteries, 2004, Bio Intelligence Service, 18 p.

BJOKLUND A, Survey of Approaches to Improve Reliability in LCA, 2002, International Journal of LCA, Volume 7(2), pp. 64-72

- BOIZE M. et al, Pertinence de l'analyse de cycle de vie pour l'évaluation des impacts sanitaires : comparaison avec l'évaluation quantitative des risques sanitaires (EQRS), 2008, Environnement, Risques & Santé, Vol. 7, juillet-août 2008, 13 pages
- BOUREIMA F-S. et al, Comparative LCA of electric, hybrid, LPG and gasoline cars in Belgium context, 2009, EVS24 - International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium, Stavanger - Norway, May 13-16, 2009, 8 pages
- CABAL C. et al, Rapport sur la définition et les implications du concept de voiture propre, 2005, Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques - Sénat, 364 pages
- CAPLAIN I, Mesures des émissions polluantes automobiles – Application à la modélisation eulérienne 3D de la formation des oxydants photochimiques dans la troposphère, 2005, Mémoire de thèse, USTL
- CONTADONI J-F. et al, Life Cycle Assessment of fuel Cell Vehicles, 2003, International Journal of LCA, Volume 8, Number 3 / mai 2003, p. 179-180
- DE GUIBERT A, Le stockage d'énergie dans les transports, 2009, SAFT - Présentation,
- DOKA G, Ecoinvent report n° 13: Life Cycle Inventories of waste treatment services, 2009, Swiss centre for life cycle inventories, 102 p.
- DONES R et al, Ecoinvent report n° 5: Life Cycle Inventories of Energy systems : Results for Current Systems in Switzerland and other UTCE Countries, 2007, Swiss centre for life cycle inventories, 175 p.
- EURELECTRIC, Statistics and prospects for the European electricity sector (1980-2000, 2004, 2005, 2006, 2010-2030), EURPROG 2008, 2009, Eurelectric, 174 p.
- European Council of Automotive Research, Project report "Life Cycle Analysis - Data and technologies", LCA, Final report, 1996, EuCAR, 36 p.
- FRISCHKNET R, Environmental assessment of the future technologies: how to trim to fit his goal?, 2009, International Journal of LCA, Volume 14, Number 6 / septembre 2009, p. 584-588
- FRISCHKNET R. et al, Life cycle Assessment for emerging technologies: Case studies for photovoltaic and wind power, 2005, International Journal of LCA, Volume 10, Number 1 / janvier 2005, p. 24-34
- FRISCHKNET R. et al, The ecoinvent database: Overview and Methodological Framework, 2005, International Journal of LCA, Volume 10(1) pp. 3-9

-
- FUNTOWITCZ S. O. et al, Uncertainty and quality in science for policy. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1990. 229 pp
- GAUCH M. et al, Life Cycle Assessment LCA of Lithium-Ion batteries for electric vehicles presentation, 2009, Empa - Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research, TSL Technology and Society Lab,
- HELMS H. et al, Electric vehicle and plug-in hybrid energy efficiency and life cycle emissions, 2010, 18th Internal Symposium, Transport and Air Pollution, Proceedings, 12 p.
- HISCHIER R. et al, Ecoinvent report n°18, part V: Disposal of electronic and electric equipment, Electronics Modules, part 2, 2007, Swiss centre for life cycle inventories,
- HISCHIER R. et al, Multifunctional Electronic Media - Traditional Media: The problem of an Adequate Functional Unit, 2003, International Journal of LCA, Volume 8, Number 4 / July 2003, p. 201-208
- HUGREL C. et al, Transport routier - Parc, usage, et émissions des véhicules en France de 1970 à 2025, 2004, INRETS, 133 p.
- HUIJBREGTS M. et al, Including Human Health Damages due to Road Traffic in Life Cycle Assessment of Dwellings, 2006, International Journal of LCA, Volume 11, Supplement 1 / janvier 2006, p. 64-71
- ISHIHARA K. et al, Environmental Burdens of Large Lithium-Ion - Batteries developed in Japanese National Project, 2002, 202nd Meeting of the Electrochemical Society, 1 p.
- ISO Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadre. ISO 14040. 2006, 33 p.
- ISO Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Exigences et lignes directrices. ISO 14044. 2006, 59 p.
- JOLLIET O. et al, Analyse du cycle de vie : Comprendre et réaliser un écobilan, 2005, Presses polytechniques et universitaires romandes,
- JOUMARD R. et al, Influence du cycle de conduite sur les émissions unitaires de polluants des voitures particulières, 1999, Rapport, INRETS, 122 p.
- KALHAMMER F-R. et al, Plug-In Hybrid Electric Vehicles: Promise, Issues and Prospects, 2009, EVS24 - Norway, May 13-16, 2009, 11 p.

Références bibliographiques

LABOUZE E. et al, Rating the data quality in life-cycle approach in automotives LCA. Proceeding of the 6th SETAC Europe Annual Meeting, 19-22 may 1996 (Italy)

LE BORGNE R. et al, Analyse du cycle de vie - Application dans l'industrie automobile, Techniques de l'ingénieur, 1998, 10 p.

LE BORGNE R, De l'usage des analyses de cycle de vie dans l'industrie automobile, 1998, Mémoire de thèse, ENSAM,

LE CORFEC Y, Polluants réglementés et non réglementés du transport, 2007, Etude interne, EDF R&D, 61 p.

LENSCHOW P. et al, Some ideas about the sources of PM₁₀, 2001, Atmospheric Environment, V35 pp 23-33

LEROY Y. , Développement d'une méthodologie de fiabilisation des prises de décisions environnementales dans le cadre d'analyses de cycle de vie basée sur l'analyse et la gestion des incertitudes sur les données d'inventaires, 2009, Mémoire de thèse, ENSAM,

LIAW B-Y. et al, From driving cycle analysis to understanding battery performance in real-life electric hybrid vehicle operation, 2007, Journal of Power Sources, Hybrid Electric Vehicles volume 174, Issue 1, p. 76-88

MOCK P. et al, Electric Vehicle - A model based assessment of future market prospects and environmental impacts, 2009, EVS24 - Norway, May 13-16, 2009, 14 p.

MULLER-WENK R, A method to include in LCA Road Traffic Noise and its health effects, 2004, International Journal of LCA, Volume 14, Number 6 / September 2009, p. 560-570

NOTTER D. A. Et al, Contribution of lithium-ion batteries to the environmental impact of Electric Vehicles, Environmental, science & technology, 2010, 44(17), pp 6550-6556

OCDE, Voitures propres - Stratégies pour des véhicules peu polluants, 2004, OCDE, 231 p.

PETERSEN J., Lithium-ion batteries : 9 years of price stagnation, 2009,

<http://seekingalpha.com/article/129570-lithium-ion-batteries-9-years-of-price-stagnation>

PRÉ CONSULTANT B.V. commissioned by the European car tyre manufacturers, Life Cycle assessment of an average European car Tyre, 2001, Pré Consultant B.V. commissioned by the European car tyre manufacturers,

- QUEROL X. et al, Speciation and origin of PM₁₀ and PM_{2.5} in selected European cities, 2004, Atmospheric Environment, V38 (38) pp 6547-6555
- RANTIK M, Life cycle Assesment of Five Batteries foir Electric Vehicles under different charging regimes, 1999, KFB (The Swedish Transport and Communications Research Board), 54 p.
- REAP J. et al, A survey of unresolved problems in life cycle assessment, Part 1: goal and scope and inventory analysis, 2007, International Journal of LCA, Volume 13, Number 4 / June 2008, p. 290-300
- REAP J. et al, A survey of unresolved problems in life cycle assessment, Part 2: impact assessment and interpretation, 2007, International Journal of LCA, 13(5), 2008, p.374-388
- REGLEMENT (CE) N° 443/2009 du Parlement et du Conseil du 23 avril 2009 établissant les normes de performances en matières d'émissions pour les voitures particulières neuves dans le cadre de l'approche intégrée de la communauté visant à réduire les émissions de CO₂ des véhicules légers
- ROUJOL S. et al, Influence of passenger car auxiliaries on pollutant emission factors within the Artemis model, 2009, Atmospheric Environment, Volume 43, Issue 5, p. 1008-1014
- ROUSSEAU P, Analyse du cycle de vie - Evaluation des impacts, 2005, Techniques de l'ingénieur, 11 p.
- SCHNEIDER S. et al, Analyse du cycle de vie - Problèmes d'affectation, 1998, Techniques de l'ingénieur, 16 p.
- SCHWAB-CASTELLA P. et al, Integrating life cycle costs and environmental impacts of composite rail car-bodies for a Korean train, 2009, The International Journal of Life Cycle Assessment ,V14(5), p 429-442
- SIMONS A. et al, Life Cycle Assessment of battery electric and internal combustion engine drivetrains for a small passenger car, 2010, 18th Internal Symposium, Transport and Air Pollution, Proceedings, 6 p.
- SMITH COOPER J, Specifying functional units and reference flows or comparable alternatives, 2003, International Journal of LCA, Volume 8, Number 6 / november 2003, p. 337-349
- SPIELMANN M. et al, Can a prolonged use of a passenger car reduce environmental burdens? Life cycle analysis of Swiss passenger car, 2006, Journal of cleaner production, Volume 15, Issues 11-12, 2007, p. 1122-1134
- TCHUNG-MING S, Les énergies pour le transport : avantages et inconvénients, 2009, Panorama IFP, 7 p.

- THORPE A. et al, Sources and properties of non-exhaust particulate matter from road traffic : A review, 2008, Science of the total environment, 400, pp 270-282
- VAN DEN BOSSCHE P. et al, Influence of functional unit on the life cycle assessment of traction batteries, 2007, International Journal of LCA, Volume 12, Number 3 / may 2007, p. 191-196
- VAN DEN BOSSCHE P. et al, SUBAT: an assessment of SUsustainable BAttery Technology, 2005, Journal of power source, Volume 162, Issue 2, 22 November 2006, p. 913-919
- Van der Voet E. et al, Life-cycle assessment of biofuels, convergence and divergence, 2010, Biofuels 1(3), pp 435-449
- VAN MIERLO J. et al, Which energy source for road transport in the future? A comparison of battery, hybrid, and fuel cell vehicle, 2006, Energy conversion and management, 12th International Conference on Emerging Nuclear Energy Systems, Volume 47, Issue 17, October 2006, p. 2748-2760
- WECKWERTH G, Verification of traffic emitted aerosol components in the ambient air of Cologne (Germany), 2001, Atmospheric Environment, V35 (32) pp 5525-5536
- WEIDEMA B. et al, Data quality management for life cycle inventories – an example of using data quality indicators, 1996, Journal of Cleaner Production Vol. 4, N°3-4 pp 167 -174
- WOLF R, Le véhicule électrique gagne le cœur de la ville, 1999, Centre français de l'électricité,
- WYMEN V. et al, Developing applicable driving cycle for retrofitted Plug-In Hybrid Electric Vehicles (PHEVs) environmental impac assessment, 2009, International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium, 8 p.
- ZACKRISSON M. et Al, Life cycle assessment of lithium-ion batteries for plug-in hybrid electric vehicles, - Critical issues, 2010, Journal of Cleaner Production, 11 p.

Annexes

Annexe 1: Localisation des différents types d'incertitudes dans les différentes phases de l'ACV d'après [BJÖKLUND, 2002] et [LEROY, 2009]

Annexe 2 : Les indicateurs d'impacts utilisés

Annexe 3 : Analyse comparatives des différentes ACV publiées appliquées au VE ou à leurs batteries

Annexe 4 : Adaptation des cycles Artémis route et Artémis urbain

Annexe 5 : Le cycle expérimental

Annexe 6: Evaluation des incertitudes sur les mesures de consommations spécifiques d'électricité du VE

Annexe 7 : Détails des résultats pour les tests de consommations du VE sur les différents cycles utilisés

Annexe 8 : Détails des résultats pour les tests de consommations du VT sur les différents cycles utilisés

Annexe 9 : Résultats des modélisations

Annexe 10 : Extrait du classeur de données pour exemple - Données d'inventaires pour la production et l'élimination de la batterie Plomb-acide

Annexe 11 : Impact des incertitudes des résultats de consommations obtenus lors des essais sur le bilan Effet de Serre (VE testé, batterie lithium-fer-phosphate)

Annexe 1: Identification des différents types d'incertitudes dans les différentes phases de l'ACV d'après [BJÖKLUND, 2002] et [LEROY, 2009]

| Type | Etapes de l'ACV | | | | |
|---|--|--|--|---|--|
| | Définition des objectifs et du système | Inventaire | Choix des impacts étudiés | Classification | Caractérisation |
| Inexactitude des données Carence | Unité fonctionnelle, Périmètre de l'étude | Mesures/valeurs inexactes | Choix des catégories d'impacts considérées | | Inc. liée à la réelle contribution de la substance ou du matériau Manque d'informations relatives aux impacts |
| Non représentativité des données | | Manque de données | | | |
| Inc. liées aux modèles utilisés | | Données non représentatives | | | |
| Inc. liées aux choix et hypothèses | Méconnaissance du système | Modèle(s) non représentatif(s) (simplification ...) | | | Modèle(s) non représentatif(s) (simplification ...) |
| Variabilité spatiales | | Méthodes d'allocation, type de données à collecter Variation spatiale des émissions | | | |
| Variabilité temporelle | Méconnaissance du système | Variation temporelle des émissions | | | Variation des caractéristiques du milieu selon le lieu d'émission |
| Variabilité objet/source | | Différences de performances entre procédés jugés équivalents | | | |
| Inc. épistémologiques | Méconnaissance du système | Méconnaissance des sous systèmes modélisés | Méconnaissances des catégories d'impact | Méconnaissance de la contribution à la catégorie d'impact | Méconnaissance des facteurs de caractérisation |
| Erreurs Inc. lié à l'estimation des Inc. | Toutes les erreurs | Toutes les erreurs Estimation des Inc.s de l'étape d'inventaire | Toutes les erreurs | Toutes les erreurs | Toutes les erreurs Estimation des Inc.s de l'étape de caractérisation |

Annexe 2 : Les indicateurs d'impacts utilisés

La partie analyse d'impact constitue la troisième phase de l'ACV (cf. partie 1). Il s'agit de relier les valeurs de l'inventaire à un impact potentiel sur l'environnement via l'utilisation de méthodes d'analyse de l'impact.

Chacune de ces méthodes propose différents indicateurs d'impact qui traduisent l'effet potentiel sur l'environnement des substances émises par le système. Le terme « potentiel » est important car il ne s'agit pas d'impacts réellement mesurés, mais d'estimations données par des méthodes qui modélisent le cheminement d'impact de ces substances.

Les différents impacts analysés et les indicateurs choisis sont présentés ci-après :

A. L'effet de serre

Brève description du phénomène :

L'effet de serre est un mécanisme naturel assurant à notre planète un climat tempéré. Sans lui, la température moyenne serait d'environ -18°C. Il résulte de l'action de certains constituants de l'atmosphère (en premier lieu la vapeur d'eau, et des gaz comme le CO₂) qui absorbent une partie de la chaleur du soleil réémise par la terre dans l'infrarouge, qui autrement se perdrait dans l'espace.

Ce processus naturel est perturbé par la croissance de concentration des gaz à effet de serre émis par l'activité humaine. On craint qu'il en résulte un réchauffement du climat et une perturbation du cycle hydrologique terrestre.

Les principales émissions concernées sont : CO₂, CH₄, N₂O, CFC, SF₆ ...

Indicateur d'impact retenu :

Si différentes méthodes d'analyse de l'impact proposent aujourd'hui un indicateur effet de serre (Ecoindicateur 99, IMPACT 2002+, IPCC), il y a aujourd'hui consensus sur l'emploi du Global Warming Potential (GWP) défini par l'IPPC (Intergovernmental Panel on Climate Change).

$$GWP_i = \frac{\int_0^T a_i c_i(t) dt}{\int_0^T a_{CO_2} c_{CO_2}(t) dt}$$

Où :

- GWP_i : facteur de caractérisation par unité massique du flux i au GWP (à une référence de temps T). Le GWP_i d'une substance i s'exprime en kg éq. CO_2 / (kg substance i)
 - a_i : absorption de chaleur radiative par unité d'augmentation du gaz à effet de serre i .
 - $c_i(t)$: concentration du gaz à effet de serre i au moment T après l'émission.
 - T : le nombre d'année sur lequel l'intégration de temps est faite
- Pour évaluer l'effet de serre, l'indicateur IPCC pour un horizon de 100 ans est retenu.**

GWP (IPCC 2007)

| Industrial Designation or Common Name (years) | Chemical Formula | Lifetime (years) | Radiative Efficiency (W m ⁻² ppb ⁻¹) | Global Warming Potential for Given Time Horizon | | | |
|---|---|------------------------|--|--|--------|--------|--------|
| | | | | SAR [†] (100- yr) | 20-yr | 100-yr | 500-yr |
| Carbon dioxide | CO ₂ | See below ^a | ^b 1.4x10 ⁻⁵ | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Methane ^c | CH ₄ | 12 ^c | 3.7x10 ⁻⁴ | 21 | 72 | 25 | 7.6 |
| Nitrous oxide | N ₂ O | 114 | 3.03x10 ⁻³ | 310 | 289 | 298 | 153 |
| Substances controlled by the Montreal Protocol | | | | | | | |
| CFC-11 | CCl ₃ F | 45 | 0.25 | 3,800 | 6,730 | 4,750 | 1,620 |
| CFC-12 | CCl ₂ F ₂ | 100 | 0.32 | 8,100 | 11,000 | 10,900 | 5,200 |
| CFC-13 | CClF ₃ | 640 | 0.25 | | 10,800 | 14,400 | 16,400 |
| CFC-113 | CCl ₂ FCClF ₂ | 85 | 0.3 | 4,800 | 6,540 | 6,130 | 2,700 |
| CFC-114 | CClF ₂ CClF ₂ | 300 | 0.31 | | 8,040 | 10,000 | 8,730 |
| CFC-115 | CClF ₂ CF ₃ | 1,700 | 0.18 | | 5,310 | 7,370 | 9,990 |
| Halon-1301 | CBrF ₃ | 65 | 0.32 | 5,400 | 8,480 | 7,140 | 2,760 |
| Halon-1211 | CBrClF ₂ | 16 | 0.3 | | 4,750 | 1,890 | 575 |
| Halon-2402 | CBrF ₂ CBrF ₂ | 20 | 0.33 | | 3,680 | 1,640 | 503 |
| Carbon tetrachloride | CCl ₄ | 26 | 0.13 | 1,400 | 2,700 | 1,400 | 435 |
| Methyl bromide | CH ₃ Br | 0.7 | 0.01 | | 17 | 5 | 1 |
| Methyl chloroform | CH ₃ CCl ₃ | 5 | 0.06 | | 506 | 146 | 45 |
| HCFC-22 | CHClF ₂ | 12 | 0.2 | 1,500 | 5,160 | 1,810 | 549 |
| HCFC-123 | CHCl ₂ CF ₃ | 1.3 | 0.14 | 90 | 273 | 77 | 24 |
| HCFC-124 | CHClFCF ₃ | 5.8 | 0.22 | 470 | 2,070 | 609 | 185 |
| HCFC-141b | CH ₃ CCl ₂ F | 9.3 | 0.14 | | 2,250 | 725 | 220 |
| HCFC-142b | CH ₃ CClF ₂ | 17.9 | 0.2 | 1,800 | 5,490 | 2,310 | 705 |
| HCFC-225ca | CHCl ₂ CF ₂ CF ₃ | 1.9 | 0.2 | | 429 | 122 | 37 |
| HCFC-225cb | CHClFCF ₂ CClF ₂ | 5.8 | 0.32 | | 2,030 | 595 | 181 |
| Hydrofluorocarbons | | | | | | | |
| HFC-23 | CHF ₃ | 270 | 0.19 | 11,700 | 12,000 | 14,800 | 12,200 |
| HFC-32 | CH ₂ F ₂ | 4.9 | 0.11 | 650 | 2,330 | 675 | 205 |
| HFC-125 | CHF ₂ CF ₃ | 29 | 0.23 | 2,800 | 6,350 | 3,500 | 1,100 |
| HFC-134a | CH ₂ FCF ₃ | 14 | 0.16 | 1,300 | 3,830 | 1,430 | 435 |
| HFC-143a | CH ₃ CF ₃ | 52 | 0.13 | 3,800 | 5,890 | 4,470 | 1,590 |
| HFC-152a | CH ₃ CHF ₂ | 1.4 | 0.09 | 140 | 437 | 124 | 38 |
| HFC-227ea | CF ₃ CHFCF ₃ | 34.2 | 0.26 | 2,900 | 5,310 | 3,220 | 1,040 |
| HFC-236fa | CF ₃ CH ₂ CF ₃ | 240 | 0.28 | 6,300 | 8,100 | 9,810 | 7,660 |
| HFC-245fa | CHF ₂ CH ₂ CF ₃ | 7.6 | 0.28 | | 3,380 | 1030 | 314 |
| HFC-365mfc | CH ₃ CF ₂ CH ₂ CF ₃ | 8.6 | 0.21 | | 2,520 | 794 | 241 |
| HFC-43-10mee | CF ₃ CHFCFCF ₂ CF ₃ | 15.9 | 0.4 | 1,300 | 4,140 | 1,640 | 500 |
| Perfluorinated compounds | | | | | | | |
| Sulphur hexafluoride | SF ₆ | 3,200 | 0.52 | 23,900 | 16,300 | 22,800 | 32,600 |
| Nitrogen trifluoride | NF ₃ | 740 | 0.21 | | 12,300 | 17,200 | 20,700 |
| PFC-14 | CF ₄ | 50,000 | 0.10 | 6,500 | 5,210 | 7,390 | 11,200 |
| PFC-116 | C ₂ F ₆ | 10,000 | 0.26 | 9,200 | 8,630 | 12,200 | 18,200 |

Table 2.14 (continued)

| Industrial Designation or Common Name (years) | Chemical Formula | Lifetime (years) | Radiative Efficiency (W m ⁻² ppb ⁻¹) | Global Warming Potential for Given Time Horizon | | | |
|--|---------------------|---------------------|--|--|-------|--------|--------|
| | | | | SAR [†] (100- yr) | 20-yr | 100-yr | 500-yr |
| Perfluorinated compounds (continued) | | | | | | | |
| PFC-218 | | 2,600 | 0.26 | 7,000 | 6,310 | 8,830 | 12,500 |
| PFC-318 | | 3,200 | 0.32 | 8,700 | 7,310 | 10,300 | 14,700 |
| PFC-3-1-10 | | 2,600 | 0.33 | 7,000 | 6,330 | 8,860 | 12,500 |

| Industrial Designation or Common Name (years) | Lifetime (years) | Radiative Efficiency ($\text{W m}^{-2} \text{ppb}^{-1}$) | SAR [†] (100-yr) | 20-yr | 100-yr | 500-yr |
|---|------------------|--|---------------------------|--------|--------|--------|
| PFC-4-1-12 | 4,100 | 0.41 | | 6,510 | 9,160 | 13,300 |
| PFC-5-1-14 | 3,200 | 0.49 | 7,400 | 6,600 | 9,300 | 13,300 |
| PFC-9-1-18 | >1,000d | 0.56 | | >5,500 | >7,500 | >9,500 |
| trifluoromethyl sulphur pentafluoride | 800 | 0.57 | | 13,200 | 17,700 | 21,200 |
| HFE-125 | 136 | 0.44 | | 13,800 | 14,900 | 8,490 |
| HFE-134 | 26 | 0.45 | | 12,200 | 6,320 | 1,960 |
| HFE-143a | 4.3 | 0.27 | | 2,630 | 756 | 230 |
| HCFE-235da2 | 2.6 | 0.38 | | 1,230 | 350 | 106 |
| HFE-245cb2 | 5.1 | 0.32 | | 2,440 | 708 | 215 |
| HFE-245fa2 | 4.9 | 0.31 | | 2,280 | 659 | 200 |
| HFE-254cb2 | 2.6 | 0.28 | | 1,260 | 359 | 109 |
| HFE-347mcc3 | 5.2 | 0.34 | | 1,980 | 575 | 175 |
| HFE-347pcf2 | 7.1 | 0.25 | | 1,900 | 580 | 175 |
| HFE-356pcc3 | 0.33 | 0.93 | | 386 | 110 | 33 |
| HFE-449sl (HFE-7100) | 3.8 | 0.31 | | 1,040 | 297 | 90 |
| HFE-569sf2 (HFE-7200) | 0.77 | 0.3 | | 207 | 59 | 18 |
| HFE-43-10pccc124 (H-Galden 1040x) | 6.3 | 1.37 | | 6,320 | 1,870 | 569 |
| HFE-236ca12 (HG-10) | 12.1 | 0.66 | | 8,000 | 2,800 | 860 |
| HFE-338pcc13 (HG-01) | 6.2 | 0.87 | | 5,100 | 1,500 | 460 |
| PFPME | 800 | 0.65 | | 7,620 | 10,300 | 12,400 |
| Dimethylether | 0.015 | 0.02 | | 1 | 1 | <<1 |
| Methylene chloride | 0.38 | 0.03 | | 31 | 8.7 | 2.7 |
| Methyl chloride | 1.0 | 0.01 | | 45 | 13 | 4 |

B. L'acidification atmosphérique

Description du phénomène :

L'acidification atmosphérique consiste en la présence de substances acides dans l'air, qui peuvent soit rester sous l'état gazeux, soit se dissoudre dans l'eau (« pluies acides »), ou se fixer sur des particules solides. Elles atteignent ainsi les écosystèmes (acidification des eaux de surface, diminution de la faune et la flore y régnant, ou encore défoliation des arbres, acidification des sols. Ce phénomène affecte également les bâtiments et la santé humaine.

L'acidification a un impact régional et la localisation de l'émission est un facteur déterminant pour l'ampleur de l'impact (sensibilité de l'environnement, dispersion, etc...).

Les principales émissions concernées sont les SO_x, les NO_x, et dans une moindre mesure HCl, NH₃, HF.

Indicateur d'impact retenu :

De nombreuses méthodes proposent des indicateurs d'impact pour l'acidification atmosphérique (CML 1992, CML 2000, NFP01010, Eco-indicator 99, Impact 2002+). L'indicateur choisi doit prendre en compte la sensibilité de la région dans laquelle les émissions acidifiantes ont lieu, et être applicable pour différents pays européens.

La méthode CML 2000-baseline répond à ces exigences. Elle se base sur le modèle RAINS, modèle de dispersion couplé avec une base de données sur les émissions, sur l'occupation du sol et sa composition (capacité à absorber les pluies acides) et aboutit à une caractérisation des substances par région. Pour déterminer ces coefficients de caractérisation, Huijbregts calcule la modification du risque d'acidification (déposition d'une substance / charge critique d'une substance dans une région) pour une augmentation de l'émission dans une région donnée. Cette modification du risque est comparée à la modification du risque obtenue par une augmentation de l'émission SO₂ en Suisse.

Les pays du nord de l'Europe sont plus touchés par le problème de l'acidification et ont des coefficients élevés. Par contre, les pays du pourtour méditerranéen ont des coefficients plus faibles car les sols sont calcaires et les émissions restent à des niveaux raisonnables. La France est moins touchée que les autres pays.

Le calcul de l'indicateur acidification pour n émissions sur n régions est :

$$I = \sum_{i=1}^n \sum_{s=1}^m AF_{s,i} \times E_{s,i}$$

Où :

- E_{s,i} est l'émission i dans la région s
- AF_{s,i} le facteur de caractérisation en kg éq. SO₂ / kg de substance i émise dans l'air dans la région s

➔ **Pour l'évaluation de l'impact « acidification atmosphérique » l'indicateur CML 2000-baseline est retenu.**

AP : CML 2000 baseline

| Substance | Compartment | CAS number | AP in kg SO ₂ eq. in Switzerland /kg |
|---------------------------------------|-------------|------------|---|
| ammonia | air | 7664-41-7 | 1.6 |
| nitrogen oxides (as NO ₂) | air | 10102-44-0 | 0.5 |
| sulphur dioxide | air | 7446-09-5 | 1.2 |

| | |
|---|---|
| Source: | Huijbregts, 1999a |
| Status: | Author |
| Equation: | $acidification = \sum_i AP_i \times m_i$ (4.3.10.1) |
| The indicator result is expressed in kg SO ₂ emitted in Switzerland equivalent. AP _i is the Acidification Potential for substance <i>i</i> emitted to the air, while <i>m_i</i> is the emission of substance <i>i</i> to the air. | |

C. L'Eutrophisation

Description du phénomène :

L'Eutrophisation est le processus d'enrichissement des eaux en sels minéraux. Dans les conditions naturelles, l'eutrophisation se développe très lentement, sur une échelle de temps géologique. Le déversement, du à l'activité humaine, de quantités importantes de matières organiques fermentescibles et d'effluents riches en phosphates et nitrates (engrais, détergifs...), accélère considérablement ce processus.

Les principales étapes de l'eutrophisation peuvent être résumées comme suit :

- Le lac soumis à une pollution croissante, accumule dans ses eaux des sels minéraux nutritifs,
- Cet enrichissement en élément nutritif déclenche une prolifération d'algues et une diminution de la transparence des eaux,
- La mort et la décomposition d'une masse considérable d'algues entraîne la consommation rapide de l'oxygène encore contenu dans les couches profondes du lac.
- L'absence d'oxygène dans les couches profondes entraîne l'apparition de fermentations anaérobies : le dégagement d'hydrogène sulfuré et d'ammoniac en est le symptôme caractéristique.

Les émissions concernées sont les composés riches en azote, en phosphate, et matières organiques.

Indicateurs existants : discussion et choix

Les **méthodes CML** proposent plusieurs indicateurs pour cet impact. Les méthodes **Eco-indicator 99** et **Impact 2002+** comptabilisent ensemble acidification et eutrophisation.

CML 1992 et **CML 2000- baseline** proposent de calculer l'indicateur EP (Eutrophication Potential) pour caractériser la contribution des composés azotés, phosphatés et des matières organiques à l'eutrophisation des eaux.

$$\text{Eutrophisation} = \sum_i EP_i \times m_i$$

Le facteur de caractérisation EP d'une substance i est basé sur la contribution potentielle à la formation de l'algue « Redfield » (composition élémentaire moyenne d'une algue $\text{C}_{106}\text{H}_{263}\text{O}_{110}\text{N}_{16}\text{P}_1$). On considère que seuls les atomes de N et P contribuent à la formation de l'algue et qu'il faut 16 moles de N et 1 mole de P pour produire 1 mole d'algue Redfields. La contribution d'un atome N est donc 16 fois inférieure à une mole de P.

Tous les potentiels d'eutrophisation sont normalisés par le potentiel du phosphate.

$$EP_i = \frac{v_i / M_i}{v_{\text{PO}_4^{3-}} / M_{\text{PO}_4^{3-}}}$$

Avec, M_i , la masse molaire du composé i

v_i est la contribution potentielle à la formation de l'algue Redfield du composé i

$$\text{et, } v_i = N_P + \frac{N_N}{16}$$

Avec, N_P , le nombre d'atome P par molécule

N_N , le nombre d'atome N par molécule

La méthode *CML 2000-baseline* prend en compte les émissions dans l'air, le sol et l'eau alors que *CML 1992* ne prend en compte que les émissions dans l'air et le sol. Les facteurs de caractérisation sont les mêmes pour une émission dans différents milieux. L'hypothèse sous jacente est que toute émission de nitrates ou phosphates dans le sol ou l'air se retrouve à terme en milieu aquatique. Cette hypothèse est pénalisante.

La méthode *CML 2000-baseline* est la plus pénalisante.

→ Pour évaluer l'impact « Eutrophisation », l'indicateur CML 2000-baseline est retenu.
Les résultats seront exprimés en « eq PO₄³⁻ »

EP, CML 2000, generic method

| Substance | CAS number | EP (in kg PO ₄ ³⁻ eq./kg) |
|--|------------|---|
| ammonia | 7664-41-7 | 0.35 |
| ammonium | 14798-03-9 | 0.33 |
| nitrate | 14797-55-8 | 0.1 |
| nitric acid | 7697-37-2 | 0.1 |
| nitrogen | 7727-37-9 | 0.42 |
| nitrogen dioxide | 10102-44-0 | 0.13 |
| nitrogen monoxide | 10102-43-9 | 0.2 |
| nitrogen oxides | 10102-44-0 | 0.13 |
| phosphate | 7664-38-2 | 1 |
| phosphoric acid (H ₃ PO ₄) | 7664-38-2 | 0.97 |
| phosphorus (P) | 7723-14-0 | 3.06 |
| phosphorus(V) oxide (P ₂ O ₅) | 1314-56-3 | 1.34 |
| chemical oxygen demand (COD) ¹ | - | 0.022 |

Source: Heijungs *et al.*, 1992 with some modifications

Status: authors

Equation:
$$eutrophication = \sum_i EP_i \times m_i \quad (4.3.11.1)$$

The indicator result is expressed in kg PO₄³⁻ equivalent. EP_i is the Eutrophication Potential for substance i emitted to air, water or soil, while m_i is the emission of substance i to air, water or soil.

Remark: If the Biological Oxygen Demand (BOD)² is specified it can generally be converted to a COD. The conversion factor will depend on the situation.

D. Destruction de la couche d'ozone

Description du phénomène :

La couche d'ozone stratosphérique se situe entre 17 et 50 km d'altitude. Elle participe à la filtration du rayonnement solaire. Son état naturel résulte d'un équilibre entre une production photochimique à partir de l'oxygène et des réactions catalytiques de destruction.

Aujourd'hui, la teneur en ozone au dessus des pôles est en forte diminution et les chercheurs estiment que l'augmentation du « trou de l'ozone » constatée au dessus de l'Antarctique provient en grande partie de l'élévation de la concentration atmosphérique de composés chlorés (CFC principalement) d'origine humaine.

La diminution de l'épaisseur de la couche d'ozone stratosphérique induit une augmentation du rayonnement solaire sur la terre dans le domaine des ultraviolets. Un excès de ces rayons UV.B pourrait être nocif pour la vie végétale et animale et concourir à une augmentation des mélanomes et cataractes.

Les principales émissions concernées sont les CFC, HCFC, et autres halogénés.

Indicateurs existants : discussion et choix

Le facteur de caractérisation ODP (Ozone Depletion Potential) est utilisé pour évaluer la contribution des substances à la destruction de la couche d'ozone stratosphérique.

$$\text{Destruction de la couche d'ozone} = \sum_i ODP_i \times m_i$$

Les valeurs, données par le WMO (World Meteorological Organization), sont dépendantes de la durée de vie atmosphérique des substances, de leur relargage de composés chlorés ou bromés et de la destruction d'ozone correspondante dans la stratosphère. Les ODP des substances sont exprimés en équivalent CFC-11 et les valeurs ont été publiées par le WMO en 1998. Néanmoins, celles-ci ne sont pas différenciées selon les horizons temporels, qui ont une influence notable sur les contributions.

Les méthodes **CML-2000 baseline et WMO-1998 (average)** proposent les mêmes facteurs de caractérisations ODP. Ils ne diffèrent que sur la prise en compte d'une ou deux émissions (sur plus d'une vingtaine).

CML 2000-alternative propose des facteurs de caractérisation pour des échelles de temps différentes (5 à 40 ans). Ces facteurs sont recommandés (par la WMO) si la durée considérée n'est pas l'infini.

Eco-indicartor 99 et Impact 2002+ utilisent les ODP fournis par l'EPA (us Environmental Protection Agency).

➔ **Pour évaluer l'impact « Destruction de la couche d'ozone », l'indicateur WMO-Depletion of the ozone layer est retenu car le WMO est l'organisme de référence dans le domaine de l'ozone. Les résultats seront exprimés en « eq CFC 11 »**

ODP, CML 2000, generic method

| Substance | Compartment | CAS number | ODP (in kg CFC-11 eq./kg) |
|-----------------------|-------------|------------|---------------------------|
| 1,1,1-trichloroethane | air | 71-55-6 | 0.11 |
| CFC-11 | air | 75-69-4 | 1.0 |
| CFC-113 | air | 26523-64-8 | 0.90 |
| CFC-114 | air | 1320-37-2 | 0.85 |
| CFC-115 | air | 76-15-3 | 0.40 |
| CFC-12 | air | 75-71-8 | 0.82 |
| HBFC-2401* | air | - | 0.25 |
| HBFC-1201* | air | - | 1.4 |
| HALON-1202* | air | 75-61-6 | 1.25 |
| HALON-1211 | air | 353-59-3 | 5.1 |
| HALON-1301 | air | 75-63-8 | 12 |
| HBFC-2311* | air | - | 0.14 |
| HALON-2402* | air | 25497-30-7 | 7 |
| HCFC-123 | air | 306-83-2 | 0.012 |
| HCFC-124 | air | 63938-10-3 | 0.026 |
| HCFC-141b | air | 27156-03-2 | 0.086 |
| HCFC-142b | air | 75-68-3 | 0.043 |
| HCFC-22 | air | 75-45-6 | 0.034 |
| HCFC-225ca | air | 422-56-0 | 0.017 |
| HCFC-225cb | air | 507-55-1 | 0.017 |
| Methyl Bromide | air | 74-83-9 | 0.37 |
| Methyl Chloride | air | 74-87-3 | 0.02 |
| Tetrachloromethane | air | 56-23-5 | 1.2 |

Source: WMO, 1999; * WMO, 1992¹

Status: WMO

Equation:
$$\text{ozone depletion} = \sum_i ODP_{\infty j} \times m_i \quad (4.3.6.1)$$

The indicator result is expressed in kg of the reference substance, CFC-11. $ODP_{\infty j}$ is the steady-state Ozone Depletion Potential for substance i , while m_i (kg) is the quantity of substance i emitted.

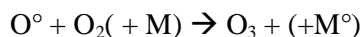
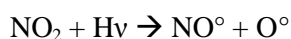
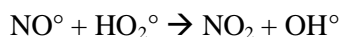
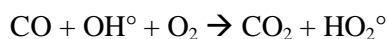
E. Smog photochimique

Description du phénomène :

L'ozone et bien d'autres polluants photochimiques constituent une pollution secondaire développée sous l'influence du rayonnement solaire sur des polluants primaires ou « précurseurs » que sont les COV (composés organiques volatils), les NO_x, et le CO₂. Ces derniers proviennent de certaines installations industrielles mais surtout des gaz d'échappement des véhicules automobiles.

Sous certaines conditions climatiques (anticycloniques notamment), ces polluants peuvent se trouver piégés au niveau du sol où ils réagissent alors avec la lumière du jour pour produire le smog photochimique. Une des composantes importantes du smog est l'ozone.

La production d'ozone est un mécanisme qui repose initialement sur la photolyse du NO₂ (formation de radicaux). Les photo-oxydants se forment au niveau de la troposphère:



L'ozone est connu depuis longtemps pour avoir de fortes propriétés irritatives au niveau pulmonaire. Il peut également avoir des impacts sur les végétaux : perturbation de la photosynthèse des plantes, altération de leur résistance, etc.

Les principales émissions concernées sont les COV, CO, et NOx

Indicateurs existants : discussion et choix

Deux facteurs de caractérisations peuvent être utilisés par les méthodes d'évaluation :

⇒ **Le POCP (Photochemical Ozone Creation Potential)**

Le POCP d'un composé a été défini en 1991 par un protocole de l'ONU/WMO comme le ratio entre le changement de concentration en ozone et l'émission responsable de cette augmentation de concentration. le tout normalisé par l'éthylène.

$$POP_{reg} = \sum_i (m_i \times POCP_i)$$

- POP : potentiel de formation de photo-oxydants au niveau régional (Europe de l'Ouest) ;
- POCPi (Photochemical Ozone Creation Potentials) : facteur de caractérisation par rapport à un composé de référence l'éthylène (éq .kg).

La méthode WMO ne prend en compte que les COV (pas les NOx qui peuvent avoir une influence significative).

La méthode CML 2000-baseline, plus complexe, propose différents scénarii, utilisant pour le calcul des POCP un modèle de transport des COV :

- un scénario avec une concentration ambiante en NOx haute (Derwent et al 1998) : ce scénario est retenu pour CML 2000-baseline
- un scénario dans lequel la concentration ambiante en ozone est basse (Andersson-Sköld et al. 1992) : CML 2000 propose en alternative ce cas « bas Nox »

Finalement, les facteurs de **CML-2000 baseline** sont proches de la méthode **WMO- average**. Le nombre de substances prises en compte dans WMO est plus faible que dans la méthode CML (environ 80 contre 120 environ). NO₂ et NO sont considérés dans CML et non dans WMO. Cependant, la WMO est une organisation de référence sur l'ozone (tropo-ou stratosphérique) et on préférera WMO à CML.

⇒ **L'IR (Incremental Reactivity)**

L'IR caractérise la contribution des COV à la formation d'ozone au niveau local. Cette grandeur est définie comme la variation de concentration en ozone causée par l'ajout d'une petite quantité de COV, divisée par la quantité de COV ajoutée.

CML 2001-alternative propose une approche locale qui repose sur l'évaluation de l'IR d'un COV telle que :

$$POP_{loc} = \sum_i m_i \times IR_i$$

avec :

- **POP_{loc}** : potentiel de formation de photo-oxydants au niveau local (à l'échelle d'une zone urbaine). L'unité de cet indicateur d'impact potentiel le kg d'ozone formée :

Les IR sont calculés pour différents scénarii (MIR, EBIR, MOR) où les émissions de NOx varient et pour des zones urbaines nord américaines.

Remarque : CML2000-Photo-oxydant formation n'a pas de substance pour les COV non spécifiés qui constituent pourtant un flux important dans les ACV.

➔ **Pour évaluer l'impact « Smog photochimique », l'indicateur WMO-Photochemical oxidant formation (average) est retenu car le WMO est l'organisme de référence dans le domaine de l'ozone. Les résultats seront exprimés en « eq Ethylène »**

F. Epuisement des ressources

Description du phénomène :

L'épuisement des ressources naturelles considère l'ensemble des ressources accessibles par extraction et non l'ensemble des ressources présentes dans la géosphère entière (atmosphère, plantes, décharges ...). Par exemple, les stocks dans l'économie (ex : acier présent dans les carcasses de voitures), sont exclus de cette catégorie.

Il est très difficile de définir un indicateur objectif et stable dans le temps. En effet, ces quantités de ressources évoluent constamment avec les quantités extraites pour les produits de consommations courants, les produits innovants et les découvertes régulières de gisement. Un exemple récent est le Lithium : De nombreux articles démontrent une absence de consensus sur la quantité de ressources disponibles, avec une consommation qui s'annonce de plus en plus importante (production de l'ensemble des batteries pour les applications mobiles : téléphones, ordinateurs, voitures...), et l'annonce de la découverte de nouveaux gisement a été faite en juin 2010

Aussi, il est nécessaire d'utiliser des données officielles et récentes.

Deux types de ressources sont concernés :

- les ressources minérales (cuivre, cadmium...);
- les ressources fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel ...)

Indicateur d'impact retenu

L'épuisement des ressources est un indicateur assez discuté en ACV, car il repose sur des données incertaines. De nombreux indicateurs sont proposés, proposant des approches différentes, dont les principales sont présentées ci-après :

⇒ **Méthodes basées sur la concentration des ressources disponibles**

Si les ressources ne sont pas rares, leur concentration doit diminuer à plus ou moins long terme. Les mines exploitées aujourd'hui sont les plus faciles d'accès, où le minerai est le plus pur, elles sont donc les plus rentables. Une fois ces gisements épuisés, il faudra extraire les matériaux de gisement plus pauvres, plus profonds.

Les indicateurs **Eco-indicator 99** et **Impact 2002+** essaient de traduire cette idée, considérant que la diminution de la ressource entraînera une augmentation des consommations d'énergies liées à leur extraction et à leur purification.

Avantage de l'approche :

- les ressources en minerais et celles en énergies fossiles sont séparées en deux indicateurs exprimés en une même unité, le MJ, ce qui permet la comparaison.

Inconvénient de l'approche :

- Cette méthode, bien que séduisante sur le plan théorique reste incertaine sur le plan de la mise en œuvre. De nombreuses hypothèses sont faites pour modéliser la future concentration du minerai et les surplus d'énergies nécessaires à son extraction et sa purification.

⇒ **Méthodes basées sur les ressources et la consommation**

Ces méthodes consistent à prendre pour référence les réserves connues et/ou la consommation annuelle du matériau. Les données sont issues :

- Pour les ressources minérales, du Bureau des mines Américain
- Pour les ressources fossiles, le WEC (World Energy Council)

Trois méthodes coexistent :

CML 1992 : Méthode basée sur l'état du gisement

Le facteur de caractérisation est l'inverse de la réserve ultime mondiale estimée pour la ressource considérée. L'indicateur est donc une fraction de réserve, sans dimension, qui permet de relativiser chaque consommation par rapport aux réserves totales. Les énergies fossiles sont jugées interchangeableables, ainsi, la totalité des ressources énergétiques non renouvelables sont exprimées en MJ par un seul facteur de caractérisation applicables à toutes les énergies fossile (gaz, charbon, pétrole etc.)

CML 2000 : méthode basée sur l'état du gisement et la vitesse d'épuisement des ressources

CML2000-Depletion of abiotic resources utilise un facteur de caractérisation W faisant intervenir la consommation annuelle de la ressource (kg/an) et ses réserves ultimes (kg), tel que :

$$W = \frac{1}{R_j} \times \frac{G_j}{R_j}$$

Avec R_j l'état du gisement en kg
 G_j , la consommation annuelle de la ressource en (kg/an)

Les énergies fossiles sont, comme avec la méthode CML 1992 considérés interchangeables. On considère les réserves (en MJ) et les consommations annuelles de la totalité des énergies fossiles (en MJ/an). Enfin ce résultat est convertit en (kg/an)-1 en multipliant par le PCI (en MJ/kg) de la ressource.

La substance de référence est l'antimoine, les résultats seront donc exprimés en kg eq. Sb/kg de ressource.

Avantage de l'approche :

- Elle est plus complète que les autres, en particulier CML – 2000 considérant à la fois l'état du gisement (selon des critères physico-chimiques) et la vitesse d'épuisement des ressources.

Inconvénients de l'approche :

- Il n'y a qu'un seul indicateur pour l'ensemble des ressources. Pour faire la distinction énergétique/ non énergétique, il faut aller regarder la contribution de chaque ressource énergétique (uranium, charbon, lignite, pétrole, gaz).

Pour évaluer l'impact Epuisement des ressources, l'indicateur CML-2000 – Depletion of abiotic resources est retenu. La distinction sera faite entre ressources énergétiques et ressources non énergétiques. Les résultats seront exprimés en « eq. Antimoine »

ADP CML 2000 baseline

| Natural resource | Cas-number | ADP (in kg antimony eq./kg) | Natural resource | Cas-number | ADP (in kg antimony eq./kg) |
|----------------------|------------|-----------------------------|------------------------|------------|-----------------------------|
| actinium (Ac) | 7440-34-8 | 6.33E13 | polonium (Po) | 7440-08-6 | 4.79E14 |
| aluminium (Al) | 7429-90-5 | 1E-8 | praseodymium (Pr) | 7440-10-0 | 2.85E-7 |
| antimony (Sb) | 7440-38-0 | 1 | protactinium (Pa) | ?????? | 9.77E6 |
| argon (Ar) | 7440-37-1 | 4.71E-7 | radium (Ra) | 7440-14-4 | 2.36E7 |
| arsenic (As) | 7440-38-2 | 0.00917 | radon (Rn) | ??? | 1.2E20 |
| barium (Ba) | 7440-39-3 | 1.06E-10 | rhenium (Re) | 7440-15-5 | 0.768 |
| beryllium (Be) | 7440-41-7 | 3.19E-5 | rhodium (Rh) | 7440-18-6 | 32.3 |
| bismuth (Bi) | 7440-89-9 | 0.0731 | rubidium (Rb) | 7440-17-7 | 2.36E-9 |
| boron (B) | 7440-42-8 | 0.00467 | ruthenium (Ru) | 7440-18-8 | 32.3 |
| bromine (Br) | 7726-95-6 | 0.00667 | samarium (Sm) | 7440-19-9 | 5.32E-7 |
| cadmium (Cd) | 7440-43-9 | 0.33 | scandium (Sc) | 7440-20-2 | 3.96E-8 |
| calcium (Ca) | 7440-70-2 | 7.08E-10 | selenium (Se) | 7782-49-2 | 0.475 |
| cerium (Ce) | 7440-45-1 | 5.32E-9 | silicium (Si; silicon) | 7440-21-3 | 2.99E-11 |
| cesium (Cs) | 7440-48-2 | 1.91E-5 | silver (Ag) | 7440-22-4 | 1.84 |
| chlorine (Cl) | 7782-50-5 | 4.86E-8 | Sodium (Na) | 7440-23-5 | 8.24E-11 |
| chromium (Cr) | 7440-47-3 | 0.000858 | strontium (Sr) | 7440-24-6 | 1.12E-6 |
| cobalt (Co) | 7440-48-4 | 2.62E-5 | sulfur (S) | 7704-34-9 | 0.000358 |
| copper (Cu) | 7440-50-8 | 0.00194 | tantalum (Ta) | 7440-25-7 | 6.77E-5 |
| dysprosium (Dy) | 7429-91-6 | 2.13E-6 | tellurium (Te) | 13494-80-9 | 52.8 |
| erbium (Er) | 7440-52-0 | 2.44E-6 | terbium (Tb) | 7440-27-9 | 2.36E-5 |
| europium (Eu) | 7440-53-1 | 1.33E-5 | thallium (Tl) | 7440-28-0 | 5.05E-5 |
| fluorine (F) | 7782-41-4 | 2.96E-6 | thorium (Th) | 7440-29-1 | 2.08E-7 |
| gadolinium (Gd) | 7440-54-2 | 6.57E-7 | thulium (Tm) | 7440-30-4 | 8.31E-5 |
| gallium (Ga) | 7440-55-3 | 1.03E-7 | tin (Sn) | 7440-31-5 | 0.033 |
| germanium (Ge) | 7440-56-4 | 1.47E-6 | titanium (Ti) | 7440-32-6 | 4.4E-8 |
| gold (Au) | 7440-57-5 | 89.5 | tungsten (W); wolfram | 7440-33-7 | 0.0117 |
| hafnium (Hf) | 7440-58-6 | 8.87E-7 | uranium (U) | 7440-81-1 | 0.00287 |
| helium (He) | 7440-59-7 | 148 | vanadium (V) | 7440-82-2 | 1.16E-6 |
| holmium (Ho) | 7440-60-0 | 1.33E-5 | xenon (Xe) | 7440-83-3 | 17500 |
| indium (In) | 7440-74-6 | 0.00903 | ytterbium (Yb) | 7440-84-4 | 2.13E-6 |
| iodine (I) | 7553-56-2 | 0.0427 | yttrium (Y) | 7440-85-5 | 3.34E-7 |
| iridium (Ir) | 7439-88-5 | 32.3 | zinc (Zn) | 7440-86-6 | 0.000992 |
| iron (Fe) | 7439-89-6 | 8.43E-8 | Zirconium (Zr) | 7440-87-7 | 1.86E-5 |
| kalium (K;potassium) | 7440-09-7 | 3.13E-8 | crude oil | 8012-96-1 | 0.0201 |
| krypton (Kr) | 7439-90-9 | 20.9 | natural gas* | nvt | 0.0187 |
| lanthanum (La) | 7439-91-0 | 2.13E-8 | hard coal | nvt | 0.0134 |
| lead (Pb) | 7439-92-1 | 0.0135 | soft coal | nvt | 0.00671 |
| lithium (Li) | 7439-93-2 | 9.23E-6 | fossil energy** | nvt | 4.81E-4 |
| lutetium (Lu) | 7439-94-3 | 7.86E-5 | | | |
| magnesium (Mg) | 7439-95-4 | 3.73E-9 | | | |
| manganese (Mn) | 7439-96-5 | 1.38E-5 | | | |
| mercury (Hg) | 7439-97-6 | 0.495 | | | |
| molybdenum (Mo) | 7439-98-7 | 0.0317 | | | |
| neodymium (Nd) | 7440-00-8 | 1.94E-17 | | | |
| neon (Ne) | 7440-01-9 | 0.325 | | | |
| nickel (Ni) | 7440-02-0 | 0.000108 | | | |
| niobium (Nb) | 7440-03-1 | 2.31E-5 | | | |
| osmium (Os) | 7440-04-2 | 14.4 | | | |
| palladium (Pd) | 7440-05-3 | 0.323 | | | |
| phosphorus (P) | 7723-14-0 | 8.44E-5 | | | |
| platinum (Pt) | 7440-06-4 | 1.29 | | | |

* In kg antimony/m³ natural gas!

** In kg antimony/MJ fossil energy!

Source: Guinée, 1995, with modifications for crude oil, natural gas, hard coal and soft coal.

Status: author.

Equation:
$$\text{abiotic depletion} = \sum_i ADP_i \times m_i \quad (4.3.1)$$
The indicator result is expressed in kg of the reference resource antimony. ADP_i is the Abiotic Depletion Potential of resource i , while m_i (kg, except for natural gas and fossil energy) is the quantity of resource i used.

Annexe 3 : Analyse comparatives des différentes ACV publiées appliquées au VE ou à leurs batteries

| | Système | Choix méthodologiques | | | Données | |
|---|---|--|--|---|--|---|
| Références, objectif(s), | Véhicule | UF | Périmètre et allocation | Impact considérés | consommations du véhicule et hypothèses liées à l'usage du véhicule | Caractéristiques des batteries |
| HEMS, 2010 Comparaison de différents véhicules | Type golf 1600 kg 100 000 km | Durée de vie du véhicule avec différent usages | <ul style="list-style-type: none"> • <u>Périmètre</u> Cycle de vie du VE | <ul style="list-style-type: none"> • <u>ACV</u> Effet de serre Acidification | <ul style="list-style-type: none"> • <u>Véhicule thermique</u> Emissions et consommations issues de la littérature spécialisée (Handbook Emission Factors) <ul style="list-style-type: none"> • <u>Véhicule électrique</u> Consommation obtenues via un modèle Calculées s à partir des principes de la dynamique Hypothèses d'usages Cycles tirés du HBEFA (handbook emissions factors) et rapportés au trafic moyen allemand. (70% urbain, 20 % extra urbain, | Capacité 25 kWh Batterie Lithium-ion (sans plus de précisions) Durée de vie égale à celle du VE |

| | Systeme | Choix méthodologiques | | | Données | |
|---|----------------------------|-----------------------|--|---|--|---|
| Références, objectif(s), | Véhicule | UF | Périmètre et allocation | Impact considérés | consommations du véhicule et hypothèses liées à l'usage du véhicule | Caractéristiques des batteries |
| | | | | | et 10 % autoroute) Auxiliaires Freinage récupératif Mix électrique Différents mix testés Durée de vie véhicule : 100 000 km | |
| SIMONS, 2010 Comparaison de différents véhicules | Type Twingo RENAULT | km parcouru | <ul style="list-style-type: none"> • <u>Périmètre</u> Cycle de vie du VE Prise en compte des polluants hors pot d'échappement | <ul style="list-style-type: none"> • <u>ACV</u> Effet de serre Epuisement des ressources • <u>Phase d'usage</u> Effet cancérigène et respiratoire | <ul style="list-style-type: none"> • <u>Véhicule thermique</u> niveau de consommation donnée par Renault sur son site internet • <u>Véhicule électrique</u> Niveau de consommation obtenu par le calcul : 22.3 kWh/100 km Mix électrique Différents mix testés Durée de vie véhicule : 10 ans | <ul style="list-style-type: none"> • Données issues de la littérature scientifique et discutées avec le producteur de la batterie <ul style="list-style-type: none"> - Batterie Na-NiCl₂ (ZEBRA) - Décharge complète - 1500 cycles, 10 ans - Durée de vie égale à celle du VE |

| | Systeme | Choix méthodologiques | | | Données | |
|------------------------------|---|---|---|--|--|---|
| Références, objectif(s), | Véhicule | UF | Périmètre et allocation | Impact considérés | consommations du véhicule et hypothèses liées à l'usage du véhicule | Caractéristiques des batteries |
| RANTIK, 1999 | Différentes chimies de batterie pour un véhicule électrique de 1300 kg sans batterie | 10 années de VE avec une autonomie par cycle de batterie et par an spécifique | <ul style="list-style-type: none"> • <u>Périmètre</u> Cycle de vie de la batterie • <u>Allocations</u> Recyclage boucle fermée (quand le recyclage est considéré) | <ul style="list-style-type: none"> • <u>ACV</u> Epuisement des ressources Effet de serre Acidification Eutrophisation Cancérogènes | Données pour la production et l'élimination de la batterie ne sont pas toujours disponibles 120 Wh/t-km Durée de vie véhicule (10 ans et 200 000 km) | Plomb-acide Ni-Cd Ni-MH Na-NiCl ₂ (ZEBRA) Zn-air Capacité variable Durée de vie ne dépend que de la durée de vie cyclique de la batterie étudiée |
| VAN DEN BOSSCHE, 2005 | Batterie dans un VE (masse VE + masse conducteur = 888 kg) | Une batterie conférant 60 km d'autonomie à la voiture, avec une seule charge | <ul style="list-style-type: none"> • <u>Périmètre</u> Cycle de vie de la batterie • <u>Allocations</u> Recyclage | <ul style="list-style-type: none"> • <u>ACV</u> Ecoindicator point | DV véhicule= 180 000 km soit 3000 charge décharge Recharge avec mix Europe | 80% de DOD Pas d'auto décharge Plomb-acide Ni-Cd Ni-MH Lithium-ion Sodium nickel chloride DV variables selon la DV cyclique |

| | Systeme | Choix méthodologiques | | | Données | |
|--------------------------|--|-----------------------|---|--|---|--|
| Références, objectif(s), | Véhicule | UF | Périmètre et allocation | Impact considérés | consommations du véhicule et hypothèses liées à l'usage du véhicule | Caractéristiques des batteries |
| | | | boucle fermée | | | de la batterie |
| ZACKRISSON, 2010 | Batterie dans un véhicule hybride rechargeable VOLVO | Batterie | <ul style="list-style-type: none"> • <u>Périmètre</u> Production, usage, élimination de la batterie et de son boîtier La phase d'usage ne considère que l'énergie consommée par le transport de la batterie et son rendement | <ul style="list-style-type: none"> • <u>ACV</u> Effet de serre Acidification Destruction de la couche d'ozone Smog photochimique Eutrophisation | Consommation issues de la littérature 0.15 kWh/km et 0.5 L/10 km de pétrole. 50% distance parcourue avec combustion de carburant, les 50 % restant avec de l'électricité. Durée de vie véhicule (200 000 km) | Lithium fer phosphate 10 kWh Densité énergétique : 93 Wh/kg Poids : 107 kg Rendement de charge 90% 3000 cycles à maximum 80% de DOD Durée de vie égale à celle du véhicule |
| [NOTTER, 2010] | Batterie dans un VE type Golf | Km parcouru | <ul style="list-style-type: none"> • <u>Périmètre</u> Cycle de vie de la batterie • <u>Allocations</u> Totalité des | <ul style="list-style-type: none"> • <u>ACV</u> Effet de serre Demande d'énergie Ecoindicateur Epuisement | <ul style="list-style-type: none"> • <u>Véhicule thermique</u> Consommation (gasoil) : 5.2 L/ 100 km sur cycle NEDC • <u>Véhicule électrique</u> Consommation basées sur des considérations théoriques et les performances des véhicules | Lithium manganèse (LiMn ₂ O ₄), 300 kg, 0.114 kWh / kg Durée de vie égale à celle du véhicule (150 000 km) |

| | Systeme | Choix méthodologiques | | | Données | |
|--------------------------|----------|-----------------------|---|---------------------------|--|--------------------------------|
| Références, objectif(s), | Véhicule | UF | Périmètre et allocation | Impact considérés | consommations du véhicule et hypothèses liées à l'usage du véhicule | Caractéristiques des batteries |
| | | | impacts liés à l'extraction du lithium sont imputés au système même s'il y a des coproduits IDEM pour le recyclage | des ressources abiotiques | actuels → 170 Wh/km Consommation obtenues via un modèle Calculées à partir des principes de la dynamique Cycle NEDC Auxiliaires Freinage récupératif Mix Europe (sensibilité hydraulique) Durée de vie véhicule : 150 000 km | |

Annexe 4 : Adaptation des cycles Artémis route t Artémis urbain

Les véhicules à tester, bridés à 45 km/h, ne peuvent pas réaliser certains points du cycle.

Les véhicules doivent effectuer le même nombre de kilomètres qu'il y en a dans le cycle Artémis.

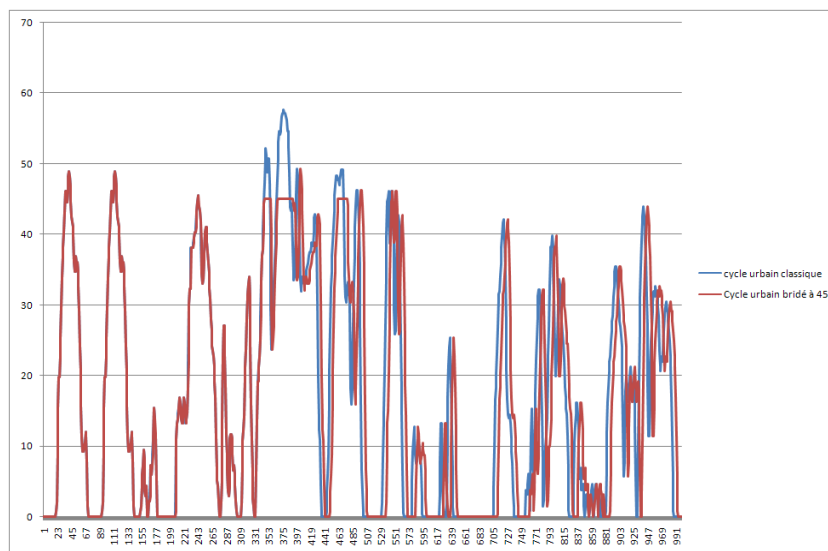


Figure 53 : Adaptation du cycle Artémis urbain pour une vitesse maximale de 45 km/h

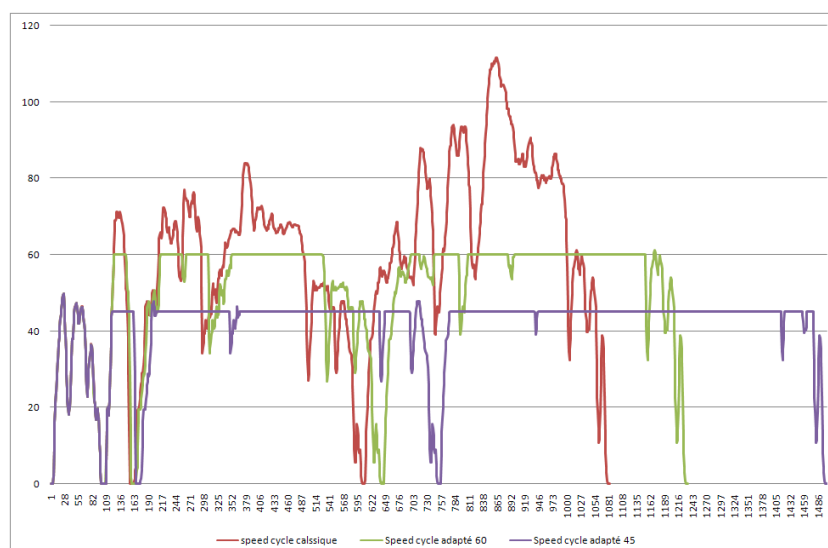


Figure 54 : Adaptation du cycle Artémis route pour des vitesses maximales de 60 et 45 km/h

Annexe 5 : Le cycle expérimental

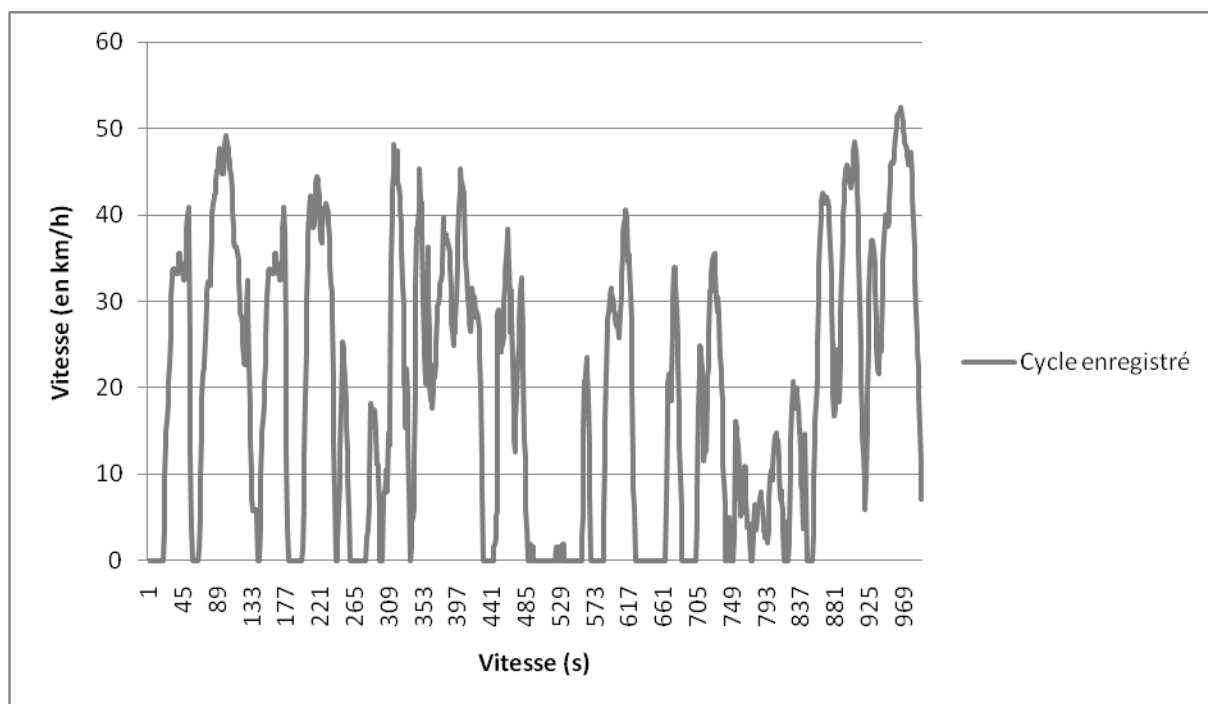


Figure 55 : Diagramme vitesse / temps du cycle enregistré

| | Cycle enregistré | Cycle Artemis urbain |
|--------------------------------|------------------|----------------------|
| Vitesse moyenne (km/h) | 19 | 18 |
| Vitesse maximale (km/h) | 52 | 58 |
| Temps d'arrêt (%) | 26 | 28 |
| Kilomètres parcourus | 5 | 5 |

Tableau 40 : Comparaison des caractéristiques du cycle Artémis urbain et du cycle enregistré

Annexe 6: Evaluation des incertitudes sur les mesures de consommations spécifiques d'électricité du VE

Les incertitudes des résultats obtenus sont très difficiles à calculer compte tenu de l'importance de la chaîne de mesure (Coefficients μ , A , et C_d déduits d'essais sur piste, paramétrage du banc, conducteur lors des essais, précisions des capteurs, ect.). Il faut ajouter que les conditions de mesures varient tout au long des essais (conducteur, niveau de charge de la batterie, température, pression des pneus etc.), il n'y a donc pas répétabilité.

Ces raisons expliquent pourquoi la plupart des études faisant référence à des essais sur banc à rouleau n'en précise pas les incertitudes. [BEER, 2004] donne une première idée de l'incertitude en étudiant les variations inter-essais, et considère que la distribution des résultats obtenus sur banc à rouleau répond à une loi normale. On procède de même.

Les contraintes, coûts, délais, et disponibilités ont conduit à limiter le nombre d'essais par cycle testé. Aussi, les cycles ont été répétés 6 fois chacun. Un seul a été répété un plus grand nombre de fois : le cycle Artemis urbain, car il a été également utilisés pour déterminer l'autonomie du véhicule en conditions représentatives de circulation.

- ⇒ **L'incertitude des mesures de consommations spécifiques d'électricité sur banc à rouleau est considéré identique quelque soit le cycle testé, et est donc déterminé à partir des variations inter-essais obtenues pour le cycle Artemis Urbain. L'incertitude obtenue sera généralisée à l'ensemble de nos mesures de consommation spécifiques de consommation.**

Le tableau X présente les résultats obtenus pour tous les cycles Artemis urbains testés et en calcule la moyenne M et l'écart type σ .

- Dans l'intervalle $[M-\sigma, M+\sigma]$, on trouve 74% des mesures de consommation spécifiques d'électricité obtenues.
- Dans l'intervalle $[M-2\sigma, M+2\sigma]$, on trouve 100% des mesures de consommation spécifiques d'électricité obtenues.

Compte tenu du faible nombre de mesures (23), on choisit de considérer l'intervalle de confiance qui comprend toutes nos mesures ($\sigma=2$).

- ⇒ **On considère alors que l'ensemble des mesures de consommations sera compris entre 81 et 95 Wh par kilomètres, ce qui conduit à une incertitude de l'ordre de $\pm 8\%$ par rapport à la moyenne des mesures.**

Il faut également ajouter l'incertitude des appareils de mesures, dont précision était de 2% pour l'intensité et 1% pour la tension. La précision de la mesure de consommation est donc de 3%.

En conséquence, on évalue à 10%, l'incertitude sur les résultats de consommations spécifique d'électricité mesurés sur le VE.

| | NOM DE FICHIER | Conso Wh/km |
|---|------------------|----------------|
| Test du cycle Artemis urbain | 460_2_arturb | 94.56 |
| | 460_5_arturb | 88.48 |
| | 460_11_arturb | 82.64 |
| | 460_8_arturb | 89.84 |
| | 460_14_arturb | 88.22 |
| Test d'autonomie sur le cycle Artemis urbain | 460_31_arturb_1 | 91.14 |
| | 460_32_arturb_2 | 93.57 |
| | 460_33_arturb_3 | 89.27 |
| | 460_34_arturb_4 | 94.18 |
| | 460_35_arturb_5 | 87.64 |
| | 460_36_arturb_6 | 87.18 |
| | 460_37_arturb_7 | 86.37 |
| | 460_38_arturb_8 | 92.35 |
| | 460_39_arturb_9 | 84.81 |
| | 460_40_arturb_10 | 86.13 |
| | 460_41_arturb_11 | 86.26 |
| | 460_42_arturb_12 | 85.92 |
| | 460_43_arturb_13 | 84.95 |
| | 460_44_arturb_14 | 83.78 |
| 460_45_arturb_15 | 89.5 | |
| 460_46_arturb_16 | 85.04 | |
| 460_47_arturb_17 | 87.56 | |
| 460_48_arturb_18 | 86.32 | |
| Ecart type | | 3.30658548 |
| Moyenne | | 88.0743478 |
| Ecart type relatif | | 0.03754312 |

Tableau 41: Résultats de consommation obtenus pour le cycle Artemis urbain, moyenne et écart type

Annexe 7 : Détails des résultats pour les tests de consommations du VE sur les différents cycles utilisés

A. Cycles ECE 15

Configuration « mode 60 »

Le tableau 19 présente les résultats obtenus pour le véhicule testé en « mode 60 » sur le cycle ECE 15.

| CYCLE | NOM DE FICHER | Distance parcourue | Vitesse moyenne km/h | Récup intensité Wh | Conso Wh/km | Conso totale Wh |
|----------------------------------|---------------------|--------------------|----------------------|--------------------|--------------|-----------------|
| Charge initiale complète | | | | | | |
| ECE15 | 460_1_ECE15 | 4.16 | 19.18 | 14.5 | 67.4 | 280.17 |
| ECE15 | 460_4_ECE15 | 4.11 | 18.98 | 13.78 | 65.97 | 271.63 |
| ECE15 | 460_10_ECE15 | 4.15 | 19.11 | 14.7 | 65.7 | 272.45 |
| ECE15 | BILAN | 4.14 | 19.09 | 14.33 | 66.36 | 274.75 |
| Décharge initiale 5,5 kWh | | | | | | |
| ECE15 | 460_7_ECE15 | 4.12 | 19 | 13.9 | 63.7 | 262.65 |
| ECE15 | 460_13_ECE15 | 4.14 | 19.07 | 14.33 | 62.52 | 258.7 |
| ECE15 | BILAN | 4.13 | 19.04 | 14.12 | 63.11 | 260.68 |
| Moyenne globale cycle ECE | | | | | | |
| ECE15 | BILAN GLOBAL | 4.14 | 19.07 | 14.24 | 65.06 | 269.12 |

Tableau 42 : Résultats obtenus pour le cycle ECE 15 en "mode 60" et pour différents niveaux de charge

Configuration « mode 45 »

Le tableau 7 présente les résultats obtenus pour le véhicule testé en « mode 45 » sur le cycle ECE 15.

| | Distance (km) | Consommation spécifique (Wh/km) | Récupération intensité (%) |
|--------------------|---------------|---------------------------------|----------------------------|
| 1 | 4,1 | 62,4 | 17,3 |
| 2 | 4,1 | 60,8 | 16,9 |
| 3 | 4,1 | 60,6 | 17,2 |
| 4 | 4,1 | 60,2 | 17,1 |
| Cycle moyen | 4,1 | 61,0 | 17,1 |

Tableau 43 : Résultats obtenus pour le cycle ECE 15 en "mode 45"

Analyses

La configuration 45 km/h consomme moins que la configuration 60 km/h car le profil de vitesse n'a pas été modifié et de ce fait, la distance parcourue est moindre, comme la consommation électrique.

B. Cycles Artémis urbain

Configuration « mode 60 »

Les résultats obtenus pour le véhicule en « mode 60 » sur le cycle Artémis urbain sont présentés dans le tableau 8.

| CYCLE | NOM DE FICHIER | Distance parcourue | Vitesse moyenne km/h | Récup intensité Wh | Conso Wh/km | Conso totale Wh |
|---|---------------------|--------------------|----------------------|--------------------|--------------|-----------------|
| Charge initiale complète | | | | | | |
| Urbain | 460_2_arturb | 4.43 | 17.3 | 16.6 | 94.56 | 419 |
| Urbain | 460_5_arturb | 4.49 | 17.53 | 18 | 88.48 | 397.17 |
| Urbain | 460_11_arturb | 4.47 | 17.47 | 18.7 | 82.64 | 369.7 |
| Urbain | 460_16_arturb | | | | | |
| Urbain | BILAN | 4.46 | 17.43 | 17.77 | 88.56 | 395.29 |
| Décharge initiale 5,5 kWh | | | | | | |
| Urbain | 460_8_arturb | 4.47 | 17.45 | 18.6 | 89.84 | 401.51 |
| Urbain | 460_14_arturb | 4.48 | 17.51 | 17.15 | 88.22 | 395.6 |
| Urbain | BILAN | 4.48 | 17.48 | 17.88 | 89.03 | 398.56 |
| Moyenne globale cycle Artémis urbain | | | | | | |
| Urbain | BILAN GLOBAL | 4.47 | 17.45 | 17.81 | 88.75 | 396.60 |

Tableau 44 : Résultats obtenus pour le cycle Artémis urbain en "mode 60" et pour différents niveaux de charge

Configuration mode 45

Les résultats obtenus pour le véhicule en « mode 45 » sur le cycle Artemis urbain sont présentés dans le tableau 9.

| | Distance (km) | Consommation spécifique (Wh/km) | Récupération intensité (%) |
|--------------------|------------------|---------------------------------------|-------------------------------|
| 1 | 4,6 | 83,4 | 21,3 |
| 2 | 4,6 | 81,7 | 20,8 |
| 3 | 4,6 | 86,3 | 20,3 |
| 4 | 4,6 | 83,5 | 19,2 |
| Cycle moyen | 4,6 | 83,7 | 20,4 |

Tableau 45: Résultats obtenus pour le cycle Artémis urbain en "mode 45"

Analyse

La configuration 45 km/h consomme légèrement moins. Cette différence s'explique par le lissage du cycle pour les vitesses supérieures à 45 km/h, qui a diminué les transitoires.

C. Cycles Artémis routier

Configuration mode 60

Les résultats obtenus pour le véhicule en « mode 60 » sur le cycle Artemis routier sont présentés dans le tableau 10.

| CYCLE ROUTIER | NOM DE FICHER | Distance parcourue | Vitesse moyenne km/h | Récup intensité Wh | Conso Wh/km | Conso totale Wh |
|--|-------------------------|-----------------------|----------------------------|--------------------------|----------------|-----------------------|
| Charge initiale complète | | | | | | |
| bridé à 60 km/h | 460_3_artroad | 12.42 | 51.96 | 5 | 83.22 | 1034.14 |
| bridé à 60 km/h | 460_6_artroad | 12.4 | 51.87 | 3.6 | 87.57 | 1061.46 |
| bridé à 60 km/h | 460_12_artroad | 12.4 | 51.79 | 3.9 | 82.21 | 1019.52 |
| bridé à 60 km/h | BILAN | 12.41 | 51.87 | 4.17 | 84.33 | 1038.37 |
| Décharge initiale 5,5 kWh | | | | | | |
| ridé à 60 km/h | 460_9_artroad | 12.41 | 51.85 | 4 | 80.84 | 1003.69 |
| bridé à 60 km/h | 460_15_artroad | 12.4 | 51.79 | 3.74 | 80.81 | 1002.13 |
| bridé à 60 km/h | BILAN | 12.41 | 51.82 | 3.87 | 80.83 | 1002.91 |
| Moyenne globale cycle Artémis routier | | | | | | |
| bridé à 60 km/h | BILAN GLOBAL | 12.41 | 51.85 | 4.05 | 82.93 | 1024.19 |

Tableau 46: Résultats obtenus pour le cycle Artémis routier en mode 60 et avec différents niveaux de charge

Configuration mode 45

Les résultats obtenus pour le véhicule en « mode 45 » sur le cycle Artémis routier sont présentés dans le tableau 11.

| | Distance (km) | Consommation spécifique (Wh/km) | Récupération intensité (%) |
|--------------------|------------------|---------------------------------------|-------------------------------|
| 1 | 15,1 | 61,7 | 2,4 |
| 2 | 15,1 | 62,6 | 2,1 |
| 3 | 15,1 | 62,9 | 2,0 |
| 4 | 15,1 | 62,2 | 2,3 |
| Cycle moyen | 15,1 | 62,4 | 2,2 |

Tableau 47: Résultats obtenus pour le cycle Artémis routier en "mode 45"

Analyse

Ces deux configurations sont différentes par la vitesse maximale atteinte.. Pour ces deux cycles les transitoires représentent une très faible partie du cycle total, d'où les faibles taux de récupération, qui ont lieu lors des phases de décélération.

D. Cycle enregistré « mode 60 »

La voiture électrique a été testée sur le cycle enregistré 6 fois. Les résultats sont présentés dans le tableau 12.

| | Distance (km) | Consommation Wh | Consommation spécifique (Wh/km) | Récupération intensité |
|--------------------|------------------|--------------------|---------------------------------------|---------------------------|
| 1 | 5,37 | 450,58 | 83,95 | 17,8% |
| 2 | 5,41 | 439,51 | 81,25 | 18,2% |
| 3 | 5,44 | 418,13 | 76,90 | 19,5% |
| 4 | 5,41 | 427,89 | 79,12 | 18,6% |
| 5 | 5,43 | 446,36 | 82,27 | 18,3% |
| 6 | 5,39 | 431,47 | 79,99 | 18,7% |
| Cycle moyen | 5,41 | 435,66 | 80,58 | 18,5% |

Tableau 48: Résultats obtenus pour le cycle enregistré en "mode 60"

Les tests sur le cycle enregistré donnent des résultats homogènes.

Annexe 8 : Détails des résultats pour les tests de consommations du VT sur les différents cycles utilisés

A. Cycle ECE15

Départ moteur froid

Le tableau n°18 présente les résultats obtenus sur le cycle ECE 15, départ moteur froid.

| | Essai 1 | Essai 2 | Moyenne |
|------------------------------|---------|---------|---------|
| Distance (km) | 3.974 | 4.021 | 3.998 |
| CO (g/km) | 0.481 | 0.725 | 0.603 |
| HC (g/km) | 0.091 | 0.099 | 0.095 |
| NOx (g/km) | 0.601 | 0.569 | 0.585 |
| CO₂ (g/km) | 96.414 | 95.262 | 95.838 |
| Particules (g/km) | 0.016 | 0.015 | 0.015 |
| Conso (l/100km/ | 3.66 | 3.63 | 3.64 |

Tableau 49 : Emissions mesurées sur cycle ECE15 avec un départ moteur froid

Commentaires

La distance théorique du cycle ECE15 est de 4.052 km, les résultats montrent que le véhicule n'a pu suivre le cycle imposé. Cet écart est dû au fait que le véhicule, limité à 45 km/h, avait des difficultés à suivre le cycle dans la phase de roulage à 50 km/h.

La répétition des deux essais départ moteur froid montre des résultats homogènes avec une très faible dispersion.

Départ moteur chaud

Le tableau n°19 présente les résultats obtenus pour le cycle ECE15, moteur chaud.

| | ECE départ chaud |
|------------------------------|------------------|
| Distance (km) | 4.01 |
| CO (g/km) | 0.399 |
| HC (g/km) | 0.067 |
| NOx (g/km) | 0.605 |
| CO₂ (g/km) | 89.824 |
| Particules (g/km) | 0.014 |
| Conso (l/100km/ | 3.4 |

Tableau 50 : Emissions mesurées sur cycle ece15 avec Départ moteur chaud

B. Cycle Artémis urbain

Le tableau n°20 présente l'ensemble des résultats obtenus pour le cycle Artémis urbain.

| | Artemis urbain (45km/h) | | Moyenne |
|------------------------------|-------------------------|---------|---------------|
| | Essai 1 | Essai 2 | |
| Distance | 4.49 | 4.521 | 4.506 |
| CO (g/km) | 0.411 | 0.327 | 0.369 |
| HC (g/km) | 0.095 | 0.078 | 0.087 |
| NOx (g/km) | 0.224 | 0.223 | 0.224 |
| CO₂ (g/km) | 93.397 | 96.025 | 94.711 |
| Particules (g/km) | 0.019 | 0.020 | 0.020 |
| Consommation l/100km | 3.54 | 3.63 | 3.58 |

Tableau 51 : Emissions mesurées sur le cycle Artémis urbain

C. Cycle Artémis routier limité 45 km/h

Le tableau n°21 présente l'ensemble des résultats obtenus pour le cycle Artémis routier bridé à 45 km/h.

| | Artémis routier (45km/h) | | Moyenne |
|------------------------------|--------------------------|---------|---------------|
| | Essai 1 | Essai 2 | |
| Distance | 14.482 | 14.462 | 14.472 |
| CO (g/km) | 0.350 | 0.404 | 0.377 |
| HC (g/km) | 0.045 | 0.049 | 0.047 |
| NOx (g/km) | 0.334 | 0.314 | 0.324 |
| CO₂ (g/km) | 74.585 | 74.208 | 74.397 |
| Particules (g/km) | 0.016 | 0.015 | 0.016 |
| Consommation l/100km | 2.82 | 2.81 | 2.82 |

Tableau 52: Emissions mesurées sur le cycle Artémis routier limité à 45 km/H

Analyse

Bien que le véhicule soit très souvent à ses performances maximales, on constate une légère différence entre le cycle routier et le cycle urbain. Ce dernier présente en effet plus de transitoire, générant des consommations et émissions de CO₂ plus élevées.

Annexe 9 : Résultats des modélisations

A. Simulation VE batteries Plomb-acide, Scénario S1:

| DONNEES ENTREES DANS LE MODELE | | | | | | | |
|--|---|--|---------------------------------|------------------------------|--|---|----------------------------|
| Véhicule hors batterie | | | | | | | |
| Véhicule considéré | Masse hors batterie (kg) | Masse supplémentaire considérée (personne + bagages) | Masse totale hors batterie (kg) | K, Coefficient de frottement | Cd, Résistance aérodynamique du véhicule | A, Surface frontale du véhicule (m ²) | |
| MICROCAR | 597 | 100 | 697 | 0,007 | 0,51 | 1,5 | |
| Batterie considérée | | | | | | | |
| Chimie de batterie | Capacité (W) | Masse (kg) | Rdt (%) | DV (ans) | Etat de charge initial (%) | Etat de charge minimum (%) | Etat de charge maximum (%) |
| Plomb-acide | 8 | 200 | 75 | 2-5 | 100 | 60 | 100 |
| Rendement chaîne de traction | | | | | | | |
| Transmission | Moteur électrique | Onduleur | Batterie | Chargeur | Taux freinage récupératif | | |
| 92 | 91 | 96 | 75 | 90 | 60 | | |
| Usage considéré | | | | | | | |
| Cycle ARTEMIS Urbain bridé à 45 km/h (%) | Cycle ARTEMIS Route bridé à 45 km/h (%) | Cycle ARTEMIS Autoroute (%) | Puissance auxiliaires (W) | Mix énergétique considéré | Vitesse max (km/h) | | |
| 41 | 59 | 0 | 0 | France | 45 | | |
| CONSOMMATION AU RESEAU OBTENUES VIA LE MODELE | | | | | | | |
| Cycle ARTEMIS Urbain bridé à 45 km/h (Wh/km) | Cycle ARTEMIS Route bridé à 45 km/h (Wh/km) | Conso. retenue comme donnée ACV | | | Autonomie (km) | | |
| 153.5 | 81.3 | 111 | | | 70.6 | | |

B. Simulation VE batteries Plomb-acide avec auxiliaires, Scénario S1

| DONNEES ENTREES DANS LE MODELE | | | | | | | |
|--|---|--|---------------------------------|------------------------------|--|---|----------------------------|
| Véhicule hors batterie | | | | | | | |
| Véhicule considéré | Masse hors batterie (kg) | Masse supplémentaire considérée (personne + bagages) | Masse totale hors batterie (kg) | K, Coefficient de frottement | Cd, Résistance aérodynamique du véhicule | A, Surface frontale du véhicule (m ²) | |
| MICROCAR | 597 | 100 | 697 | 0,007 | 0,51 | 1,5 | |
| Batterie considérée | | | | | | | |
| Chimie de batterie | Capacité (W) | Masse (kg) | Rdt (%) | DV (ans) | Etat de charge initial (%) | Etat de charge minimum (%) | Etat de charge maximum (%) |
| Plomb-acide | 8 | 200 | 75 | 2-5 | 100 | 60 | 100 |
| Rendement chaîne de traction | | | | | | | |
| Transmission | Moteur électrique | Onduleur | Batterie | Chargeur | Taux freinage récupératif | | |
| 92 | 91 | 96 | 75 | 90 | 60 | | |
| Usage considéré | | | | | | | |
| Cycle ARTEMIS Urbain bridé à 45 km/h (%) | Cycle ARTEMIS Route bridé à 45 km/h (%) | Cycle ARTEMIS Autoroute (%) | Puissance auxiliaires (W) | Mix énergétique considéré | Vitesse max (km/h) | | |
| 41 | 59 | 0 | 1000 | France | 45 | | |
| CONSOMMATION AU RESEAU OBTENUES VIA LE MODELE | | | | | | | |
| Cycle ARTEMIS Urbain bridé à 45 km/h (Wh/km) | Cycle ARTEMIS Route bridé à 45 km/h (Wh/km) | Conso. retenue comme donnée ACV | | | Autonomie (km) | | |
| 233.6 | 116.5 | 164.5 | | | 48.45 | | |

C. Simulation VE batteries Plomb-acide version vitesse max 60 km/h, Scénario S1

DONNEES ENTREES DANS LE MODELE

Véhicule hors batterie

| Véhicule considéré | Masse hors batterie (kg) | Masse supplémentaire considérée (personne + bagages) | Masse totale hors batterie (kg) | K, Coefficient de frottement | Cd, Résistance aérodynamique du véhicule | A, Surface frontale du véhicule (m ²) |
|--------------------|--------------------------|--|---------------------------------|------------------------------|--|---|
| MICROCAR | 597 | 100 | 697 | 0,007 | 0,51 | 1,5 |

Batterie considérée

| Chimie de batterie | Capacité (W) | Masse (kg) | Rdt (%) | DV (ans) | Etat de charge initial (%) | Etat de charge minimum (%) | Etat de charge maximum (%) |
|--------------------|--------------|------------|---------|----------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Plomb-acide | 8 | 200 | 75 | 2-5 | 100 | 60 | 100 |

Rendement chaîne de traction

| Transmission | Moteur électrique | Onduleur | Batterie | Chargeur | Taux freinage récupératif |
|--------------|-------------------|----------|----------|----------|---------------------------|
| 92 | 91 | 96 | 75 | 90 | 60 |

Usage considéré

| Cycle ARTEMIS Urbain bridé à 45 km/h (%) | Cycle ARTEMIS Route bridé à 45 km/h (%) | Cycle ARTEMIS Autoroute (%) | Puissance auxiliaires (W) | Mix énergétique considéré | Vitesse max (km/h) |
|--|---|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------|
| 41 | 59 | 0 | 0 | France | 60 |

CONSOMMATION AU RESEAU OBTENUES VIA LE MODELE

| Cycle ARTEMIS Urbain bridé à 45 km/h (Wh/km) | Cycle ARTEMIS Route bridé à 45 km/h (Wh/km) | Conso. retenue comme donnée ACV | Autonomie (km) |
|--|---|---------------------------------|----------------|
| 160.5 | 112.5 | 132 | 55.6 |

D. Simulation VE batteries Plomb-acide version vitesse max 60 km/h avec 1 kW d'auxiliaires, Scénario S1

| DONNEES ENTREES DANS LE MODELE | | | | | | | |
|--|---|--|---------------------------------|------------------------------|--|---|----------------------------|
| Véhicule hors batterie | | | | | | | |
| Véhicule considéré | Masse hors batterie (kg) | Masse supplémentaire considérée (personne + bagages) | Masse totale hors batterie (kg) | K, Coefficient de frottement | Cd, Résistance aérodynamique du véhicule | A, Surface frontale du véhicule (m ²) | |
| MICROCAR | 597 | 100 | 697 | 0,007 | 0,51 | 1,5 | |
| Batterie considérée | | | | | | | |
| Chimie de batterie | Capacité (W) | Masse (kg) | Rdt (%) | DV (ans) | Etat de charge initial (%) | Etat de charge minimum (%) | Etat de charge maximum (%) |
| Plomb-acide | 8 | 200 | 75 | 2-5 | 100 | 60 | 100 |
| Rendement chaîne de traction | | | | | | | |
| Transmission | Moteur électrique | Onduleur | Batterie | Chargeur | Taux freinage récupératif | | |
| 92 | 91 | 96 | 75 | 90 | 60 | | |
| Usage considéré | | | | | | | |
| Cycle ARTEMIS Urbain (%) | Cycle ARTEMIS Route bridé à 60 km/h (%) | Cycle ARTEMIS Autoroute (%) | Puissance auxiliaires (W) | Mix énergétique considéré | Vitesse max (km/h) | | |
| 41 | 59 | 0 | 0 | France | 60 | | |
| CONSOMMATION AU RESEAU OBTENUES VIA LE MODELE | | | | | | | |
| Cycle ARTEMIS Urbain bridé à 45 km/h (Wh/km) | Cycle ARTEMIS Route bridé à 60 km/h (Wh/km) | Conso. retenue comme donnée ACV | | Autonomie (km) | | | |
| 240.0 | 141.0 | 181.6 | | 41.8 | | | |

E. Simulation VE batteries Nickel-Métal-Hydrure version vitesse max 45 km/h, Scénario S1

DONNEES ENTREES DANS LE MODELE

Véhicule hors batterie

| Véhicule considéré | Masse hors batterie (kg) | Masse supplémentaire considérée (personne + bagages) | Masse totale hors batterie (kg) | K, Coefficient de frottement | Cd, Résistance aérodynamique du véhicule | A, Surface frontale du véhicule (m ²) |
|--------------------|--------------------------|--|---------------------------------|------------------------------|--|---|
| MICROCAR | 597 | 100 | 697 | 0,007 | 0,51 | 1,5 |

Batterie considérée

| Chimie de batterie | Capacité (W) | Masse (kg) | Rdt (%) | DV (ans) | Etat de charge initial (%) | Etat de charge minimum (%) | Etat de charge maximum (%) |
|--------------------|--------------|------------|---------|----------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| NiMH | 8 | 114 | 75 | 8 | 100 | 10 | 100 |

Rendement chaîne de traction

| Transmission | Moteur électrique | Onduleur | Batterie | Chargeur | Taux freinage récupératif |
|--------------|-------------------|----------|----------|----------|---------------------------|
| 92 | 91 | 96 | 75 | 90 | 60 |

Usage considéré

| Cycle ARTEMIS Urbain bridé à 45 km/h (%) | Cycle ARTEMIS Route bridé à 45 km/h (%) | Cycle ARTEMIS Autoroute (%) | Puissance auxiliaires (W) | Mix énergétique considéré | Vitesse max (km/h) |
|--|---|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------|
| 41 | 59 | 0 | 0 | France | 60 |

CONSOMMATION AU RESEAU OBTENUES VIA LE MODELE

| Cycle ARTEMIS Urbain bridé à 45 km/h (Wh/km) | Cycle ARTEMIS Route bridé à 45 km/h (Wh/km) | Conso. retenue comme donnée ACV | Autonomie (km) |
|--|---|---------------------------------|----------------|
| 140.5 | 76.8 | 102.9 | 113 |

F. Simulation VE batteries Lithium fer phosphate version vitesse max 60 km/h, Scénario S1

| DONNEES ENTREES DANS LE MODELE | | | | | | | |
|--|--|---|--|-------------------------------------|---|--|-----------------------------------|
| Véhicule hors batterie | | | | | | | |
| Véhicule considéré | Masse hors batterie (kg) | Masse supplémentaire considérée (personne + bagages) | Masse totale hors batterie (kg) | K, Coefficient de frottement | Cd, Résistance aérodynamique du véhicule | A, Surface frontale du véhicule (m²) | |
| MICROCAR | 597 | 100 | 697 | 0,007 | 0,51 | 1,5 | |
| Batterie considérée | | | | | | | |
| Chimie de batterie | Capacité (kW) | Masse (kg) | Rdt (%) | DV (ans) | Etat de charge initial (%) | Etat de charge minimum (%) | Etat de charge maximum (%) |
| Li-Ion | 8 | 67 | 95 | 5-10 | 100 | 10 | 100 |
| Rendement chaîne de traction | | | | | | | |
| Transmission | Moteur électrique | Onduleur | Batterie | Chargeur | Taux freinage récupératif | | |
| 92 | 91 | 96 | 95 | 90 | 60 | | |
| Usage considéré | | | | | | | |
| Cycle ARTEMIS Urbain bridé à 45 km/h (%) | Cycle ARTEMIS Route bridé à 45 km/h (%) | Cycle ARTEMIS Autoroute (%) | Puissance auxiliaires (W) | Mix énergétique considéré | Vitesse max (km/h) | | |
| 41 | 59 | 0 | 0 | France | 45 | | |
| CONSOMMATION AU RESEAU OBTENUES VIA LE MODELE | | | | | | | |
| Cycle ARTEMIS Urbain bridé à 45 km/h (Wh/km) | Cycle ARTEMIS Route bridé à 45 km/h (Wh/km) | Conso. retenue comme donnée ACV | | Autonomie (km) | | | |
| 100.1 | 60 | 76 | | 120 | | | |

Annexe 10 : Extrait du classeur de données pour exemple - Données d'inventaires pour la production et l'élimination de la batterie Plomb-acide

Cette annexe constitue l'inventaire de données utilisées pour effectuer l'ACV de la batterie Plomb-acide. L'ensemble des données est ramené au 25 kg de batterie produits et éliminés.

A. Source de données

Les sources de données utilisées pour cet inventaire sont les suivantes.

- Rapport Bio Intelligence Service (2004)
- Ressource internet
- Données de base TB

Ces différents documents sont conservés et consultables aux Renardières dans la boîte « BATTERIES – ML Picherit ».

B. Matériaux constitutifs

| | Constituants | Répartition (%) | Masse (kg) |
|----|------------------|-----------------|------------|
| 1 | Antimoine | 0.7 | 0.175 |
| 2 | Arsenic | 0.03 | 0.0075 |
| 3 | Cuivre | 0.01 | 0.0025 |
| 4 | Verre | 0.9 | 0.225 |
| 5 | Plomb | 62 | 15.5 |
| 6 | Oxygène | 2 | 0.5 |
| 7 | Polyéthylène | 1.8 | 0.45 |
| 8 | Polypropylène | 6.4 | 1.6 |
| 9 | Acide sulfurique | 9.9 | 2.475 |
| 10 | Eau déionisée | 16 | 4 |

Tableau 53 : Données d'inventaire des matériaux constitutifs d'une batterie

Le Plomb

85% du Plomb contenu dans les batteries est du Plomb de seconde fusion. Or, le Plomb de seconde fusion est complètement recyclé et il y a donc une boucle fermée (le recyclage du Plomb de première fusion compense les faibles pertes générées par le rendement du recyclage).

Le rendement actuel de récupération de Plomb est de 99%.

Celui -ci est soit réinjecté dans la filière de fabrication de batteries Plomb-acide (recyclage en boucle fermée), soit utilisé dans d'autres filières (recyclage en boucle ouverte).

Hypothèse retenue (cf. schéma)

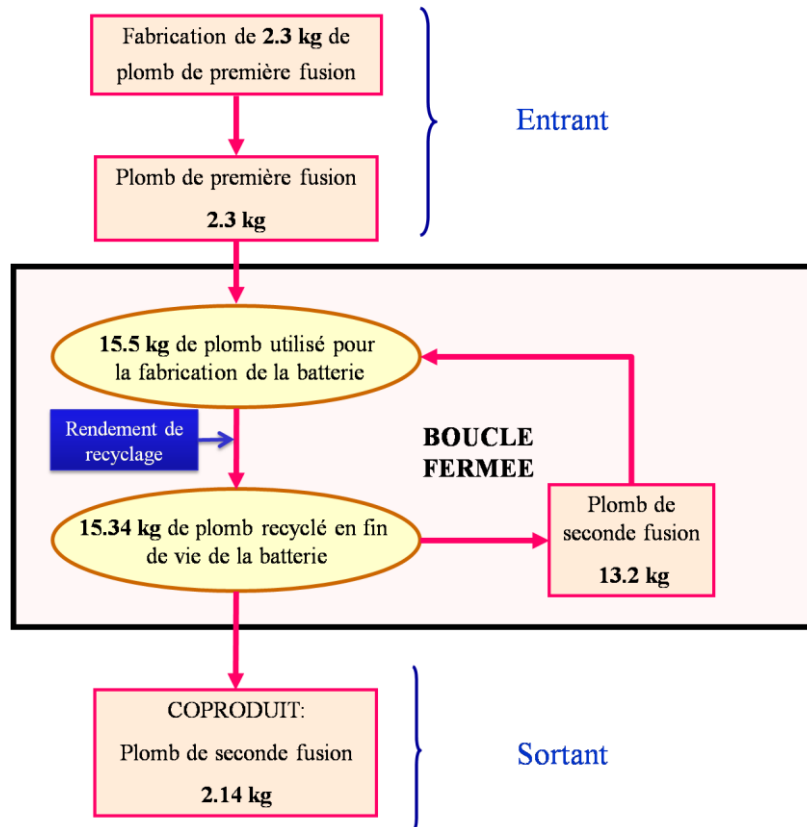


Figure 56 : Hypothèse retenue: recyclage en boucle fermée du Plomb

Dans un premier temps, l'ensemble des impacts liés à la production de ce Plomb de seconde fusion (recyclage) sera attribué au cycle de vie de la batterie. 100% du traitement du matériau recyclé est imputé au cycle de vie de la batterie. Ce scénario est le plus pénalisant. On estime par ailleurs que 100% des batteries seront collectées, puis recyclées.

L'antimoine et l'arsenic :

Il n'y a pas de base de données Ecoinvent qui reprend les impacts et les inventaires liés à l'extraction de l'antimoine et de l'arsenic. Pour le moment, seuls les flux ont été pris en compte. Toutefois, étant donné les faibles quantités en jeu, l'impact lié à leurs extractions et à leur transport doit être limité. Poste négligé.

Le polyéthylène :

Après recherche, les « boîtes à batteries » sont constituées de polyéthylène haute densité (HDPE).

C. Données relatives à la production et au recyclage

Données de production

Les entrants et sortants liés à la production d'1 kg de batterie sont répertoriés dans le tableau suivant :

| Energie MJ/kg de batterie | |
|------------------------------------|----------|
| Chaleur | 1.671 |
| GPL | 0.137 |
| Electricité | 4.793 |
| Pétrole | 0.102 |
| Entrants | |
| Eau | 135 kg |
| Emissions kg/kg de batterie | |
| Plomb (air) | 2.223e-4 |
| Plomb (eau) | 0.008 |

Tableau 54 : Consommations / Emissions liées à la production d'un kg de batterie Plomb-acide

Fin de vie

La filière de traitement des batteries Plomb-acide en fin de vie est bien structurée, et économiquement rentable grâce à la production de Plomb de seconde fusion. Les entrants et sortants considérés pour l'élimination de la batterie sont les suivants [Données rapport Bio Intelligence service, 2004]

| Energie MJ/kg de batterie | |
|------------------------------------|-----------|
| GPL | 1.954 |
| Electricité | 0.875 |
| Emissions kg/kg de batterie | |
| Particules (air) | 1.69 e-5 |
| Plomb (air) | 5.15 e-6 |
| Cadmium (air) | 3.05 e-8 |
| Cuivre (air) | 5.76 e-8 |
| Zinc(air) | 1.92 e-7 |
| Arsenic (air) | 1.53 e-8 |
| Nox (air) | 0.24 e-3 |
| Sox (air) | 2.25 e-3 |
| DCO (eau) | 9.52 e-5 |
| Antimoine (eau) | 3.64 e-7 |
| Mercuré (eau) | 1.84 e-10 |
| Nickel (eau) | 2.33 e-8 |
| Plomb (eau) | 7.63 e-8 |
| Cadmium (eau) | 5.08 e-9 |
| Cuivre (eau) | 6.78 e-9 |
| Zinc (eau) | 3.05 e-8 |

Tableau 55 : Emissions / Consommations liées au recyclage des batteries Plomb-acide

D. Fiche d'inventaire

| | Sources de données | | | Quantité | Module utilisé |
|-------------------------|---|--|--|-----------|--|
| Production | | | | | |
| Antimoine | Rapport Bio Intelligence Service (2004) | | | 0.175 | Emissions (entrée comme simple flux) antimony (Sb) , (s) |
| Arsenic | Rapport Bio Intelligence Service (2004) | | | 0.0075 | Emissions (entrée comme simple flux) Arsenic (as), (s) |
| Cuivre | Rapport Bio Intelligence Service (2004) | | | 0.0025 | E, Copper, Primary at refinery |
| Verre | Rapport Bio Intelligence Service (2004) | | | 0.225 | E, Flat glass, production |
| Plomb | Rapport Bio Intelligence Service (2004) | | | 2.3 | E, lead, at regional storage, production |
| Oxygène | Rapport Bio Intelligence Service (2004) | | | 0.5 | E, Oxygen, O2, production |
| Polyéthylène | Rapport Bio Intelligence Service (2004) | | | 0.45 | E, Polyéthylène, granulate at plant, production |
| Polypropylène | Rapport Bio Intelligence Service (2004) | | | 1.6 | E, Polypropylène, granulate at plant, production |
| Acide sulfurique | Rapport Bio Intelligence Service (2004) | | | 2.475 | E, Sulfuric acid, at plant, Europe |
| Eau désionisée | Rapport Bio Intelligence Service (2004) | | | 4 | E, water, desionised at plant, production |
| Chaleur | Rapport Bio Intelligence Service (2004) | | | 41.8 MJ | E, Heat Natural gas, at industrial furnace, low nox>100 kWh |
| GPL | Rapport Bio Intelligence Service (2004) | | | 0.074 kg | E, liquified petroleum gas, at service station |
| Electricité | Rapport Bio Intelligence Service (2004) Hypothèse : Batterie produite | | | 119.82 MJ | E, Electricity, medium voltage, at grid, Chine 2005 |

| | Sources de données | Quantité | Module utilisé |
|-----------------------------|--|-----------------|--|
| | en Europe | | |
| Pétrole | Rapport Bio Intelligence Service (2004) | 0.06 kg | E, Petrol unleaded at regional storage (RER) |
| Eau | Rapport Bio Intelligence Service (2004) | 3375 L | Water river (entré comme simple flux) |
| Plomb (air) | Rapport Bio Intelligence Service (2004) | 5.5 g | Emissions (entré comme simple flux) |
| Plomb (eau) | Rapport Bio Intelligence Service (2004) | 200 g | Emissions (entré comme simple flux) |
| Elimination batterie | | | |
| GPL | | 1.06 MJ | E, liquified petroleum gas, at service station |
| Electricité | Rapport Bio Intelligence Service (2004) Hypothèse : Batterie éliminée en Europe | 6.16 kWh | E, Electricity, medium voltage, at grid, RER |
| Particules (air) | Rapport Bio Intelligence Service (2004) | 0.422 g | Emissions (entrée comme simple flux) |
| Plomb (air) | Rapport Bio Intelligence Service (2004) | 0.129 g | Emissions (entrée comme simple flux) |
| Cadmium (air) | Rapport Bio Intelligence Service (2004) | 0.0008 g | Emissions (entrée comme simple flux) |
| Cuivre (air) | Rapport Bio Intelligence Service (2004) | 0.0014 g | Emissions (entrée comme simple flux) |
| Zinc(air) | Rapport Bio Intelligence Service (2004) | 0.0048 g | Emissions (entrée comme simple flux) |
| Arsenic (air) | Rapport Bio Intelligence Service (2004) | 0.00038 g | Emissions (entrée comme simple flux) |
| Nox (air) | Rapport Bio Intelligence Service (2004) | 6 g | Emissions (entrée comme simple flux) |
| Sox (air) | Rapport Bio Intelligence Service (2004) | 56.25 g | Emissions (entré comme simple flux) |
| DCO (eau) | Rapport Bio Intelligence | 2.38 g | Emissions (entrée comme simple flux) |

| | Sources de données | Quantité | Module utilisé |
|------------------------|--|-----------------|---|
| | Service (2004) | | |
| Antimoine (eau) | Rapport Bio Intelligence Service (2004) | 0.0091 g | Emissions (entrée comme simple flux) |
| Mercure (eau) | Rapport Bio Intelligence Service (2004) | 0.00000 46 g | Emissions (entrée comme simple flux) |
| Nickel (eau) | Rapport Bio Intelligence Service (2004) | 0.0006 g | Emissions (entrée comme simple flux) |
| Plomb (eau) | Rapport Bio Intelligence Service (2004) | 0.002 g | Emissions (entrée comme simple flux) |
| Cadmium (eau) | Rapport Bio Intelligence Service (2004) | 0.00013 g | Emissions (entrée comme simple flux) |
| Cuivre (eau) | Rapport Bio Intelligence Service (2004) | 0.00017 g | Emissions (entrée comme simple flux) |
| Zinc (eau) | Rapport Bio Intelligence Service (2004) | 0.0008 g | Emissions (entrée comme simple flux) |

Annexe 11 : Impact des incertitudes des résultats de consommations obtenus lors des essais sur le bilan Effet de Serre (VE testé, batterie lithium-fer-phosphate)

⇒ Objectif

Il s'agit dans cette annexe, d'analyser l'impact des incertitudes des résultats de consommations obtenus lors des essais sur le bilan Effet de Serre.

Le véhicule étudié (puissance moteur 4 kW, capacité de batterie 8 kW, batterie lithium-fer-phosphate) a été testé en mode 45 (vitesse maximale = 45 km/h) et en mode 60 (vitesse maximale = 60 km/h). Il convient de rappeler les limites de l'inventaire de la phase d'élimination des batteries du fait du peu de données disponibles. En conséquence l'impact potentiel lié à cette phase doit être sous estimé. De plus, les données relatives à l'énergie consommée pour produire ces batteries sont encore discutées dans la littérature (cf. p142 ce mémoire). Ainsi, les résultats obtenus doivent être considérés comme indicateurs de résultats attendus.

Les frontières de l'étude et l'unité fonctionnelle restent les mêmes (UF= « le km moyen parcouru pour le scénario d'usage S1 pour un véhicule dont la durée de vie kilométrique est égale à 120 000 km »).

Les seules données d'inventaire modifiées sont la consommation et la nature du mix électrique alimentant le véhicule à l'étape d'utilisation. Les mix électriques qui alimentent le véhicule sont le mix français (module Ecoinvent : « *electricity, medium voltage, at grid (FR, 1992-2004)* ») et le mix allemand (module Ecoinvent : « *electricity, medium voltage, at grid (DE, 1992-2004)* »).

⇒ Rappel des résultats obtenus lors des essais :

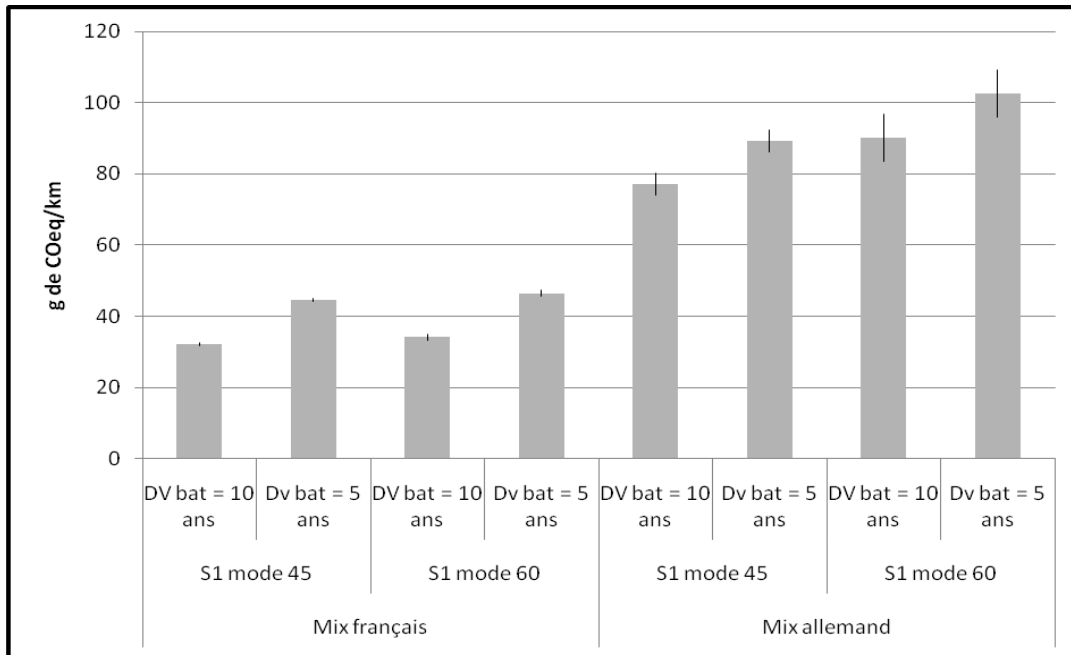
| | Type de cycle | Consommations moyennes réseau (Wh/km) | Plages d'incertitudes Consommations réseaux (Wh/km) |
|---------|---|---------------------------------------|---|
| mode 60 | ECE 15 | 76,1 | [68,5; 83,7] |
| | Artémis urbain | 103.7 | [93,4; 114,15] |
| | Artémis routier modifié (V _{max} =60km/h) | 96.9 | [87,2;106.7] |
| | Cycle urbain enregistré | 94.3 | [84,8; 103,6] |
| Mode 45 | ECE 15 | 71.3 | [64,2;78,5] |
| | Artémis urbain modifié (V _{max} =45 km/h) | 97.9 | [88.1;108,3] |
| | Artémis routier modifié (V _{max} =45 km/h) | 73.0 | [65.7; 80,3] |

On considère le scénario d'usage S1, 59% routier et 41% urbain. Ainsi les plages de consommations retenues sont :

- Pour le véhicule en mode 60, [74.8 ; 84.9]
- Pour le véhicule en mode 45, [89,7 ; 109.5]

⇒ **Résultats**

Les résultats sont interprétés au niveau des valeurs des impacts potentiels effet de serre.



Lorsque que le véhicule est alimenté par le mix français, la différence entre les résultats obtenus pour chacune des bornes de l'intervalle de consommation testées est de 2 à 6%.

Lorsque que le véhicule est alimenté par le mix Allemand, la différence entre les résultats obtenus pour chacune des bornes de l'intervalle de consommation testées est de 7 à 16%.

⇒ **Plus le mix électrique alimentant le véhicule est carboné, plus l'incertitude sur le niveau de consommation influe sur celle des résultats obtenus pour l'indicateur effet de serre.**

Table des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1 : Flotte de véhicules motorisés, OCDE et reste du monde, 1990 - 2030 (source OCDE)..... | 15 |
| Figure 2 : Evolution de la consommation d'énergie dans le secteur du transport de 1971 à 2030 (source : IFP -2005)..... | 16 |
| Figure 3 : Evolution des normes d'émission pour l'homologation des véhicules particuliers diesels de l'Union Européenne..... | 21 |
| Figure 4 : Packs, modules et cellules de batterie | 25 |
| Figure 5 : Diagrammes Energie/Puissance des couples électrochimiques [DE GUIBERT, 2009]. | 30 |
| Figure 6 : Comparaison entre le cycle ECE et le cycle ARTEMIS urbain ³⁴ | |
| Figure 7 : Schéma de principe de banc à rouleau (source INRETS) | 35 |
| Figure 8 : Les différentes étapes de l'ACV : un processus itératif [ISO 14 040, 2006] | 39 |
| Figure 9 : Exemple de processus élémentaires au sein d'un système de produits (source : ISO 14 040) | 41 |
| Figure 10 : Catégories intermédiaires et catégories de dommages | 45 |
| Figure 11: Impacts potentiels "effet de serre" des VCI (diesel) des études de HELMS et SIMONS (indicateur IPCC à horizon 100 ans)..... | 49 |
| Figure 12 : Représentation du raisonnement suivi à travers la partie 2.2..... | 65 |
| Figure 13 : Définition physique du déplacement du véhicule [WOLF, 1999] | 67 |
| Figure 14 : Classification des paramètres influençant la consommation d'un véhicule | 68 |
| Figure 15 : Spécification de l'usage dans l'UF..... | 71 |
| Figure 16 : Photographies du VE lors des tests au laboratoire INRETS de Bron..... | 73 |
| Figure 17 : Adaptation du cycle Artémis routier aux performances des véhicules étudiés..... | 76 |
| Figure 18 : Schéma d'implantation des capteurs..... | 82 |
| Figure 19 : Influence de la puissance des auxiliaires sur la consommation du véhicule étudié | 88 |

| | |
|--|-----|
| Figure 20 : <i>Phase de traction</i> , la batterie fournit la puissance motrice et les pertes..... | 93 |
| Figure 21 : <i>Phase de freinage</i> , la batterie enmagasine une partie de l'énergie restituée | 93 |
| Figure 22 : Diagramme de la loi de commande..... | 94 |
| Figure 23 : Visualisation de la macro Excel utilisée pour prévoir les consommations de véhicules..... | 94 |
| Figure 24 : Paramètres influant sur la durée de vie d'une batterie | 96 |
| Figure 25 : Influence de la profondeur de décharge sur la DV cyclique d'une batterie Plomb-acide [RANTIK, 1999] | 96 |
| Figure 26 : Nombre de cycles des batteries Plomb-acide en fonction de la profondeur de décharge (source interne EDF R&D - LME) | 99 |
| Figure 27 : Nombre de cycles des batteries Ni-MH en fonction de la profondeur de décharge (source interne EDF R&D - LME) | 102 |
| Figure 28 : Schéma du mode d'acquisition des données entrées dans l'ACV..... | 104 |
| Figure 29 : Principales étapes du cycle de vie du véhicule étudié..... | 108 |
| Figure 30 : Recyclage du Plomb considéré | 110 |
| Figure 31 : Bilan CO ₂ par phase, en g/km..... | 122 |
| Figure 32 : Bilan SO _x par phase, en g/km | 123 |
| Figure 33 : Bilan NO _x par phase, en %..... | 124 |
| Figure 34 : Bilan Poussières par phase, en g/km | 125 |
| Figure 35 : Bilan COV par phase, en g/km | 126 |
| Figure 36 : Impact potentiel sur l'effet de serre (IPCC 2008, 100 ans) | 127 |
| Figure 37 : Impact potentiel sur l'acidification atmosphérique (CML 2000-baseline)..... | 128 |
| Figure 38 : Impact potentiel sur la consommation de ressources énergétiques par étape et par substance (en %) et pour une DV de batterie de 5 ans..... | 129 |
| Figure 39 : Impact potentiel sur la consommation de ressources non énergétiques par étape et par substance (en %) et pour une DV de batterie de 5 ans..... | 130 |

| | |
|---|------------------------------------|
| Figure 40 : Résultats obtenus pour les autres indicateurs testés et pour DV batterie de 5 ans | 131 |
| Figure 41 : Bilan CED par phase, en MJ/km S1..... | 133 |
| Figure 42 : Comparaison des impacts potentiels « effet de serre », « acidification » et « épuisement des ressources » entre VE et VCI équivalent | 134 |
| Figure 43 : Comparaison de l'impact potentiel VE et VCI sur l'Épuisement des ressources énergétiques, en % | 137 |
| Figure 44 : Identification des paramètres clés..... | 139 |
| Figure 45 : Analyse de sensibilité des chimies de batteries pour l'indicateur "effet de serre" | 142 |
| Figure 46 : Influence de la DV calendaire du VE avec batterie NiMH, pour l'indicateur effet de serre | 145 |
| Figure 47 : Influence du paramètre DV kilométrique sur les bilans à effet de serre des VE NiMH et Plomb-acideSynthèse..... | 147 |
| Figure 48 : Influence du mix électrique sur les résultats obtenus pour l'indicateur effet de serre | 149 |
| Figure 49 : Influence du mix électrique sur les résultats obtenus avec l'indicateur « Acidification de l'atmosphère »..... | 149 |
| Figure 50 : Influence de la consommation sur l'impact potentiel sur l'effet de serre..... | 151 |
| Figure 51 : Influence de la proportion de km urbain sur la consommation de VE..... | 152 |
| Figure 52 : Influence du scénario d'usage sur l'impact potentiel sur l'effet de serre pour VE et VCI | 152 |
| Figure 53 : Adaptation du cycle Artémis urbain pour une vitesse maximale de 45 km/h..... | 193 |
| Figure 54 : Adaptation du cycle Artémis route pour des vitesses maximales de 60 et 45 km/h | 193 |
| Figure 55 : Diagramme vitesse / temps du cycle enregistré..... | 195 |
| Figure 56 : Hypothèse retenue: recyclage en boucle fermée du Plomb | 212 |
| Figure 57 : Analyse de sensibilité - Comparaison avec le véhicule thermique pour les indicateurs "effet de serre", "acidification" et "épousement des ressources" | Erreur ! Signet non défini. |

Table des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau 1 : Evolution des normes d'émission pour l'homologation des véhicules particuliers de l'Union Européenne de 1992 à 2014 | 20 |
| Tableau 2: Prix des batteries [PETERSEN, 2009]..... | 27 |
| Tableau 3: Comparaison des différents périmètres utilisés pour réaliser des analyses de cycles de vie appliquées aux différents systèmes de transports particuliers | 37 |
| Tableau 4: Comparaison des études publiées sur l'ACV appliquée au VE (voir annexe 3) | 53 |
| Tableau 5 : Répartition du kilométrage des voitures particulières en France [ANDRE, 1999] | 69 |
| Tableau 6 : Caractéristiques du véhicule électrique étudié | 73 |
| Tableau 7 : Caractéristiques du véhicule thermique équivalent étudié | 74 |
| Tableau 8: Comparaison des caractéristiques des cycles Artemis urbain et routier et de leurs versions modifiées..... | 77 |
| Tableau 9 : Comparaison des caractéristiques principales du cycle expérimental et des cycles Artémis urbain et ECE | 78 |
| Tableau 10 : Plan des essais | 81 |
| Tableau 11 : Caractéristiques des capteurs..... | 82 |
| Tableau 12 : Bilan des résultats obtenus par cycle testé | 84 |
| Tableau 13 : Résultats des tests d'autonomie | 86 |
| Tableau 14 : Mesures de la puissance des auxiliaires..... | 87 |
| Tableau 15 : Consommations en tenant compte du rendement du chargeur et de celui des batteries.... | 89 |
| Tableau 16 : Emissions mesurées sur cycle ECE15 avec départ moteur chaud | 90 |
| Tableau 17 : Résultats du modèle pour la consommation spécifique du VE, batteries Plomb-acide | 99 |

Table des tableaux

| | |
|--|-----|
| Tableau 18 : DV cyclique des batteries Plomb-acide en fonction de la profondeur de décharge..... | 100 |
| Tableau 19 : Résultat du modèle pour la consommation spécifique du VE, batterie Ni-MH | 101 |
| Tableau 20 : DV cyclique des batteries Ni-MH en fonction de la profondeur de décharge..... | 102 |
| Tableau 21 : Synthèse des scénarios retenus pour les batteries..... | 103 |
| Tableau 22 : Indicateurs d'impact potentiel retenus et sources des méthodes | 111 |
| Tableau 23: Qualification des données inventoriées..... | 117 |
| Tableau 24 : Inventaire des substances émises pour le kilomètre moyen parcouru pour le scénario d'usage S1..... | 118 |
| Tableau 25: Inventaire des quantités extraites pour le kilomètre moyen parcouru pour le scénario d'usage S1..... | 119 |
| Tableau 26 : Evaluation de différents indicateurs d'impact, selon différentes méthodes d'évaluation retenues | 120 |
| Tableau 27 : Bilan CO ₂ par phase, en g/km | 121 |
| Tableau 28 : Bilan SOX par phase, en g/km | 123 |
| Tableau 29 : Bilan NOX par phase, en g/km..... | 124 |
| Tableau 30 : Bilan Poussières par phase, en g/km..... | 125 |
| Tableau 31 : Bilan COV par phase, en grammes..... | 126 |
| Tableau 32 : Répartition de l'indicateur Ressources énergétiques par substance | 128 |
| Tableau 33 : Répartition de l'indicateur Ressources non énergétiques par substance | 129 |
| Tableau 34 : Contribution à l'impact potentiel des étapes du cycle de vie VE et VCI (en %)..... | 135 |
| Tableau 35: Bilan des consommations au réseau obtenues via l'utilisation du modèle pour des VE, 8 kW de batterie | 139 |
| Tableau 36 : Inventaire des consommables par pack de batteries [HISCHIER, 2007]..... | 140 |
| Tableau 37 : Analyse de sensibilité des chimies de batteries pour l'indicateur "effet de serre" | 141 |

| | |
|---|-----|
| Tableau 38 : Influence de la DV kilométrique sur l'indicateur effet de serre pour le VE batteries Plomb-acide..... | 146 |
| Tableau 39: Contribution des différents moyens de production pour la production électrique de différents pays européens [DONES, 2007] | 148 |
| Tableau 40 : Comparaison des caractéristiques du cycle Artémis urbain et du cycle enregistré..... | 195 |
| Tableau 41: Résultats de consommation obtenus pour le cycle Artemis urbain, moyenne et écart type | 198 |
| Tableau 42 : Résultats obtenus pour le cycle ECE 15 en "mode 60" et pour différents niveaux de charge..... | 199 |
| Tableau 43 : Résultats obtenus pour le cycle ECE 15 en "mode 45"..... | 199 |
| Tableau 44 : Résultats obtenus pour le cycle Artémis urbain en "mode 60" et pour différents niveaux de charge | 200 |
| Tableau 45: Résultats obtenus pour le cycle Artémis urbain en "mode 45" | 201 |
| Tableau 46: Résultats obtenus pour le cycle Artémis routier en mode 60 et avec différents niveaux de charge..... | 201 |
| Tableau 47: Résultats obtenus pour le cycle Artémis routier en "mode 45" | 202 |
| Tableau 48: Résultats obtenus pour le cycle enregistré en "mode 60" | 202 |
| Tableau 49 : Emissions mesurées sur cycle ECE15 avec un départ moteur froid | 203 |
| Tableau 50 : Emissions mesurées sur cycle ece15 avec Départ moteur chaud | 203 |
| Tableau 51 : Emissions mesurées sur le cycle Artémis urbain..... | 204 |
| Tableau 52: Emissions mesurées sur le cycle Artémis routier limité à 45 km/H | 204 |
| Tableau 53 : Données d'inventaire des matériaux constitutifs d'une batterie | 211 |
| Tableau 54 : Consommations / Emissions liées à la production d'un kg de batterie Plomb-acide | 213 |
| Tableau 55 : Emissions / Consommations liées au recyclage des batteries Plomb-acide | 214 |

N° d'ordre : 2010 EMSE 0578

Marie-Lou PICHERIT

***Electric vehicle environmental assessment:
Methodologies and application***

Speciality: Environmental sciences and engineering

Keywords: *Life Cycle Assessment (LCA), Electric vehicle, Sensitivity analysis*

Abstract:

Today, the electric vehicle is seen as a potent substitute to the internal combustion engine vehicle, aiming at reducing consumption of fossil fuels, and emissions of local pollutants and greenhouse gases. The assessment of strengths and weaknesses of this technology from the environmental viewpoint is currently limited, especially considering the lack of experiment feedbacks.

The objective of this research is to offer an approach combining a deep understanding of the studied vehicle (through experiments and use of consumption patterns) and the environmental assessment method "Life Cycle Analysis" (LCA), to identify the key parameters of environmental appraisal, and relying on different sensitivity analysis, to propose a detailed analysis.

To achieve this, experimental tests were carried out on an urban electric vehicle and its internal combustion engine equivalent. A model was built to estimate the consumption of electric vehicles according to their characteristics (chemistry and battery capacity, vehicle energy efficiency) and use (traffic, use of auxiliaries). Assumptions and scenarios are also made on the lifetimes of batteries in the vehicle. The data sets obtained are implemented in the life cycle analysis of an electric vehicle, and the results are interpreted and compared to its internal combustion engine equivalent vehicle. In the end, sensitivity analysis and test of various scenarios allow the identification of key parameters for the environmental assessment.

N° d'ordre : 2010 EMSE 0578

Marie-Lou PICHERIT

***Evaluation environnementale du véhicule électrique :
Méthodologies et application***

Spécialité : Sciences et génie de l'environnement

Mots clefs : *Analyse du Cycle de Vie (ACV), véhicule électriques, analyses de sensibilité*

Résumé :

Le véhicule électrique est aujourd'hui présenté comme l'une des solutions alternatives sérieuses au véhicule à moteur à combustion interne, visant à limiter la consommation d'énergies fossiles, ainsi que les émissions de polluants locaux et de gaz à effet de serre. L'évaluation des forces et faiblesses de cette technologie au regard de l'environnement est aujourd'hui limitée, compte tenu notamment du peu de retour d'expérience sur ce type de véhicules.

L'objectif de ce travail de recherche est de proposer une approche combinant une connaissance fine du véhicule étudié (obtenu notamment par des essais expérimentaux et l'utilisation de modèles de consommation) et de la méthode d'évaluation environnementale Analyse de Cycle de Vie (ACV), pour identifier les paramètres clefs du bilan environnemental, et par différentes analyses de sensibilité, d'en proposer une analyse détaillée.

Pour y parvenir, des essais expérimentaux ont été réalisés sur un véhicule électrique à usage essentiellement urbain et son équivalent thermique. Un modèle permet d'estimer les consommations de véhicules selon leurs spécificités (chimie et capacité de batterie, rendement de la chaîne de traction) et leurs conditions d'utilisation (trafic, usages d'auxiliaires). Des hypothèses et scénarios sont également établis sur la durée de vie des batteries qui équipent le véhicule. Les jeux de données obtenus sont mis en œuvre dans l'ACV d'un véhicule électrique, et les résultats obtenus interprétés puis comparés à ceux du véhicule thermique équivalent. Enfin, analyses de sensibilité et test de divers scénarios permettent l'identification des paramètres clefs du bilan environnemental.