



ELABORATION SELON LES PRINCIPES DES ACV DES BILANS ENERGETIQUES, DES EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE ET DES AUTRES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX INDUITS PAR L'ENSEMBLE DES FILIERES DE VEHICULES ELECTRIQUES ET DE VEHICULES THERMIQUES, VP DE SEGMENT B (CITADINE POLYVALENTE) ET VUL A L'HORIZON 2012 ET 2020

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par Gingko21 et PE INTERNATIONAL

Auteurs:

Niels Warburg	PE INTERNATIONAL AG
Alexander Forell	PE INTERNATIONAL AG
Laura Guillon	PE INTERNATIONAL AG
Hélène Teulon	Gingko21
Benjamin Canaguier	Gingko21



21F, rue Jacques Cartier
78960 Voisins le Bretonneux

Phone +33 1 34 52 22 15
E-Mail contact@gingko21.com
Internet www.gingko21.com



PE INTERNATIONAL
EXPERTS IN SUSTAINABILITY

Hauptstraße 111 – 113
70771 Leinfelden – Echterdingen
Phone +49 711 341817 – 423
Fax +49 711 341817 – 25
E-Mail info@pe-international.com
Internet www.pe-international.com

Coordination technique : Maxime Pasquier – Service Transports et Mobilité
Direction Villes et Territoires Durables – ADEME

Olivier Rethore – Service Eco-conception et Consommation Durable
Direction Consommation Durable et Déchets – ADEME

ADEME



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Energie



Rapport Final

ADEME



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Energie

REMERCIEMENTS

L'ADEME tient à remercier l'ensemble des membres du comité technique et du comité de pilotage pour leur participation et leur large contribution à cette étude en apportant leur expertise et des données réelles, et en validant les hypothèses et scénarios de cette étude. Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs. Les interprétations, positions et recommandations figurant dans ce rapport ne peuvent être attribuées aux membres du comité technique.

PASQUIER Maxime	ADEME
RETHORE Olivier	ADEME
COROLLER Patrick	ADEME
THIBIER Emmanuel	ADEME
GAGNEPAIN Laurent	ADEME
PLASSAT Gabriel	ADEME
COLOSIO Joëlle	ADEME
GELDRON Alain	ADEME
POUPONNEAU Marie	ADEME
VIDALENC Eric	ADEME
BENECH Fabienne	ADEME
COTTEN Gildas	AGPM AGPB
PATINGRE Jean-François	Amis de la Terre
CAZENOBÉ Gilbert	AREVA
AUSSOURD Philippe	AVERE
LE BIGOT Nicolas	CCFA
BRUNOT Aymeric	CEA
FONTELLE Jean-Pierre	CITEPA
CHALLE Christine	CNPA
JOHANET Pauline	CNPA
DOUARRE Alain	DOW KOKAM
REMBAUVILLE Sébastien	DOW KOKAM
CZERNY Igor	EDF
LE BOULCH Denis	EDF
PICHERIT Marie-Lou	EDF
BERNARD Gilles	ERDF
DUBROMEL Michel	FNE
PONCELET Jean-Baptiste	FNE
PRIEUR-VERNAT Anne	GDF Suez
CAO THAI Liem	GDF Suez
GRUSON Alain	IFPEN
THELLIER Lionel	IFPEN
VINOT Simon	IFPEN
LEDUC Pierre	IFPEN
CHABREDIER Christelle	LA POSTE
SIMON Rémi	LA POSTE
TOURJANSKY Laure	MEEDDM
DEPOORTER Stéphanie	MEEDDM
TONNELIER Pierre	PSA Peugeot-Citroën
RICHEL Sophie	PSA Peugeot-Citroën
SIMAO Stéphanie	PSA Peugeot-Citroën
DESMUEE Isabelle	RECUPYL
MOREL Stéphane	RENAULT
NOVEL CATTIN Frédéric	RENAULT
QUERINI Florent	RENAULT
FOURNIER Cécile	RENAULT

NEAU Emmanuel	RTE
LACOUT Béatrice	SAFT
SIRET Clémence	SAFT
BURNAND Manuel	FEDEREC
TEDJAR Farouk	SFRAP / Recupyl
LE BRETON Daniel	UFIP
BOUCHEZ Dominique	UFIP
TYTGAT Jan	UMICORE
ROBERTZ Bénédicte	UMICORE
FICHEUX Serge	UTAC

L'ADEME remercie également les membres de la revue critique qui ont suivi l'évolution de l'étude et ont permis de guider la réalisation de cette étude pour qu'elle soit la plus pertinente autant sur les thématiques propres aux analyses de cycle de vie que les autres.

Dr. PAYET Jérôme	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne-CYCLECO,
Pr.Dr FINKBEINER Matthias	Chair of Sustainable Engineering, TUB
Dr.CIROTH Andreas	GREENDELTA TC

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par la caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Any representation or reproduction of the contents herein, in whole or in part, without the consent of the author(s) or their assignees or successors, is illicit under the French Intellectual Property Code (article L 122-4) and constitutes an infringement of copyright subject to penal sanctions. Authorised copying (article 122-5) is restricted to copies or reproductions for private use by the copier alone, excluding collective or group use, and to short citations and analyses integrated into works of a critical, pedagogical or informational nature, subject to compliance with the stipulations of articles L 122-10 – L 122-12 incl. of the Intellectual Property Code as regards reproduction by reprographic means.

Sommaire

1. Objectifs de l'étude	53
1.1 Contexte	53
1.2 Objectifs	54
1.3 Approche attributionnelle versus conséquentielle.....	55
1.4 Public visé.....	55
1.5 Gouvernance de l'étude	56
2. Champ de l'étude	57
2.1 Définition du système.....	57
2.1.1 Contexte	57
2.1.2 Véhicules étudiés.....	59
2.1.3 Exclusion des infrastructures de charge et de distribution de carburant	61
2.1.4 Mode de charge (lent/rapide)	61
2.2 Définition de la fonction	62
2.3 Unité fonctionnelle.....	65
2.4 Flux de référence.....	65
2.5 Frontières du système.....	66
2.5.1 Production	66
2.5.2 Utilisation.....	67
2.5.3 Fin de vie.....	71
2.6 Allocations	75
2.7 Règles de coupure	76
2.8 Inventaire du cycle de vie (ICV).....	77
2.9 Catégories d'impact et indicateurs	78
2.10 Types et sources des données.....	80
2.11 Exigences sur la qualité des données.....	81
2.11.1 Précision et la complétude.....	81
2.11.2 Complétude.....	81
2.11.3 Cohérence	82
2.11.4 Reproductibilité.....	82
2.12 Hypothèses et limitations	84
2.13 Revue critique.....	84
2.14 Format du rapport	84
3. Inventaire	85
3.1 Collecte des données d'inventaire.....	85
3.1.1 Atelier 2020	85
3.1.2 Composition matière des véhicules.....	85
3.1.3 Fabrication du véhicule	92
3.1.4 Batteries.....	93
3.1.5 Carburants	95
3.1.6 Électricité.....	99
3.1.7 Utilisation.....	106
3.1.8 Consommation des auxiliaires.....	108
3.1.9 Fin de vie.....	109
4. Evaluation des impacts potentiels et analyse	112
4.1 Scénario de référence.....	112
4.1.1 VP 2012.....	112
4.1.2 VP 2020.....	123

4.1.3	VUL 2012.....	132
4.1.4	VUL 2020.....	134
4.2	Détail des phases du cycle de vie.....	134
4.2.1	Production 2012	134
4.2.2	Production 2020	141
4.2.3	Utilisation 2012.....	147
4.2.4	Utilisation 2020.....	149
4.2.5	Fin de vie.....	150
4.3	Etude des sources d'incertitudes	151
4.3.1	Analyse de sensibilité aux bouquets électriques.....	151
4.3.2	Analyse de sensibilité aux cycles de conduite	157
4.3.3	Analyse de sensibilité des scénarios de fin de vie	164
4.3.4	Analyse de sensibilité à la durée de vie du véhicule	170
4.3.5	Analyse de sensibilité à la consommation des auxiliaires	188
4.3.6	Analyse de sensibilité au lieu de fabrication de la batterie.....	193
4.3.7	Analyse de sensibilité à la durée de vie de la batterie	194
4.3.8	Analyse d'incertitudes	197
5.	Module 2 : étude des risques et bénéfices du VE.....	216
5.1	Pollution locale.....	217
5.1.1	Pollution atmosphérique	217
5.1.2	Bruit	230
5.2	Métaux critiques	236
6.	Conclusion et perspectives	251
7.	Rapport de revue critique.....	257
8.	Bibliographie.....	267
8.1	Etat de la littérature en août 2011 (rapport bibliographique extrait du rapport intermédiaire).....	269
8.1.1	Méthodologie	269
8.1.2	Véhicules, moteurs et composants	271
8.1.3	Batteries.....	272
8.1.4	Carburants	275
8.1.5	Electricité.....	275
8.1.6	Cycle d'usage et de recharge.....	278
8.1.7	Recyclage	280

Liste des Figures

Figure 1-1 : Indicateur de la consommation d'énergie primaire totale pour les véhicules électriques français et allemand et les véhicules thermiques essence et diesel en 2012 selon le scénario de référence	30
Figure 1-2 : Variabilités de la consommation d'énergie primaire totale pour les véhicules électriques français et allemand et les véhicules thermiques essence et diesel en 2012.....	31
Figure 1-3 : Domaines de pertinence environnementale du véhicule électrique (France et Allemagne) comparés au véhicule thermique pour la consommation d'énergie primaire totale en 2012	32
Figure 1-4 : Contributions au potentiel de changement climatique du Véhicule Electrique français et du Véhicule Thermique en 2012.....	33
Figure 1-5 : Potentiel de changement climatique pour les véhicules électriques français et allemand et les véhicules thermiques essence et diesel en 2012 selon le scénario de référence	34
Figure 1-6 : Variabilités du potentiel de changement climatique pour les véhicules électriques français et allemand et les véhicules thermiques essence et diesel en 2012.....	35
Figure 1-7 : Domaines de pertinence environnementale du véhicule électrique (France et Allemagne) comparés au véhicule thermique pour le potentiel de changement climatique en 2012.....	36
Figure 1-8 : Potentiel d'épuisement des ressources fossiles pour les véhicules électriques français et allemand et les véhicules thermiques essence et diesel en 2012 selon le scénario de référence	37
Figure 1-9 : Variabilités du potentiel d'épuisement des ressources fossiles pour les véhicules électriques français et allemand et les véhicules thermiques essence et diesel en 2012.....	38
Figure 1-10 : Domaines de pertinence environnementale du véhicule électrique (France et Allemagne) comparés au véhicule thermique pour l'épuisement des ressources fossiles en 2012	38
Figure 1-11 : Potentiel d'acidification pour les véhicules électriques français et allemand et les véhicules thermiques essence et diesel en 2012 selon le scénario de référence	39
Figure 1-12 : Variabilités du potentiel d'acidification pour les véhicules électriques français et allemand et les véhicules thermiques essence et diesel en 2012.....	40
Figure 1-13 : Domaines de pertinence environnementale du véhicule électrique (France et Allemagne) comparés au véhicule thermique pour le potentiel d'acidification en 2012	40

Figure 1-14 : Potentiel d'eutrophisation de l'eau pour les véhicules électriques français et allemand et les véhicules thermiques essence et diesel en 2012 selon le scénario de référence	41
Figure 1-15 : Variabilités du potentiel d'eutrophisation pour les véhicules électriques français et allemand et les véhicules thermiques essence et diesel en 2012.....	42
Figure 1-16 : Domaines de pertinence environnementale du véhicule électrique (France et Allemagne) comparés au véhicule thermique pour le potentiel d'eutrophisation de l'eau en 2012	42
Figure 1-17 : Potentiel de création d'ozone photochimique pour les véhicules électriques français et allemand et les véhicules thermiques essence et diesel en 2012 selon le scénario de référence	43
Figure 1-18 : Variabilités du potentiel de création d'ozone photochimique pour les véhicules électriques français et allemand et les véhicules thermiques essence et diesel en 2012.....	44
Figure 1-19 : Domaines de pertinence environnementale du véhicule électrique (France et Allemagne) comparés au véhicule thermique pour le potentiel de création d'ozone photochimique en 2012.....	44
Figure 1-20 : Domaines de pertinence environnementale du véhicule électrique en France comparés aux véhicules thermiques essence et diesel pour les six impacts potentiels retenus en 2012	45
Figure 1-21 : Normation des six impacts potentiels retenus pour le VP en France en 2012.....	46
Figure 1-22 : Evolutions attendues à l'horizon 2020 pour les véhicules électrique, thermiques essence et diesel sur les six impacts potentiels retenus	47
Figure 2-1: Scénario de développement du parc de véhicules décarbonés pour la France.....	58
Figure 2-2 Facteurs d'émissions des NOx en fonction de la vitesse pour un véhicule léger.....	69
Figure 2-3 Cycle de conduite NEDC.....	70
Figure 2-4 Différentes situations de trafic selon l'HBEFA 3.1	71
Figure 2-5 Fin de vie d'un véhicule	72
Figure 3-1 Procédure de "l'atelier 2020"	85
Figure 3-2 : ACV d'un véhicule par une approche par criblage	86
Figure 3-3 Composition matière d'un véhicule particulier.....	87
Figure 3-4 Composition matière des VUL (hors batterie) étudiés.....	89
Figure 3-5 Comparaison des bouquets électriques des scénarios 2012 et 2020 en France.....	103

Figure 3-6 Comparaison des bouquets électriques des scénarios 2012 et 2020 en Europe	104
Figure 4-1 Contribution à la consommation d'énergie primaire des différentes étapes du cycle de vie des véhicules particulier électrique, Diesel et essence à l'horizon 2012.....	113
Figure 4-2 Contribution au potentiel de changement climatique des différentes étapes du cycle de vie des véhicules particuliers électrique, Diesel et essence à l'horizon 2012.....	114
Figure 4-3 Contribution au potentiel d'épuisement des ressources minérales des différentes étapes du cycle de vie des véhicules particuliers électrique, Diesel à l'horizon 2012.....	115
Figure 4-4 Contribution au potentiel d'épuisement des ressources fossiles des différentes étapes du cycle de vie des véhicules particuliers électrique, Diesel et essence à l'horizon 2012.....	116
Figure 4-5 Contribution au potentiel d'acidification des différentes étapes du cycle de vie des véhicules particuliers électrique, Diesel et essence à l'horizon 2012.....	117
Figure 4-6 Contribution au potentiel d'eutrophisation des différentes étapes du cycle de vie des véhicules particuliers électrique, Diesel et essence à l'horizon 2012.....	118
Figure 4-7 Contribution au potentiel de création d'ozone photochimique des différentes étapes du cycle de vie des véhicules particuliers électrique, Diesel et essence à l'horizon 2012.....	119
Figure 4-8 Contribution des différentes étapes du cycle de vie du véhicule particulier électrique aux différents flux d'inventaire à l'horizon 2012.....	120
Figure 4-9 Contribution des différentes étapes du cycle de vie du véhicule particulier Diesel aux différents flux d'inventaire à l'horizon 2012.	121
Figure 4-10 Contribution des différentes étapes du cycle de vie du véhicule particulier essence aux différents flux d'inventaire à l'horizon 2012.	122
Figure 4-11 Comparaison des flux d'inventaire sur l'ensemble du cycle de vie des véhicules électrique et thermiques à l'horizon 2012.	122
Figure 4-12 Contribution à la consommation d'énergie primaire des différentes étapes du cycle de vie des véhicules particulier électrique, Diesel et essence à l'horizon 2020.....	124
Figure 4-13 Contribution au potentiel de changement climatique des différentes étapes du cycle de vie des véhicules particuliers électrique, Diesel et essence à l'horizon 2020.....	124
Figure 4-14 Contribution au potentiel d'épuisement des ressources minérales des différentes étapes du cycle de vie des véhicules particuliers électrique, Diesel à l'horizon 2020.....	125

Figure 4-15 Contribution au potentiel d'épuisement des ressources fossiles des différentes étapes du cycle de vie des véhicules particuliers électrique, Diesel et essence à l'horizon 2020.....	126
Figure 4-16 Contribution au potentiel d'acidification des différentes étapes du cycle de vie des véhicules particuliers électrique, Diesel et essence à l'horizon 2020.....	126
Figure 4-17 Contribution au potentiel d'eutrophisation des différentes étapes du cycle de vie des véhicules particuliers électrique, Diesel et essence à l'horizon 2020.....	127
Figure 4-18 Contribution au potentiel de création d'ozone photochimique des différentes étapes du cycle de vie des véhicules particuliers électrique, Diesel et essence à l'horizon 2020.....	128
Figure 4-19 Contribution des différentes étapes du cycle de vie du véhicule particulier électrique aux différents flux d'inventaire à l'horizon 2020.....	129
Figure 4-20 Contribution des différentes étapes du cycle de vie du véhicule particulier Diesel aux différents flux d'inventaire à l'horizon 2020.	130
Figure 4-21 Contribution des différentes étapes du cycle de vie du véhicule particulier essence aux différents flux d'inventaire à l'horizon 2020.	131
Figure 4-22 Comparaison des flux d'inventaire sur l'ensemble du cycle de vie des véhicules électrique et thermiques à l'horizon 2020.	131
Figure 4-23 Contribution à la consommation d'énergie primaire des différentes étapes du cycle de vie des VUL à l'horizon 2012.	132
Figure 4-24 Contribution au potentiel de changement climatique des différentes étapes du cycle de vie des VUL à l'horizon 2020.....	133
Figure 4-25 Contribution au potentiel d'acidification des différentes étapes du cycle de vie des VUL à l'horizon 2020.....	134
Figure 4-26 Contributions en phase de production des véhicules électrique, Diesel et essence à l'horizon 2012.....	135
Figure 4-27 Contribution aux indicateurs d'impact pour la batterie 2012.....	139
Figure 4-28 Analyse des contributions aux indicateurs d'impact pour les cellules de la batterie 2012	140
Figure 4-29 Contributions en phase de production des véhicules électrique, Diesel et essence à l'horizon 2020.....	142
Figure 4-30 Comparaison des indicateurs d'impact des batteries 2012 et 2020	144
Figure 4-31 Répartition des indicateurs d'impacts de la batterie à l'horizon 2020	145
Figure 4-32 Répartition des indicateurs d'impact des cellules de la batterie à l'horizon 2020.....	146
Figure 4-33 Comparaison des indicateurs d'impact de la phase d'usage des VP à l'horizon 2012.....	148

Figure 4-34 Comparaison du réservoir à la roue et du puit au réservoir pour un VP à l'horizon 2020.....	149
Figure 4-35 Répartition des bilans environnementaux pour un VE en phase d'usage à l'horizon 2012 pour les 5 pays étudiés et pour le bouquet moyen européen (EU27).....	153
Figure 4-36 Répartition des flux d'inventaire pour un VE en phase d'usage à l'horizon 2012 pour les 5 pays étudiés et pour le bouquet moyen européen (EU27)	154
Figure 4-37 Répartition des bilans environnementaux pour un VE en phase d'usage à l'horizon 2012 pour les 5 pays étudiés et pour le bouquet moyen européen (EU27).....	156
Figure 4-38 Répartition des flux d'inventaire pour un VE en phase d'usage à l'horizon 2020.....	156
Figure 4-39 Comparaison des indicateurs d'impact des VP Diesel des scénarios NEDC et HBEFA à l'horizon 2012	160
Figure 4-40 Comparaison des indicateurs d'impact des VP essence des scénarios NEDC et HBEFA à l'horizon 2012	163
Figure 4-41 Contribution des impacts évités et du recyclage au potentiel de changement climatique pour les VP et VUL, thermiques et électriques à l'horizon 2012.....	167
Figure 4-42 Contribution des impacts évités et du recyclage au potentiel d'épuisement des ressources minérales pour les VP et VUL, thermiques et électriques à l'horizon 2012.....	168
Figure 4-43 Contribution des impacts évités et du recyclage au potentiel d'acidification pour les VP et VUL, thermiques et électriques à l'horizon 2012	169
Figure 4-44 Consommation d'énergie primaire totale pour le cycle de vie d'un VP à l'horizon 2012.....	171
Figure 4-45 : Potentiel de changement climatique pour le cycle de vie d'un VP à l'horizon 2012.....	172
Figure 4-46 Potentiel d'épuisement des ressources minérales pour le cycle de vie VP à l'horizon 2012.....	173
Figure 4-47 Potentiel d'épuisement des ressources fossiles pour le cycle de vie d'un VP à l'horizon 2012	174
Figure 4-48 Potentiel d'acidification pour le cycle de vie d'un VP à l'horizon 2012.....	175
Figure 4-49 : Potentiel d'eutrophisation pour le cycle de vie d'un VP à l'horizon 2012...	176
Figure 4-50 : Potentiel de création d'ozone photochimique pour le cycle de vie d'un VP à l'horizon 2012.....	177
Figure 4-51 Histogramme récapitulatif des indicateurs d'impact du cycle de vie des VP 2012 (méthode des impacts évités utilisée en fin de vie).....	178

Figure 4-52 Histogramme récapitulatif des flux d'inventaire du cycle de vie des VP 2012 (méthode des impacts évités utilisée en fin de vie).....	179
Figure 4-53 Histogramme récapitulatif des indicateurs d'impact du cycle de vie des VP 2020 (méthode des impacts évités utilisée en fin de vie).....	183
Figure 4-54: Histogramme récapitulatif des flux d'inventaire du cycle de vie des VP 2020 (méthode des impacts évités utilisée en fin de vie).....	184
Figure 4-55 Contribution au potentiel d'épuisement des ressources minérales des différentes étapes du cycle de vie des véhicules et des surconsommations liées aux auxiliaires à l'horizon 2012.....	191
Figure 4-56 Contribution au potentiel d'acidification des différentes étapes du cycle de vie des véhicules et des surconsommations liées aux auxiliaires à l'horizon 2012.....	191
Figure 4-57 Contribution au potentiel de changement climatique des différentes étapes du cycle de vie des véhicules et des surconsommations liées aux auxiliaires à l'horizon 2012	192
Figure 4-58 Comparaison des indicateurs d'impact selon les lieux de fabrication des batteries	194
Figure 4-59 Comparaison des indicateurs d'impact potentiel des scénarios utilisant 1,2 et 2 batterie pour l'Allemagne et la France par rapport au scénario de référence.....	197
Figure 4-60 Incertitudes sur la consommation d'énergie primaire totale pour la production, l'utilisation et la fin de vie	202
Figure 4-61 Variabilités de la consommation d'énergie primaire totale pour le cycle de vie complet (sans le scénario de fin de vie)	203
Figure 4-62 Incertitude sur le potentiel de changement climatique pour la production, l'utilisation et la fin de vie.....	203
Figure 4-63 Variabilités de potentiel de changement climatique sur le cycle de vie complet (sans scénario de fin de vie)	205
Figure 4-64 Incertitudes sur le potentiel d'épuisement des ressources fossiles pour la production, l'utilisation et la fin de vie	206
Figure 4-65 Variabilités du potentiel d'épuisement des ressources fossiles sur le cycle de vie complet (sans la phase de fin de vie).....	207
Figure 4-66 Analyse d'incertitudes du potentiel d'acidification pour la production, l'utilisation et la fin de vie.....	207
Figure 4-67 Variabilité du potentiel d'acidification du cycle de vie complet (sans le scénario de fin de vie)	208
Figure 4-68 Incertitudes pour le potentiel d'eutrophisation pour la production, l'utilisation et la fin de vie.....	209

Figure 4-69 : Variabilités du potentiel d'eutrophisation des véhicules particuliers sur l'ensemble du cycle de vie (sans le scénario de fin de vie).....	210
Figure 4-70 Incertitudes pour le potentiel de création d'ozone photochimique pour la production, l'utilisation et la fin de vie	211
Figure 4-71 Variabilités du potentiel de création d'ozone photochimique des véhicules particuliers sur l'ensemble du cycle de vie (sans le scénario de fin de vie).....	212
Figure 4-72 Domaine de pertinence du VE comparé aux VT pour la consommation d'énergie primaire totale à l'horizon 2012	213
Figure 4-73 Domaine de pertinence du VE comparé aux VT pour le potentiel d'effet de serre à l'horizon 2012.....	213
Figure 4-74 Domaine de pertinence du VE comparé aux VT pour le potentiel d'épuisement des ressources fossiles à l'horizon 2012	214
Figure 4-75 Domaine de pertinence du VE comparé aux VT pour le potentiel d'acidification à l'horizon 2012.....	214
Figure 4-76 Domaine de pertinence du VE comparé aux VT pour le potentiel d'eutrophisation à l'horizon 2012.....	214
Figure 4-77 Domaine de pertinence du VE comparé aux VT pour le potentiel de création d'ozone photochimique à l'horizon 2012	215
Figure 5-1 Les nuisances de l'automobile en France, Sénat, 2001.....	216
Figure 5-2 Répartition des émissions locales pour un VP Diesel moyen à l'horizon 2020.....	221
Figure 5-3 Répartition des émissions locales pour un VP essence moyen à l'horizon 2020.....	221
Figure 5-4 Répartition des émissions locales pour un VP électrique moyen à l'horizon 2020.....	223
Figure 5-5 Comparaison des émissions de polluants locaux sur le cycle de vie des véhicules thermiques, essence et Diesel, et du véhicule électrique....	224
Figure 5-6 Comparaison des émissions annuelles de NOx sur l'ensemble du cycle de vie d'une flotte de 5000 véhicules électriques et thermiques	228
Figure 5-7 Evolution du bruit en dB en fonction de la vitesse pour différents types de véhicules	231
Figure 5-8 Cycle représentatif urbain modem-hyzem	232
Figure 5-9 Cycle représentatif Inrets urbain lent 2 (données EUREV-France ; Crauser, 1989).....	233
Figure 5-10 Evolution du bruit d'un VE et d'un VT sur un cycle urbain modem-Hyzem..	233
Figure 5-11 Evolution du bruit d'un VE et d'un VT sur un cycle urbain lent Inrets	234
Figure 5-12 Evolution de la puissance sonore (en dB) en fonction de l'implantation du VE pour un débit de 1000 veh/h roulant à une vitesse de 10 km/h	235

Figure 5-13 Evolution de la puissance sonore (en dB) en fonction de l'implantation du VE pour un débit de 1000 veh/h roulant à une vitesse de 25 km/h	235
Figure 5-14 Cartographie des matières critiques selon la commission européenne.....	237
Figure 5-15 Décomposition de la batterie NMC	243
Figure 8-1 Exemple de décomposition d'une batterie	273
Figure 8-2 Emissions GES du cycle de vie d'un véhicule compact avec différents groupes moto-propulseurs (120 000 km, 70% route de ville).....	276
Figure 8-3 Répartition des véhicules en Europe	277

Liste des Tableaux

Tableau 2-1 : Prévisions du parc de véhicules électrifiés à l'horizon 2020 (excepté pour les Pays-Bas, à l'horizon 2015 et l'Espagne, à l'horizon 2014).....	58
Tableau 2-2 Détail des véhicules particuliers étudiés	59
Tableau 2-3 Détails des véhicules utilitaires légers étudiés	60
Tableau 2-4 : Répartition des déplacements et des kilomètres parcourus par mode de transport.....	62
Tableau 2-5 Typologies d'usage du VE	64
Tableau 2-6 Limites d'émissions de la norme Euro 5	68
Tableau 2-7 Limites d'émissions de la norme Euro 6	68
Tableau 2-8 Facteurs d'allocation pour les produits issus de la raffinerie en Europe	76
Tableau 2-9 : Flux d'inventaire présentés dans ce rapport	77
Tableau 2-10 : Catégories d'impact choisies	79
Tableau 2-11 Catégories d'impact non sélectionnées.....	79
Tableau 3-1 Composition matière des véhicules particuliers et écarts entre les véhicules (hors batterie) pris en compte pour établir un véhicule moyen	88
Tableau 3-2 Composition matière et écarts des VUL (hors batterie) étudiés entre les véhicules pris en compte pour établir un véhicule moyen.....	90
Tableau 3-3 Composition matière des VP (hors batterie) à l'horizon 2020.....	91
Tableau 3-4 Composition matière des VUL (hors batterie) à l'horizon 2020	91
Tableau 3-5 Fabrication des véhicules	92
Tableau 3-6 Distances et moyens de transport aval	93
Tableau 3-7 Inventaire de batterie	94
Tableau 3-8 Calcul des inventaires pour le Diesel et l'essence	96
Tableau 3-9 Emissions sélectionnées et PED du Diesel et de l'essence	96
Tableau 3-10 Mix énergétique pour l'électricité du scénario 2012	99
Tableau 3-11 "Green mix" européen à l'horizon 2012.....	100
Tableau 3-12 Bouquet électrique japonais en 2012	101
Tableau 3-13 Bouquets électriques des scénarios 2020.....	102
Tableau 3-14 émissions du cycle NEDC en 2012.....	106
Tableau 3-15 émissions du cycle HBEFA Euro 5	106
Tableau 3-16 Emissions – scénarios 2020	107

Tableau 3-17 Emissions du cycle HBEFA Euro 6	107
Tableau 3-18 Consommations d'électricité des VE à l'horizon 2012.....	108
Tableau 3-19 Consommations d'électricité des VE à l'horizon 2020.....	108
Tableau 4-1 : Indicateurs d'impact potentiel et flux d'inventaire pour la batterie 2012....	138
Tableau 4-2 Indicateurs d'impact et flux d'inventaire de la batterie à l'horizon 2020	143
Tableau 4-3 indicateurs d'impact des VP en phase d'usage à l'horizon 2012	147
Tableau 4-4 Indicateurs d'impact potentiel et flux d'inventaire en phase d'usage des différents scénarios électriques à l'horizon 2012	152
Tableau 4-5 Indicateurs d'impact potentiel et flux d'inventaire en phase d'usage des différents scénarios électriques à l'horizon 2020	155
Tableau 4-6 Mix électrique Français 2011-2012 : moyenne, scénario de base et pic de consommation.....	157
Tableau 4-7 Indicateurs d'impact et flux d'inventaire de la phase d'usage des véhicules Diesel (cycle HBEFA et NEDC) à l'horizon 2012	159
Tableau 4-8 Indicateurs d'impact et flux d'inventaire de la phase d'usage des véhicules essence (cycle HBEFA) à l'horizon 2012	162
Tableau 4-9 indicateurs d'impact potentiel et flux d'inventaire du scénario de fin de vie "Impacts évités" pour les VP thermique à l'horizon 2012.	164
Tableau 4-10 indicateurs d'impact potentiel et flux d'inventaire du scénario de fin de vie "Impacts évités" pour les VP électriques à l'horizon 2012.....	165
Tableau 4-11 Flux d'inventaire et indicateurs d'impact du cycle de vie des VP 2012.....	180
Tableau 4-12 Résultats des indicateurs d'impact et des flux d'inventaire des VP 2020 .	185
Tableau 4-13 Résultats des indicateurs d'impact et des flux d'inventaire des différents scénarios VUL 2020.....	187
Tableau 4-14 Indicateurs d'impact potentiel et flux d'inventaire des scénarios d'usage avec chauffage des VP électriques à l'horizon 2012	189
Tableau 4-15 Indicateurs d'impact potentiel et flux d'inventaire des scénarios d'usage avec climatisation des VP électriques à l'horizon 2012	190
Tableau 4-16 Comparaison du lieu de fabrication (France / Japon) - résultats d'impact potentiel et d'inventaire	193
Tableau 4-17 indicateurs d'impact et flux d'inventaire du cycle de vie d'un VE utilisé en France et en Allemagne pour 0,2 batterie et 1 batterie supplémentaire	196
Tableau 5-1 Substances concernées par thèmes de pollution atmosphérique	217
Tableau 5-2 Contribution des transports par rapport au total national (France) – CITEPA / format SECTEN, avril 2011	218
Tableau 5-3 Contribution du transport routier par rapport au total national (France) – CITEPA / format SECTEN, avril 2011	218

Tableau 5-4 Facteurs d'émissions locales d'un VP Diesel moyen à l'horizon 2020	220
Tableau 5-5 Facteurs d'émissions locales d'un VP essence moyen à l'horizon 2020	221
Tableau 5-6 Facteurs d'émissions locales d'un VP électrique moyen à l'horizon 2020 .	222
Tableau 5-7 : Flotte de VE d'une ville de 500 000 habitants en 2020	226
Tableau 5-8 Quantité de NOx annuelle émise par an par une flotte de VE d'une ville de 500 000 habitants comparée à celle émise par les VT	227
Tableau 5-9 Emissions de polluants locaux évitées ou/et déplacées à l'échelle d'une agglomération de 500 000 habitants, liées au déploiement du VE à l'horizon 2020.....	227
Tableau 5-10 Contribution des émissions évitées par rapport aux émissions totales annuelles	229
Tableau 5-11 Contribution des émissions déplacées par rapport aux émissions totales annuelles	229
Tableau 5-12 Liste des 14 métaux les plus critiques identifiées par la Commission Européenne	237
Tableau 5-13 Production et réserves de platine (et ses dérivés) en 2010, USGS Mineral Commodity Summaries 2011.....	240
Tableau 5-14 Teneur en platinoïde des pots catalytiques.....	241
Tableau 5-15 Production et réserves de cobalt en 2010, USGS Mineral Commodity Summaries 2011	242
Tableau 5-16 Production et réserves de terres rares en 2010, USGS Mineral Commodity Summaries 2011	244
Tableau 5-17 demande en terres rares en kg/MW.....	245
Tableau 5-18 nouvelles immatriculations en Europe à l'horizon 2020 des véhicules conventionnels et électrifiés	246
Tableau 5-19 parc en Europe à l'horizon 2020 des véhicules conventionnels et électrifiés.....	247
Tableau 5-20 Quantités de PGM mobilisées dans les VT essence et Diesel	247
Tableau 5-21 Consommation et Stock évités de PGM à l'horizon 2020 lié au déploiement du VE.....	247
Tableau 5-22 Consommation et Stock de cobalt liés au déploiement du VE à l'horizon 2020.....	248
Tableau 5-23 Consommation et Stock de terres rares liés au déploiement du VE à l'horizon 2020.....	248
Tableau 5-24 Puissance supplémentaire nécessaire pour le déploiement du véhicule électrique à l'horizon 2020	249
Tableau 5-25 Consommations de terres rares liées à l'installation de filières électriques supplémentaires dans le cadre du déploiement du VE en Europe.....	249

Tableau 8-1 Liste des méthodes d'impact des études existantes	271
Tableau 8-2 Liste des études les plus pertinentes relatives aux véhicules.....	272
Tableau 8-3 Etudes les plus pertinentes relatives aux batteries	274
Tableau 8-4 Etude de sensibilité pour les batteries des VE du NTNU	274
Tableau 8-5 Etudes les plus pertinentes relatives aux bouquets énergétiques	278
Tableau 8-6 Etudes les plus pertinentes relatives aux cycles d'usage et de recharge ...	280
Tableau 8-7 Etudes les plus pertinentes relatives au recyclage.....	281

Glossaire

A

ACV: Analyse de Cycle de Vie
ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
AFNOR : Association Française de Normalisation
AP : Potentiel d'acidification
ADP : Epuisement des ressources abiotiques
ASR : Automotive Shredder Residue (EN)

B

BOM: Bill Of Material (EN) - Nomenclature

C

CCFA : Comité des Constructeurs Français d'Automobiles
Cd : Symbole chimique du Cadmium
CGDD : Commissariat général au développement durable
CH₄ : Symbole chimique du Méthane
CITEPA : Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique
CML: Institute for Environmental Sciences, Leiden University, The Netherlands
Co : Symbole chimique du Cobalt
CO : Symbole chimique du Monoxyde de carbone
CO₂ : Symbole chimique du Dioxyde de carbone
COV : Composés Organiques Volatils
COVM : Composés Organiques Volatils Non Méthaniques
Cr : Symbole chimique du Chrome
Cu : Symbole chimique du Cuivre

D

DEP: Déclaration Environnementale Produit (EPD, Environmental Product Declaration)
DB: Symbole chimique du Dichlorobenzène
dB : déciBel
DG environnement : Direction Générale de l'Environnement de la Commission Européenne
DMC : Dimethyl carbonate

E

EDIP: Environmental Design of Industrial Products, in Danish UMIP
EDV: Electric Drive Vehicles
EI : Eco-indicator
EP : Potentiel d'Eutrophisation
ENDT : Enquête Nationale Transports Déplacements

F

FAP : Filtre A Particules

H

HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques
HC : HydroCarbures
HCB : HexaChloroBenzène
HFC : HydroFluoroCarbures

G

GaBi: Ganzheitliche Bilanzierung (German for holistic balancing)

GHG : Greenhouse Gas

GRI: Global Reporting Initiative

IEA (EN)/AIE (FR): International Energy Agency (EN) / Agence Internationale de l'Energie(FR)

GWP (EN) / GES (FR) : Global Warming Potential (EN) / Gaz à Effet de Serre (Fr)

I

ICE: Internal Combustion Engine

ICV: Inventaire de Cycle de Vie

IES: Institute for Environment and Sustainability

IFFSTAR : Institut Français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux

ILCD: International Reference Life Cycle Data System

ISO: International Standards Association

J

JRC : Joint Research Centre of the EU Commission

JEC: Groupement des organisations JRC/EUCAR/CONCAWE

K

KM : Kilomètre

kVA : Kilo Volt Ampères

kWh : Kilowatt-Heure

L

Li : Symbole chimique du Lithium

LiPF₆ - Lithium hexafluorophosphate

M

MDP: Mécanisme de Développement Propre

Mg : Symbole chimique du Manganèse

MTD: Meilleures Technologies Disponibles (BAT : Best Available Technologies)

N

NEDC: New European Driving Cycle

Ni: Symbole chimique du Nickel

NMC : Nickel Cobalt Manganèse

NMP : N-méthyl-2-pyrrolidone ou 1-méthyl-2-pyrrolidone, solvant hygroscopique

NH₃: Symbole chimique de l'ammoniac

NO_x : Symbole chimique du Dioxyde d'azote

O

OEM : Original Equipment Manufacturer (EN) : équipementier, fabricant de pièces détachées

P

Pb : Symbole chimique du plomb
PCB : PolyChloroBiphényles
PCDD/F : Dioxines et furannes
PED : Primary Energy Demand
PFC : PerFluoroCarbures
PGM : Platinum Group Metals
PM : Particulate Matter (EN) / Particules (FR)
POCP : Potentiel d'Oxydation Photochimique
PVDF - Polyvinylidene Fluoride

R

R&D : Recherche et Développement

S

SECTEN : SECTeurs économiques et ENergie
SB : Symbole chimique de l'Antimoine
Se : Symbole chimique du Sélénium
SETRA : Service d'étude sur les transports, les routes et leurs aménagements
SO₂ : Symbole chimique du Dioxyde de soufre

T

TRACI: Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental
Impacts
TSP : Particules totales en suspension (TSP)

U

UBP: Umweltbelastungspunkte
UE : Union Européenne
UNEP (EN)/PNUE (FR): United Nations Environment Programme / Programme des Nations
Unies pour l'environnement (FR)

V

VE: Véhicule Electrique
VHR : Véhicule Hybride Rechargeable
VP: Véhicule Particulier
VT : Véhicule Thermique
VUL: Véhicule Utilitaire Léger

W

WEEE: Waste of Electric and Electronic Equipments

Z

ZAPA : Zone d'Actions Prioritaires pour l'Air
Zn : Symbole chimique du Zinc

Résumé

Face aux défis globaux tels que le changement climatique ou la dépendance énergétique, mais aussi aux défis locaux tels que l'amélioration de la qualité de l'air en ville, le véhicule électrique peut présenter un réel intérêt. Des constructeurs automobiles mondiaux commencent à mettre en œuvre cette nouvelle solution de mobilité et les gouvernements proposent des dispositifs d'incitations relatifs au développement de la filière.

Dans ce contexte, l'ADEME a commandé une étude pour établir une comparaison des bilans environnementaux des véhicules électriques et des véhicules thermiques essence et diesel. L'étude réalisée est une analyse de cycle de vie classique, complétée par une mise en perspective des résultats sur deux sujets clés : les nuisances locales et les matières critiques. Les données primaires ont notamment été collectées auprès d'un Comité Technique regroupant les différentes parties prenantes de la mobilité électrique. Ce comité est composé d'une trentaine de membres qui apportent leur expertise, fournissent les données nécessaires à la modélisation et valident les hypothèses proposées. Les résultats obtenus sont analysés suivant différents scénarios afin de qualifier leurs plages de variabilités. Enfin, pour rendre compte des perspectives d'évolution technologique, deux horizons temporels sont considérés : 2012 et 2020.

1 Périmètre de l'étude

1-1 Précisions sur l'unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle (unité de référence à laquelle les flux comptabilisés sont ramenés) retenue pour cette étude est la mise à disposition sur des trajets inférieurs à 80 km par jour et pendant une durée de vie de 150 000 km :

- d'un véhicule de segment B (citadine polyvalente) pour le transport de personnes (jusqu'à 4 ou 5 personnes) ;
- d'un véhicule utilitaire léger (VUL) pour le transport de marchandises (jusqu'à 3,3 m³) ;

Il est considéré que les véhicules (et batteries) étudiés sont produits sur le territoire métropolitain français. Ils sont utilisés en France et en Europe, ce qui permet d'évaluer l'impact de différents mix électriques européens.

1-2 Frontière du système étudié

L'étude couvre l'ensemble du cycle de vie des véhicules, hormis la construction des infrastructures. La filière de distribution de carburant et les infrastructures de recharge des véhicules électriques ont été exclues sans vérification de leur impact respectif sur les résultats finaux ce qui constitue une limite à l'étude. Les infrastructures feront l'objet d'un travail ultérieur. Elles sont cependant considérées comme un investissement qui s'amortit sur plusieurs années.

L'étude traite uniquement le cas des batteries Li-Ion de type Nickel Manganèse Cobalt (NMC) et Lithium Fer Phosphate (LiFePO₄). Toutes autres technologies de batteries, telles que les batteries LMP sont hors du champ de cette étude.

1-3 Impacts environnementaux et énergétiques pris en compte

Les indicateurs considérés sont :

- La consommation d'énergie primaire totale
- Le potentiel de changement climatique,
- Le potentiel d'épuisement des ressources fossiles,
- Le potentiel d'acidification,
- Le potentiel d'eutrophisation de l'eau,
- Le potentiel de création d'ozone photochimique.

D'autres flux environnementaux, non agrégés en « impact » au sens de l'ACV, sont suivis dans le rapport, notamment les déchets et émissions radioactifs.

Un second volet de l'étude traite d'impacts locaux tels que la pollution atmosphérique et le bruit en phase d'usage.

1-4 Données et hypothèses en 2012 et en 2020

Des données primaires ont été collectées auprès du Comité Technique, dont les deux constructeurs automobiles français, et trois fournisseurs de batteries. Celles-ci ont été moyennées pour assurer la confidentialité, puis complétées par des valeurs issues de la littérature technique pour construire les scénarios prospectifs à l'horizon 2020.

Scénario de référence 2012

Pour l'année 2012, le scénario de référence regroupe les hypothèses suivantes :

- Assemblage des véhicules électriques et thermiques en France,
- Fabrication de la batterie en France,
- Batterie Li-Ion Nickel Manganèse Cobalt (Li-Ion NMC) de 24 kWh,
- Consommations et émissions d'usage mesurées sur le cycle de conduite normalisé européen NEDC,
- Utilisation en France (pour le véhicule électrique, un mix électrique moyen Français est utilisé),
- La durée de vie de la batterie est identique à la durée de vie du véhicule (150 000 km sur 10 ans),
- La méthode des stocks est utilisée pour modéliser la fin de vie

Les compositions des mix énergétiques considérés en 2012 proviennent de l'IEA (International Energy Agency) - statistics Electricity Information 2010 (IEA 2010) - et sont résumées ci-dessous.

Scénario 2012	FRA	ALL	UE27
Nucléaire	76,5%	23,3%	27,8%
Charbon	4,1%	44,1%	26,6%
Pétrole	1,0%	1,4%	3,1%
Gaz	4,5%	15,2%	24,3%
Biomasse & Déchets	1,0%	4,6%	3,3%
Hydro	11,9%	4,2%	10,6%
Eolien	1,0%	6,4%	3,5%
Solaire	0,0%	0,7%	0,2%
Geothermie et autres	0,0%	0,0%	0,5%

Les facteurs d'émissions CO₂eq/kWh sont issus de la base de données GaBi Professional, dont la documentation est disponible publiquement. Le facteur d'émission CO₂eq/kWh pour la France en 2012 est de 110 g CO₂-eq/kWh et de 623 g CO₂-eq/kWh pour l'Allemagne.

Scénario de référence 2020

A l'horizon 2020, le scénario de référence évolue selon les hypothèses suivantes :

- Batteries Li-Ion prises en compte :
 - Batterie NMC, contenant moins de cobalt que la batterie 2012,
 - Batterie Lithium Fer Phosphate (LiFePO₄), économiquement attractive mais actuellement moins performante en termes de densité énergétique¹.
- Consommations et émissions d'usage estimées sur le cycle de conduite NEDC à partir des normes Euro 6,
- Mix électrique moyen prospectif dont la composition est définie ci-dessous :

Scénario 2020	FRA	ALL	UE27
Nucléaire	74,0%	5,4%	24,5%
Charbon	2,1%	41,0%	24,9%
Pétrole	0,1%	1,9%	1,8%
Gaz	5,1%	23,5%	22,8%
Biomasse & Déchets	1,9%	5,6%	5,0%
Hydro	9,0%	3,5%	8,9%
Eolien	7,0%	16,1%	10,5%
Solaire	0,8%	2,8%	1,2%
Geothermie et autres	0,1%	0,1%	0,3%

Le facteur d'émission CO₂eq/kWh pour la France en 2020 est de 83 g CO₂-eq/kWh et de 636 g CO₂-eq/kWh pour l'Allemagne.

Dans le cadre de la « base carbone » gérée et animée par l'ADEME, les travaux relatifs à la détermination des facteurs d'émissions CO₂ de production d'électricité pour le véhicule électrique étaient encore en cours de réalisation au moment de la publication de ce rapport. Leurs résultats n'étant pas disponibles, les données utilisées sont issues de l'IEA (International Energy Agency) - statistics Electricity Information 2010 (IEA 2010) pour l'horizon 2012 et de l'étude de la Commission Européenne « EU energy trends to 2030 »² pour l'horizon 2020.

¹ Rapport du Centre d'Analyse Stratégique, La voiture de demain : carburants et électricité, juin 2011, page 51, tableau comparatif établi par SAFT.

² European Commission (EC) – Directorate General for Energy: EU Energy trends to 2030 – Update 2009, Luxembourg, 2010.

Variabilité des données d'entrée

La filière du véhicule électrique étant émergente, il existe une variabilité importante des données d'entrée que les retours d'expérience, encore trop parcellaires, ne permettent pas de réduire. Afin de tenir compte de cette variabilité, des analyses approfondies ont donc été réalisées.

Pour le véhicule électrique, nous avons fait varier les paramètres significatifs suivants :

- La composition de la batterie, en modifiant les proportions des métaux utilisés dans la production de la cathode (nickel, cobalt et manganèse)
 - Scénario de référence : 33% de lithium nickel, 33% de cobalt et 33% d'oxyde de manganèse
 - Scénario avec 80% de Nickel : 80% de lithium nickel, 10% de cobalt et 10% d'oxyde de manganèse
 - Scénario avec 80% de Manganese : 10% de lithium nickel, 10% de cobalt et 80% d'oxyde de manganèse
- La densité énergétique de la batterie
 - Haute densité énergétique de la batterie avec une réduction de 20% de la masse active de la cathode par rapport au scénario de référence
 - Faible densité énergétique de la batterie avec une augmentation de 20% de la masse active de la cathode par rapport au scénario de référence
- La durée de vie de la batterie,
 - Scénario de référence avec une durée de vie batterie équivalente à celle du véhicule
 - Scénario comprenant 1,2 batterie durant la durée de vie du véhicule électrique
 - Scénario comprenant 2 batteries afin de maximiser son impact potentiel
- Le pays de production de la batterie,
 - La valeur minimale correspond à la production française des matériaux actifs de la batterie
 - La valeur maximale correspond à la production japonaise
- La consommation énergétique pendant la phase d'usage (comportement du conducteur et température extérieure).

Les variabilités dues aux cycles de conduite et à l'utilisation des systèmes de confort thermique ont été étudiées pour les véhicules électrique et thermique.

Nous noterons que l'étude ne s'est intéressée qu'au mode de recharge normal (~3kW) alors que les pertes pendant les recharges accélérées, voire rapides sont plus importantes.

2 Présentation des principaux résultats pour le véhicule particulier

L'étude a porté sur l'unité fonctionnelle définie au paragraphe 1-1, incluant un volet sur le véhicule particulier (VP) et un autre sur le véhicule utilitaire léger (VUL). Seuls sont fournis dans ce résumé les résultats du VP.

Pour chaque indicateur considéré, les résultats du véhicule particulier sont présentés de manière synthétique selon le scénario de référence 2012. Les plages de variabilités sont ensuite analysées. Enfin, une interprétation des domaines de pertinence environnementale en découlant est proposée sur un kilométrage variant de 0 à 200 000 km, sachant que le scénario de référence est de 150 000 km.

Deux hypothèses de production d'électricité sont également étudiées :

- Mix électrique Français considéré comme faiblement carboné : facteur en équivalent CO₂ pour la production d'un kWh en France de 110 g CO₂-eq/kWh en 2012
- Mix électrique Allemand considéré comme fortement carboné : facteur en équivalent CO₂ pour la production d'un kWh en Allemagne de 623 g CO₂-eq/kWh en 2012

L'objectif est de présenter la diversité des situations du véhicule électrique correspondant aux deux cas différenciés en Europe en termes de contenu carbone de la production d'électricité : ceux de la France et de l'Allemagne. Il convient de noter que la moyenne en équivalent CO₂ pour la production d'un kWh en Europe est de 489 g CO₂-eq/kWh en 2012.

2-1 Indicateur de consommation d'énergie primaire totale

Scénario de référence 2012

L'étude montre que la consommation d'énergie primaire du véhicule électrique est inférieure à celles d'un véhicule thermique essence sur l'ensemble de son cycle de vie et légèrement supérieure à celles d'un véhicule thermique diesel. Les résultats sont équivalents en France et en Allemagne.

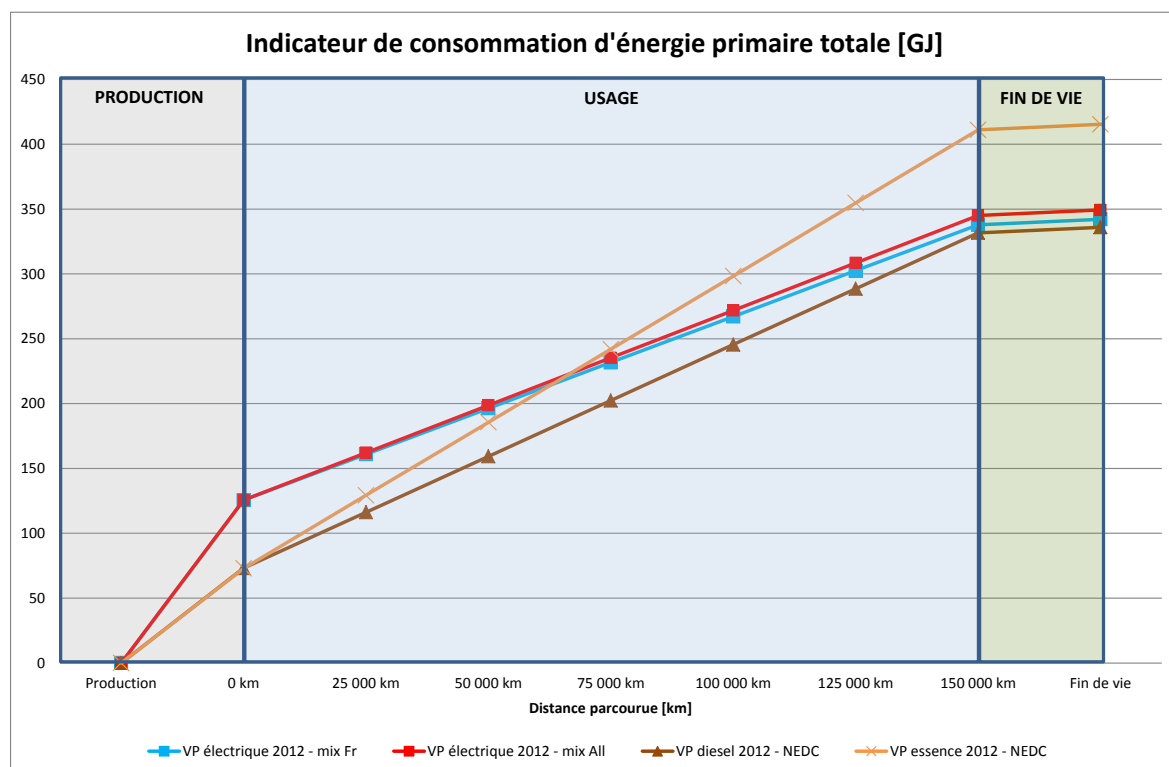


Figure 1-1 : Indicateur de la consommation d'énergie primaire totale pour les véhicules électriques français et allemand et les véhicules thermiques essence et diesel en 2012 selon le scénario de référence

Analyse des variabilités

Le graphe ci-après souligne les variabilités obtenues en faisant varier les paramètres significatifs décrits précédemment (§1-4). Par exemple, à 100 000 km, la consommation d'énergie primaire peut varier de :

- 215 Giga Joules (GJ) pour le véhicule thermique diesel à 325 GJ pour le véhicule thermique essence
- 259 GJ à 403 GJ pour le véhicule électrique en France
- 264 GJ à 411 GJ pour le véhicule électrique en Allemagne

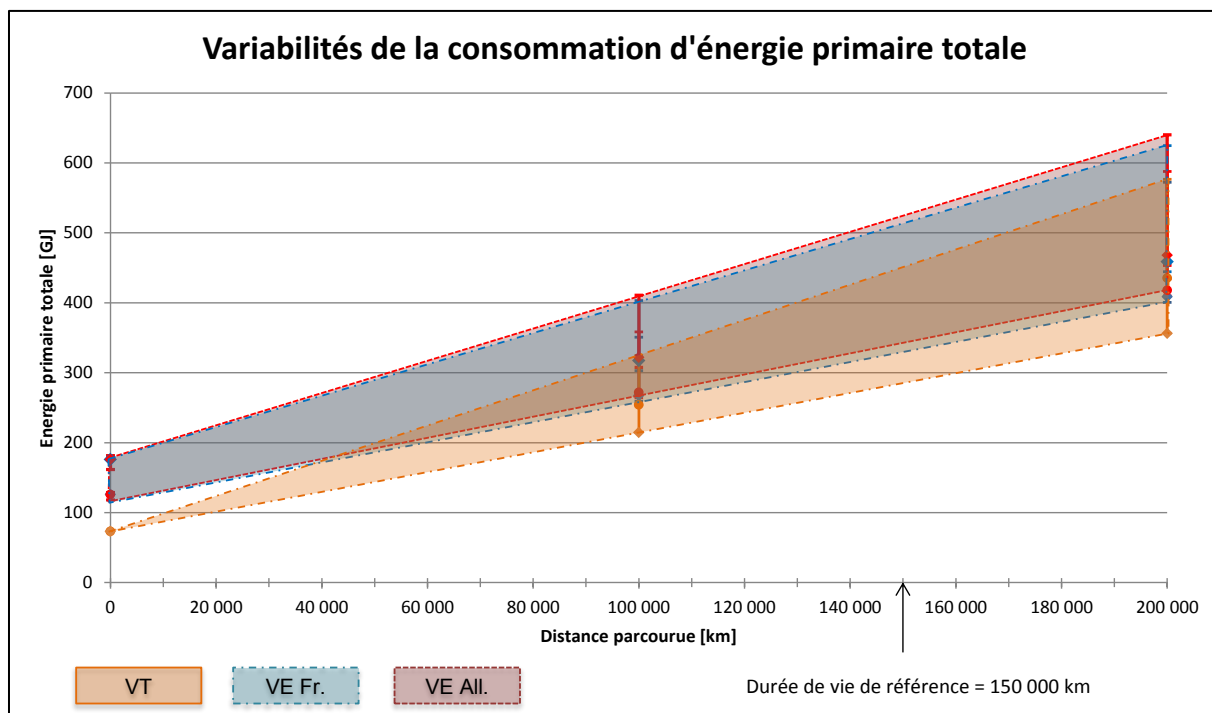


Figure 1-2 : Variabilités de la consommation d'énergie primaire totale pour les véhicules électriques français et allemand et les véhicules thermiques essence et diesel en 2012

Domaines de pertinence environnementale

La figure suivante montre, en fonction du kilométrage parcouru pendant la durée de vie du véhicule, les domaines de pertinence environnementale des véhicules électriques français et allemand par rapport au véhicule thermique sur l'indicateur d'impact énergétique. Le graphe d'analyse des variabilités ci-dessus permet de définir 3 zones sur une plage de 200 000 km :

- « Favorable au véhicule thermique » entre 0 et 40 000 km étant donné que les plages de variabilité des véhicules électriques français et allemand sont situées au-dessus de celle du véhicule thermique. Quelles que soient les variations des paramètres significatifs, le véhicule thermique a une consommation d'énergie primaire totale inférieure au véhicule électrique jusqu'à 40 000 km
- « Plutôt favorable au véhicule thermique » entre 40 000 km et 100 000 km, les plages de variabilité des véhicules électriques français et allemand étant au-dessus de celle du véhicule thermique diesel et globalement au-dessus de celle du véhicule thermique essence
- « Equivalent » à partir de 100 000 kms tant les plages de variabilités des résultats du véhicule électrique et du véhicule thermique se recouvrent

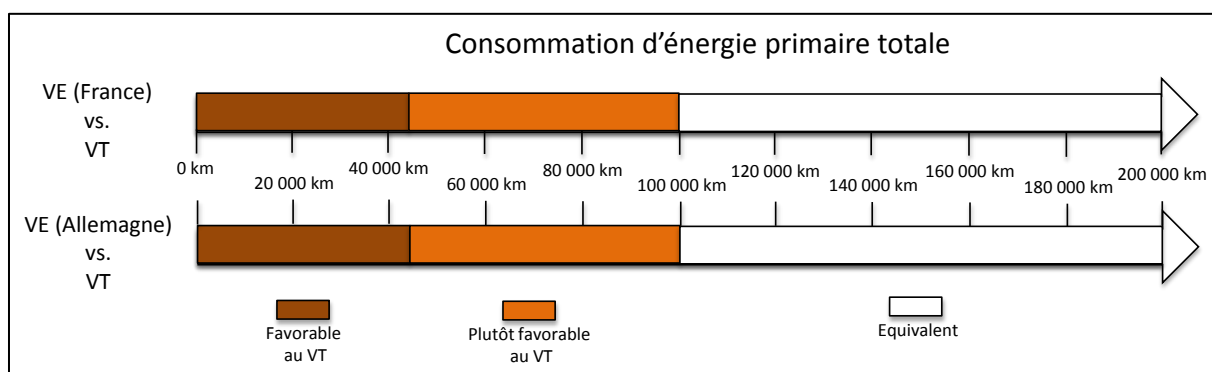


Figure 1-3 : Domaines de pertinence environnementale du véhicule électrique (France et Allemagne) comparés au véhicule thermique pour la consommation d'énergie primaire totale en 2012

2-2 Potentiel de changement climatique

Contribution de chaque étape du cycle de vie

Les contributions à l'effet de serre étant plus fortes pour le véhicule électrique dans les phases de fabrication, le gain environnemental se retrouve à l'usage après une période de roulage plus ou moins importante selon le mix de production d'électricité.

Les graphiques suivants montrent, pour le véhicule électrique (scénario français) et le véhicule diesel, la contribution des différentes étapes du cycle de vie en 2012 au potentiel de changement climatique sur la durée de vie de 150 000 kms. Notons que les résultats sont comparables entre les motorisations essence et diesel pour cet indicateur d'impact potentiel.

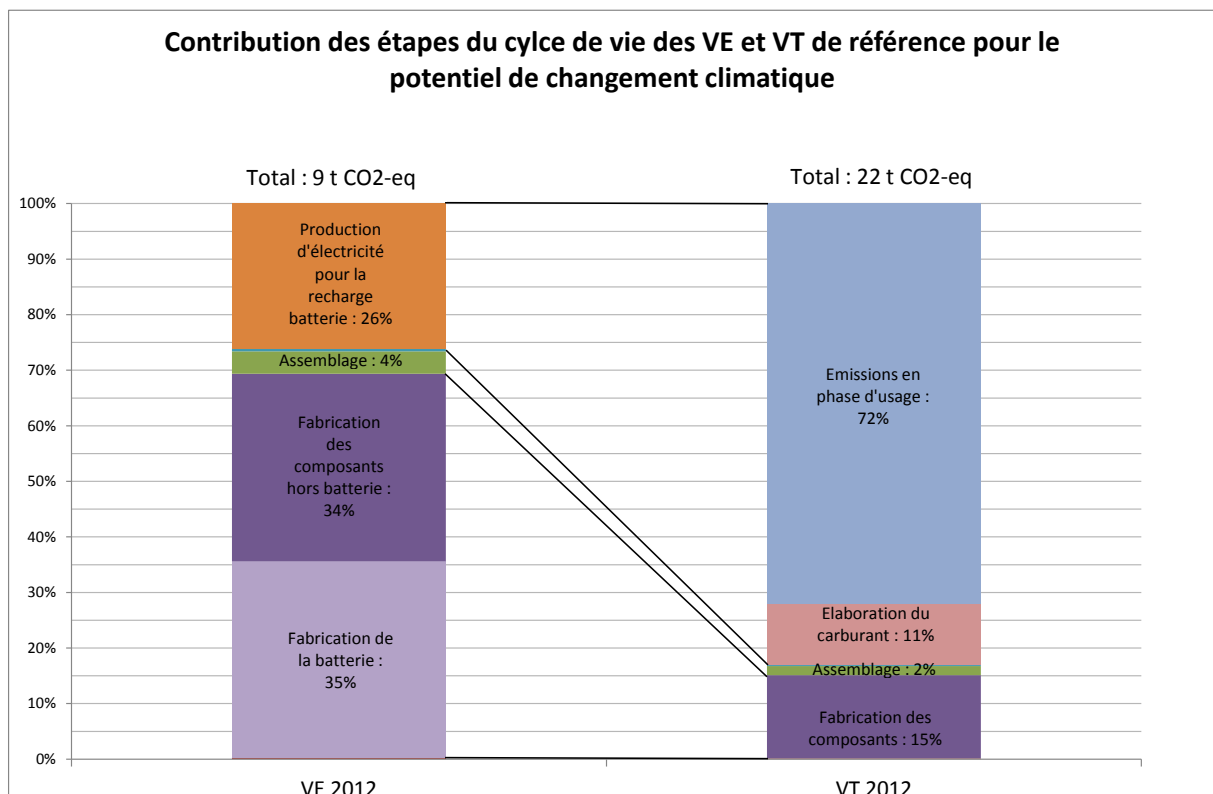


Figure 1-4 : Contributions au potentiel de changement climatique du Véhicule Electrique français et du Véhicule Thermique en 2012

Dans le contexte français, la contribution relative de la phase de fabrication des véhicules au potentiel de changement climatique est significativement plus importante pour le véhicule électrique que pour le véhicule thermique. On observe une contribution de 69% pour la fabrication du véhicule électrique contre 15 % pour celle du véhicule thermique. La production de la batterie représente à elle seule 35% de la participation du véhicule électrique au potentiel de changement climatique.

Scénario de référence 2012

Comparé aux véhicules thermiques, le véhicule électrique présente un avantage, au regard du potentiel de changement climatique, lorsque l'électricité utilisée pour la recharge des batteries est faiblement carbonée. Le bouquet électrique de la phase d'usage a un impact majeur sur le potentiel de changement climatique.

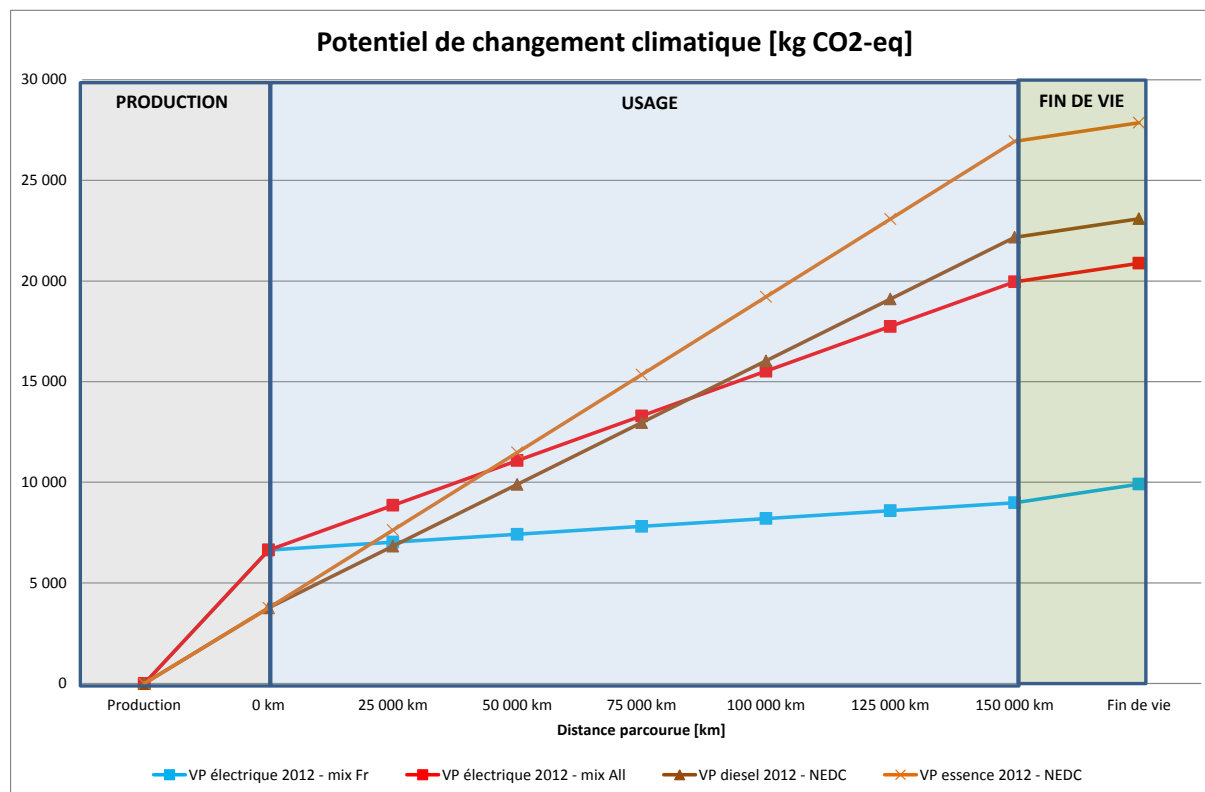


Figure 1-5 : Potentiel de changement climatique pour les véhicules électriques français et allemand et les véhicules thermiques essence et diesel en 2012 selon le scénario de référence

Analyse des variabilités

La figure suivante montre que les résultats obtenus à 100 000 km pour le potentiel de changement climatique, varient de :

- 14 t CO₂e à 21 t CO₂e pour le véhicule thermique
- 8 t CO₂e à 12 t CO₂e pour le véhicule électrique en France
- 15 t CO₂e à 23 t CO₂e pour le véhicule électrique en Allemagne

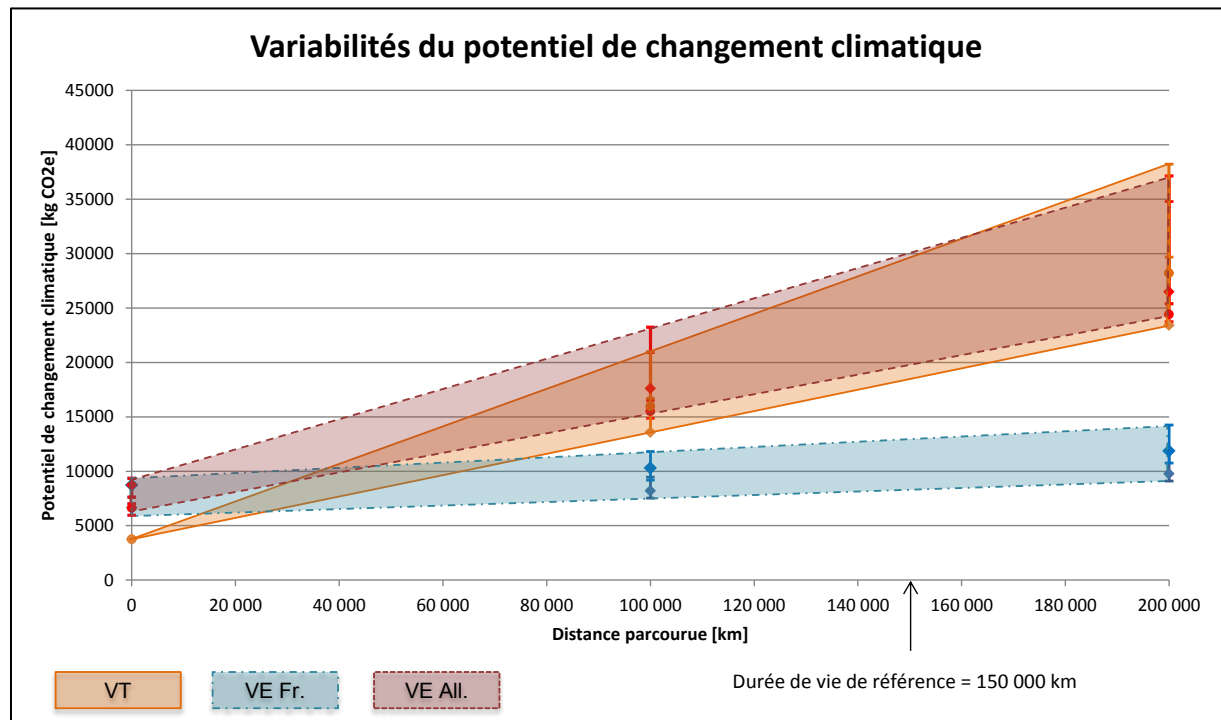


Figure 1-6 : Variabilités du potentiel de changement climatique pour les véhicules électriques français et allemand et les véhicules thermiques essence et diesel en 2012

Domaines de pertinence environnementale

Les conclusions par rapport à ces plages de variabilité peuvent être synthétisées par la figure suivante montrant 5 domaines de pertinence environnementale des véhicules électriques par rapport au véhicule thermique sur le potentiel de changement climatique. Pour l'exemple du cas français :

- « Favorable au véhicule thermique » entre 0 et 15 000 km étant donné que la plage de variabilité du véhicule électrique est située au-dessus de celle du véhicule thermique
- « Plutôt favorable au véhicule thermique » entre 15 000 km et 30 000 km, la plage de variabilité du véhicule électrique étant globalement au-dessus de la plage de variabilité du véhicule thermique malgré un recouvrement
- « Equivalent » entre 30 000 km et 50 000 km tant les plages de variabilité des résultats du véhicule électrique et du véhicule thermique se recouvrent
- « Plutôt favorable au véhicule électrique » entre 50 000 km et 80 000 km, la plage de variabilité du véhicule thermique étant globalement au-dessus de celle du véhicule électrique malgré un recouvrement
- « Favorable au véhicule électrique » entre 80 000 km et 200 000 km étant donné que la plage de variabilité du véhicule thermique est située au-dessus de la plage de variabilité du véhicule électrique. Quelles que soient les variations des paramètres significatifs, le véhicule électrique français a un impact potentiel de changement climatique inférieur au véhicule thermique à partir de 80 000 km.

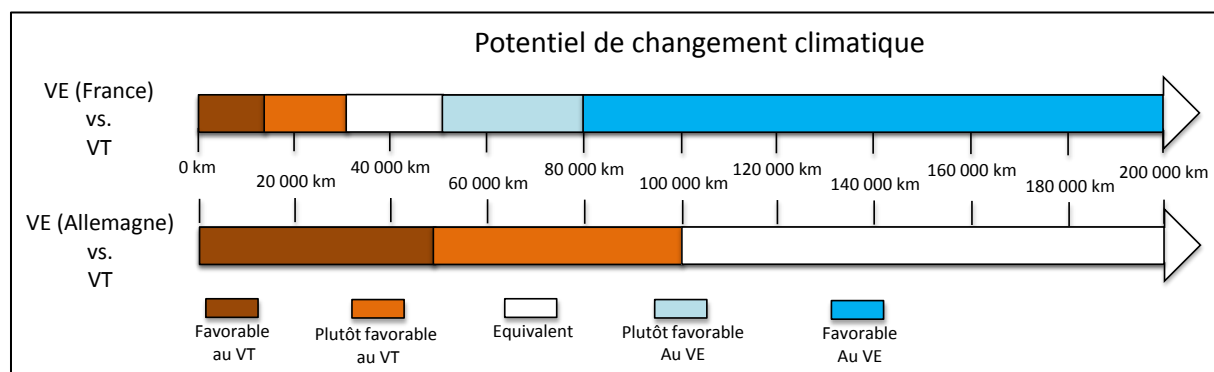


Figure 1-7 : Domaines de pertinence environnementale du véhicule électrique (France et Allemagne) comparés au véhicule thermique pour le potentiel de changement climatique en 2012

2-3 Potentiel d'épuisement des ressources fossiles

Scénario de référence 2012

Le véhicule électrique tend à réduire la consommation de ressources fossiles, pour les 2 scénarii français et allemand. En raison de l'utilisation d'une électricité principalement nucléaire, le véhicule électrique français est mieux positionné que l'allemand. Le recours aux énergies renouvelables dans les deux pays permettra d'améliorer encore la performance.

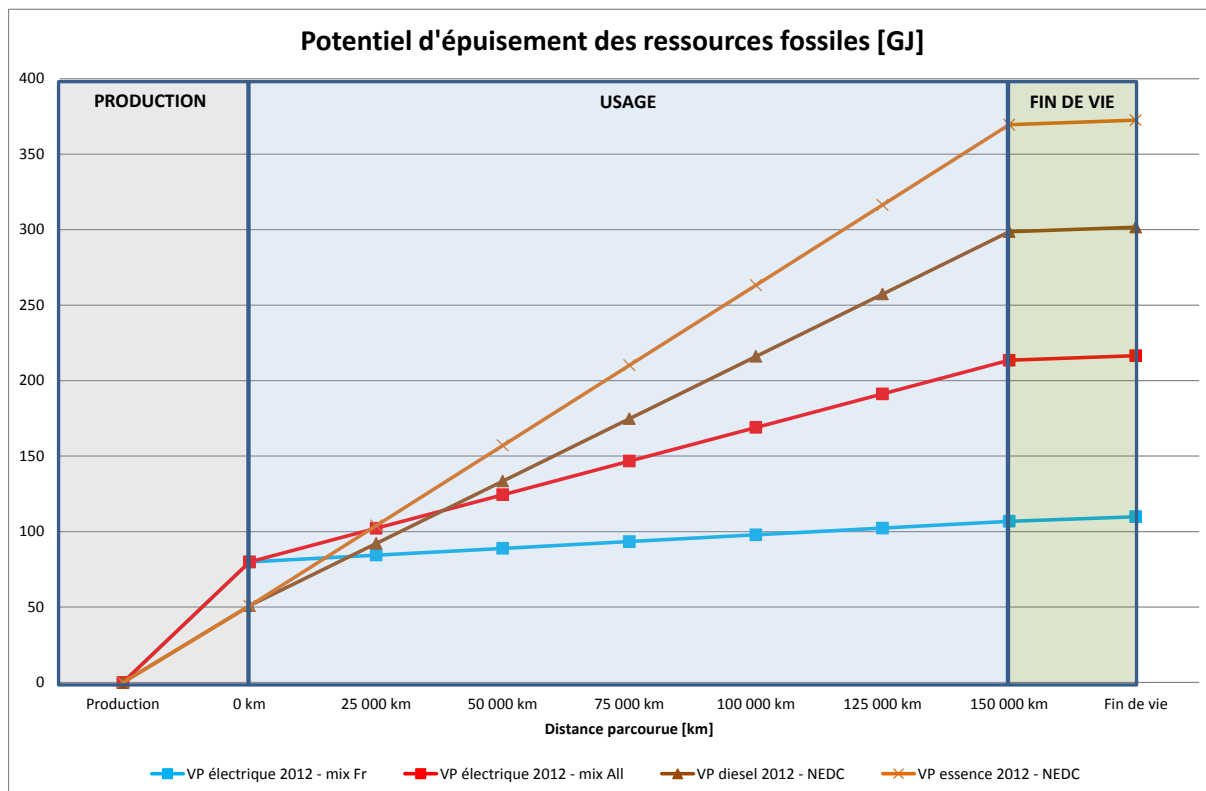


Figure 1-8 : Potentiel d'épuisement des ressources fossiles pour les véhicules électriques français et allemand et les véhicules thermiques essence et diesel en 2012 selon le scénario de référence

Analyse des variabilités

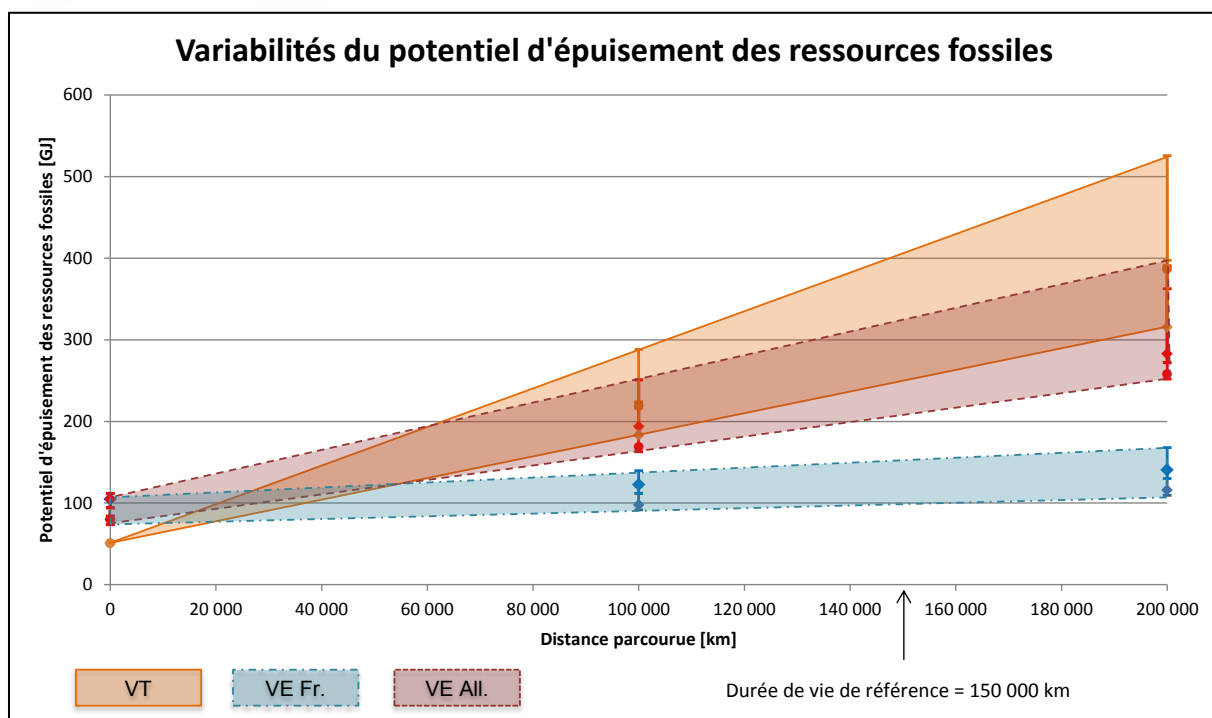


Figure 1-9 : Variabilités du potentiel d'épuisement des ressources fossiles pour les véhicules électriques français et allemand et les véhicules thermiques essence et diesel en 2012

Domaines de pertinence environnementale

Le véhicule électrique offre la possibilité de préserver des quantités significatives de ressources fossiles. Cependant, il est important de rappeler que le potentiel d'épuisement des ressources fossiles ne prend pas en compte les ressources nucléaires. Actuellement, il n'y a pas d'indicateur disponibles pour cette étude permettant de refléter la rareté de l'uranium.

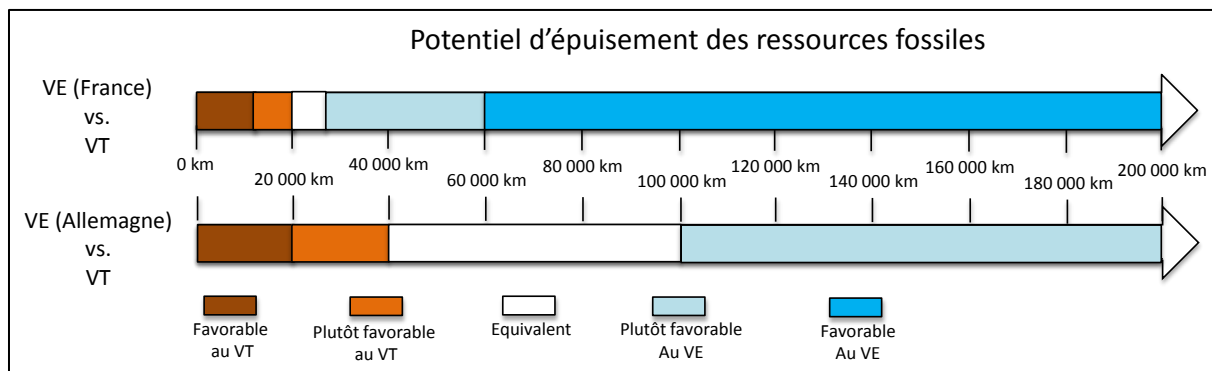


Figure 1-10 : Domaines de pertinence environnementale du véhicule électrique (France et Allemagne) comparés au véhicule thermique pour l'épuisement des ressources fossiles en 2012

2-4 Potentiel d'acidification

Scénario de référence 2012

L'indicateur d'acidification atmosphérique représente l'augmentation de la teneur en substances acidifiantes dans la basse atmosphère, à l'origine des « pluies acides » qui peuvent se traduire par une perte d'éléments minéraux nutritifs pour les arbres et la végétation, par exemple. Les substances participant à ce phénomène sont, entre autres : SO₂, NO_x, NH₃, HCl, HF.

Les scénarios modélisés (que ce soit en France ou en Allemagne et quel que soit le kilométrage parcouru) montrent que la contribution du véhicule électrique est plus importante que celle du véhicule thermique sur cet indicateur.

La production d'électricité et surtout la fabrication de la batterie ont une contribution majeure sur cet indicateur. Les émissions de SO₂ pendant la phase d'extraction des métaux nécessaires à l'élaboration de la batterie sont en effet importantes. La source principale de SO₂ vient de la production du cobalt et du nickel utilisés dans la masse active de la batterie. Pour les véhicules thermiques, le potentiel d'acidification vient principalement des émissions de raffinerie (SO₂ et NO_x) et des émissions de NO_x en phase d'usage. Les véhicules Diesel émettent plus de NO_x que les véhicules essence.

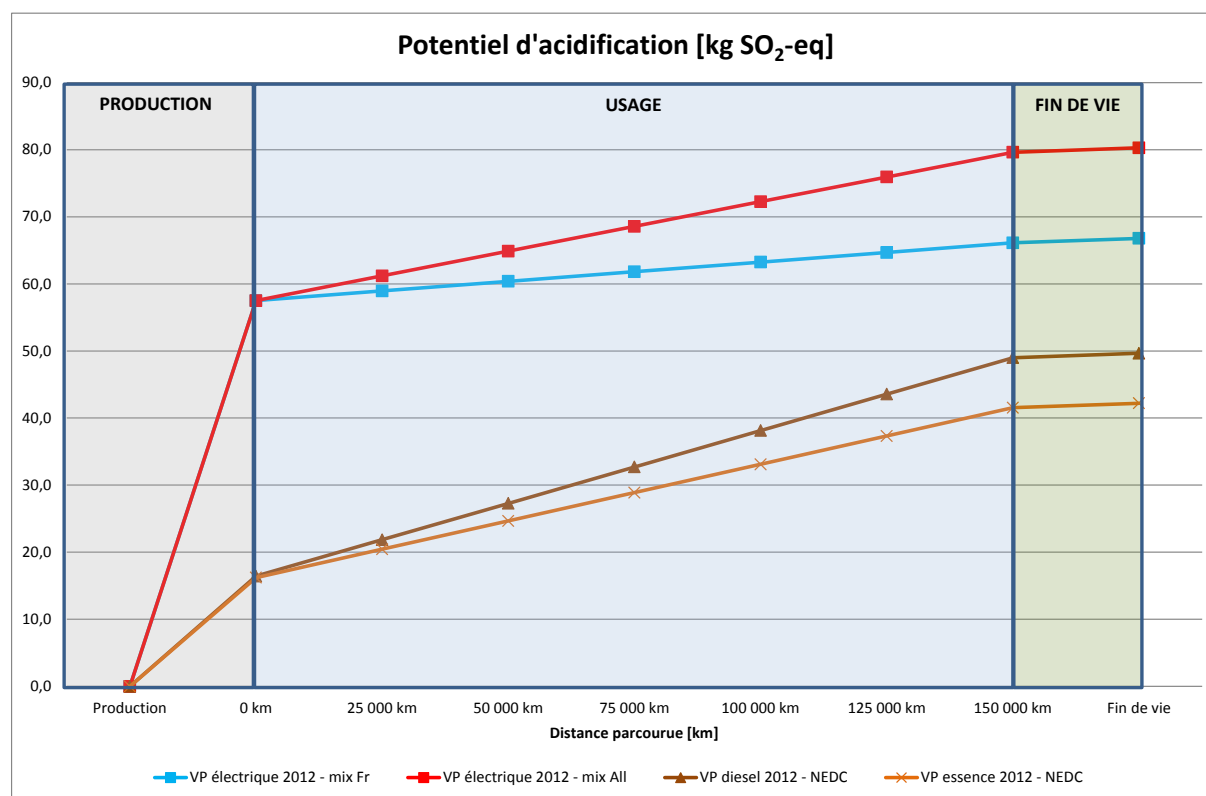


Figure 1-11 : Potentiel d'acidification pour les véhicules électriques français et allemand et les véhicules thermiques essence et diesel en 2012 selon le scénario de référence

Analyse des variabilités

L'analyse des variabilités dévoile l'importance des matériaux rentrant dans la composition de la batterie, offrant des marges de progression importantes. Pour les véhicules thermiques, les variabilités sont faibles et uniquement induites lors de la phase d'usage. Les fortes variabilités de cet indicateur pour le véhicule électrique apparaissent lors de la phase de fabrication en faisant varier les hypothèses de composition et de durée de vie de la batterie.

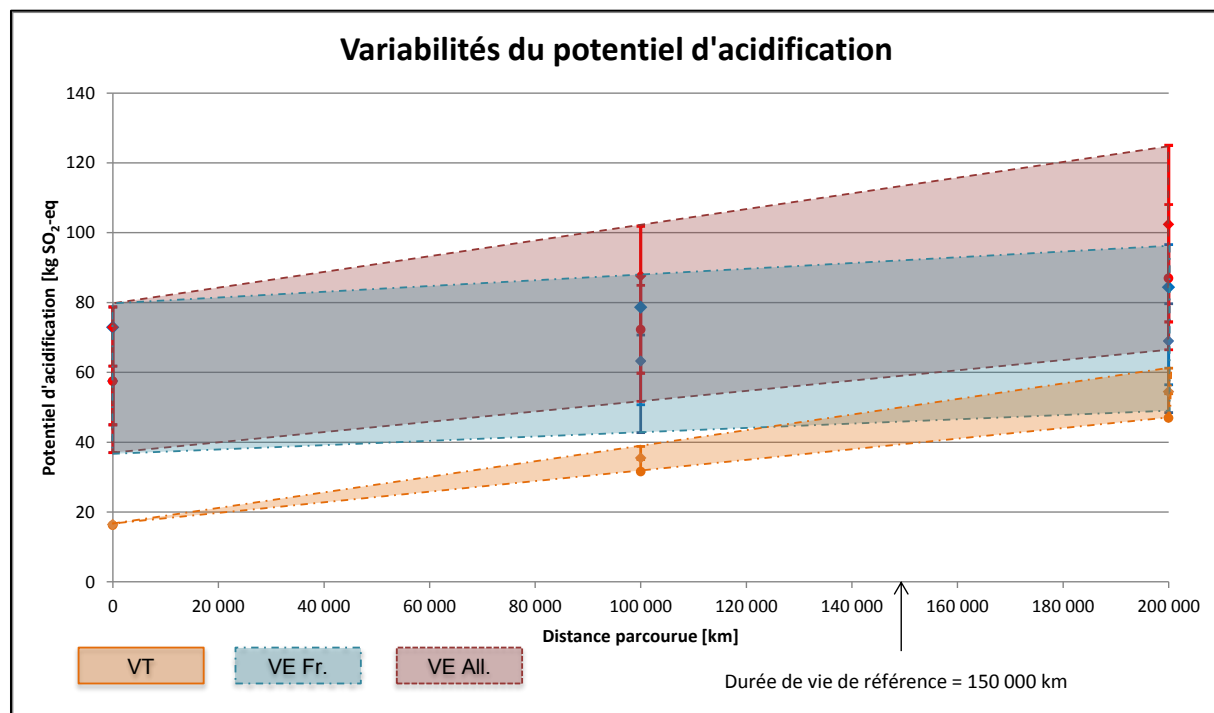


Figure 1-12 : Variabilités du potentiel d'acidification pour les véhicules électriques français et allemand et les véhicules thermiques essence et diesel en 2012

Domaines de pertinence environnementale

Le potentiel d'acidification du véhicule électrique dans le scénario de référence est plus élevé que celui du véhicule thermique. Cette différence s'explique principalement par la responsabilité dans le bilan de la phase de fabrication du véhicule électrique et notamment de la batterie. Un potentiel d'optimisation important pour le véhicule électrique apparaît dans l'utilisation de nouveaux composants de stockage d'énergie.

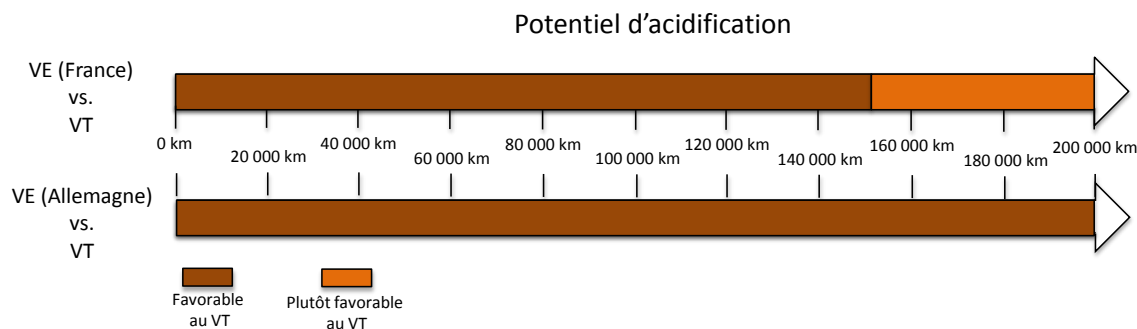


Figure 1-13 : Domaines de pertinence environnementale du véhicule électrique (France et Allemagne) comparés au véhicule thermique pour le potentiel d'acidification en 2012

2-5 Potentiel d'eutrophisation de l'eau

Scénario de référence 2012

Pour le potentiel d'eutrophisation de l'eau, le véhicule électrique présente un avantage par rapport au véhicule diesel. Le gain est moins significatif pour le véhicule essence. Le potentiel d'eutrophisation est en partie lié aux émissions de NOx. Pour le véhicule électrique, les émissions de NOx sont dues à l'extraction des métaux nécessaire à la fabrication de la batterie. Le véhicule Diesel a un potentiel d'eutrophisation plus important que le véhicule essence en raison de ses émissions de NOx plus importantes en phase d'usage.

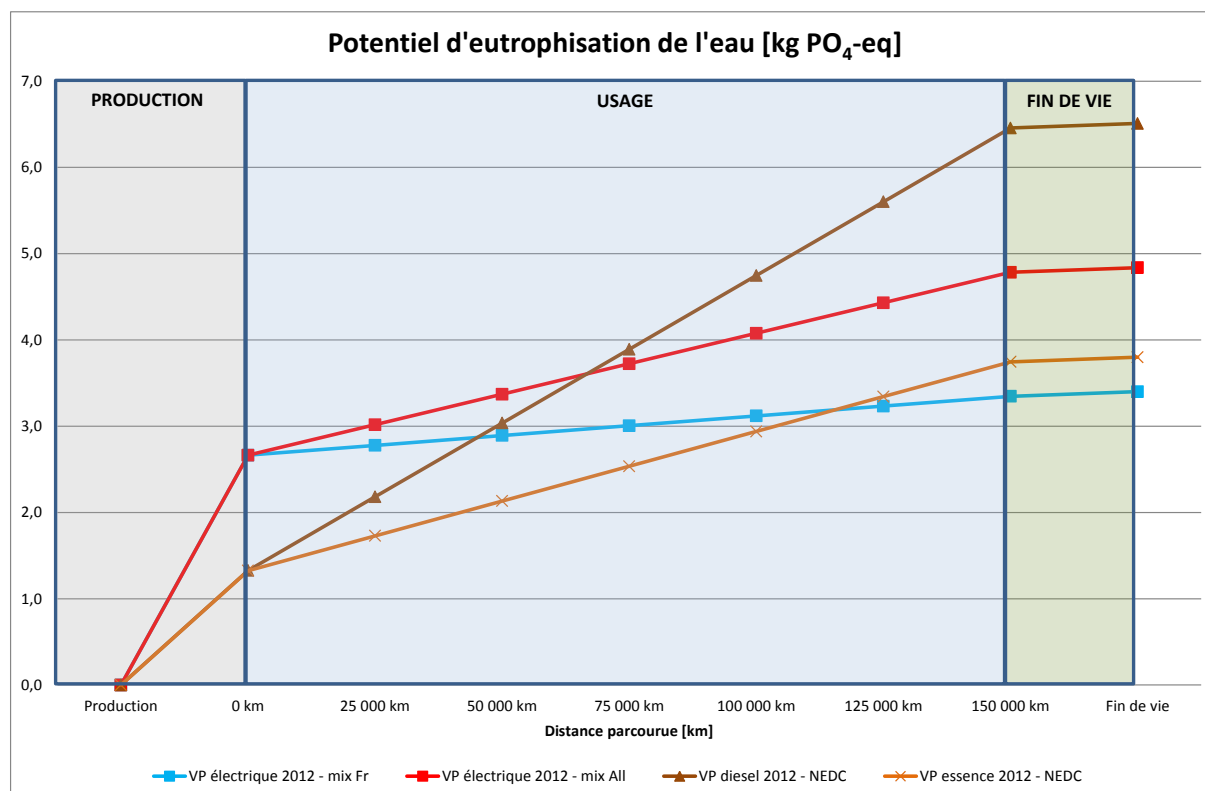


Figure 1-14 : Potentiel d'eutrophisation de l'eau pour les véhicules électriques français et allemand et les véhicules thermiques essence et diesel en 2012 selon le scénario de référence

Analyse des variabilités

Pour l'analyse des variabilités de cet impact, une distinction a donc été effectuée entre le véhicule diesel et le véhicule essence.

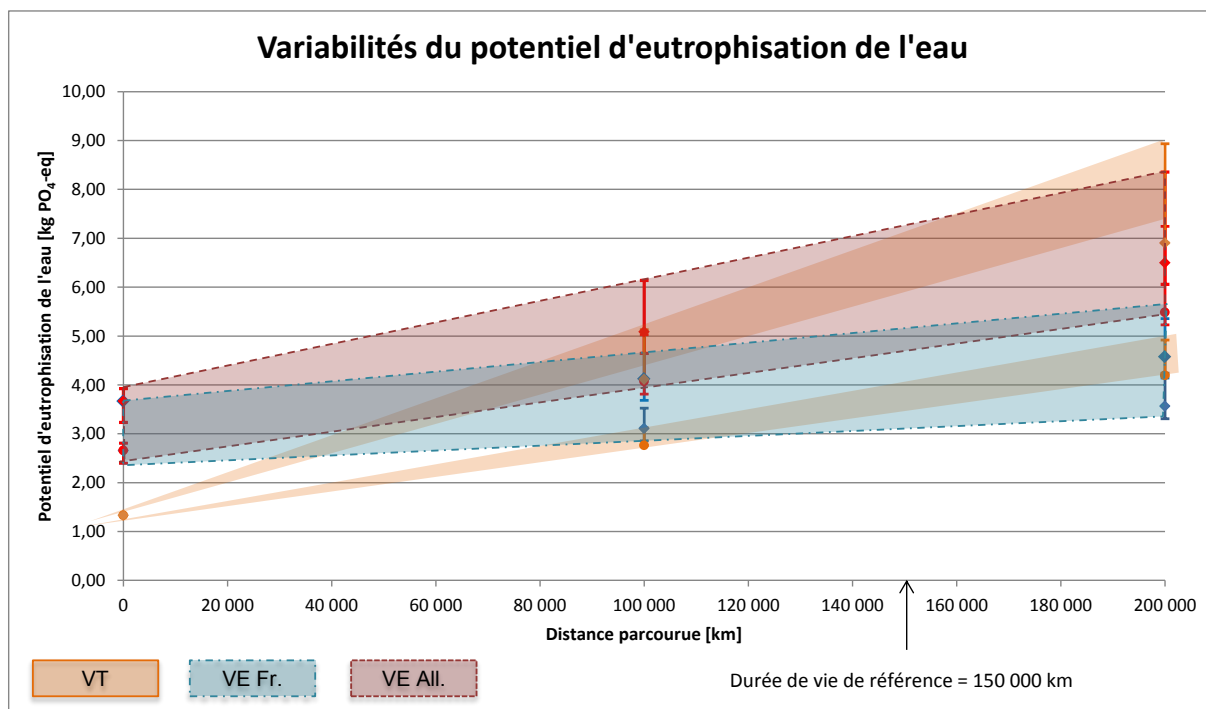


Figure 1-15 : Variabilités du potentiel d'eutrophisation pour les véhicules électriques français et allemand et les véhicules thermiques essence et diesel en 2012

Domaines de pertinence environnementale

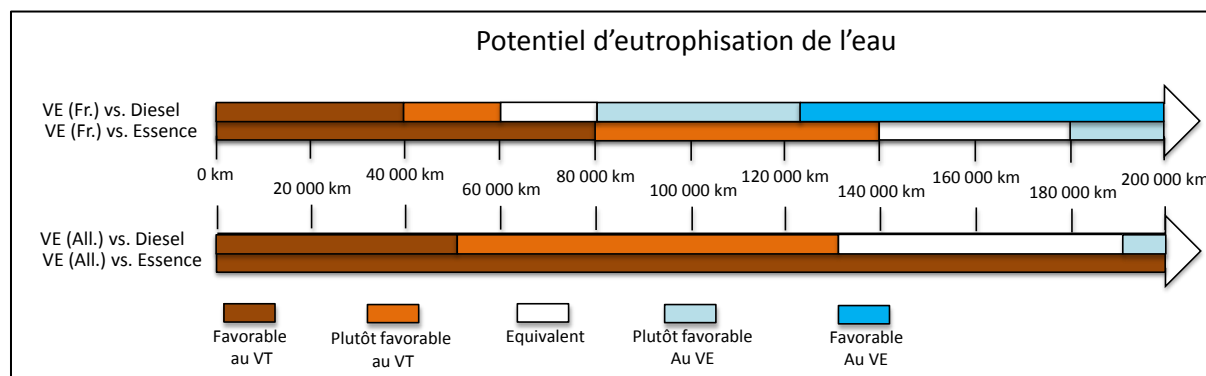


Figure 1-16 : Domaines de pertinence environnementale du véhicule électrique (France et Allemagne) comparés au véhicule thermique pour le potentiel d'eutrophisation de l'eau en 2012

2-6 Potentiel de création d'ozone photochimique

Scénario de référence 2012

Le véhicule électrique affiche un net bénéfice par rapport au véhicule thermique. Le potentiel de création d'ozone photochimique est principalement dû aux émissions de composés organiques volatiles (COV) des motorisations essence et diesel en phase d'usage. S'agissant d'un problème de pollution locale, le véhicule électrique favorise la diminution de cet impact potentiel à l'endroit où le véhicule est utilisé (notamment en milieu urbain).

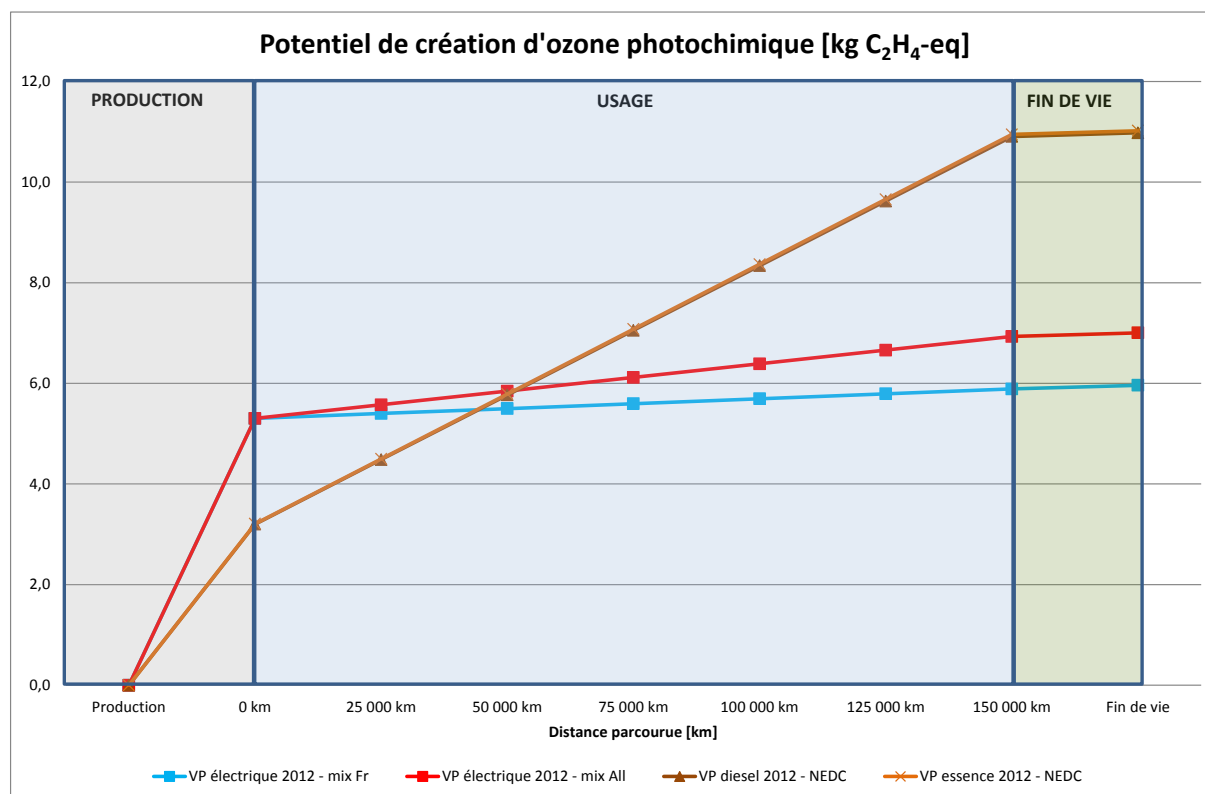


Figure 1-17 : Potentiel de création d'ozone photochimique pour les véhicules électriques français et allemand et les véhicules thermiques essence et diesel en 2012 selon le scénario de référence

Analyse des variabilités

L'analyse des variabilités montre de faibles écarts en phase d'usage pour les véhicules thermiques sur cet indicateur. Les variabilités sont dues aux différents cycles considérés. Pour les véhicules électriques, les émissions en phase de production sont plus importantes que les véhicules thermiques avec une forte variabilité due à la composition et à la durée de vie de la batterie.

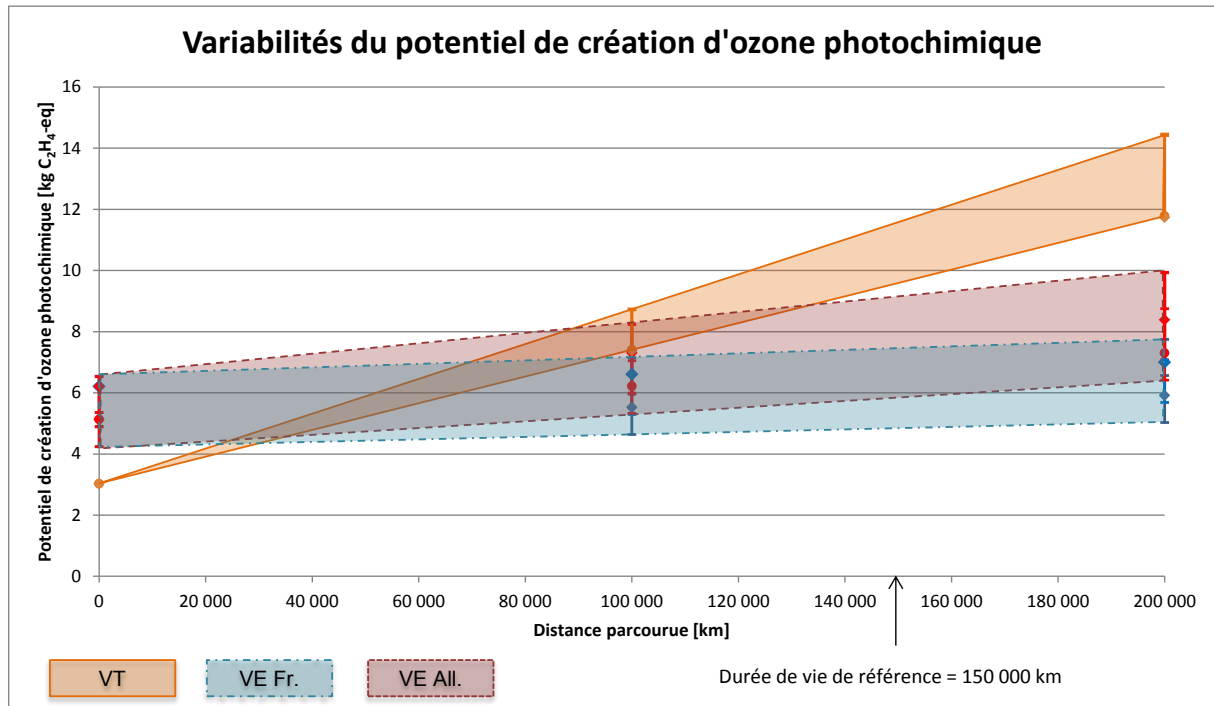


Figure 1-18 : Variabilités du potentiel de création d'ozone photochimique pour les véhicules électriques français et allemand et les véhicules thermiques essence et diesel en 2012

Domaines de pertinence environnementale

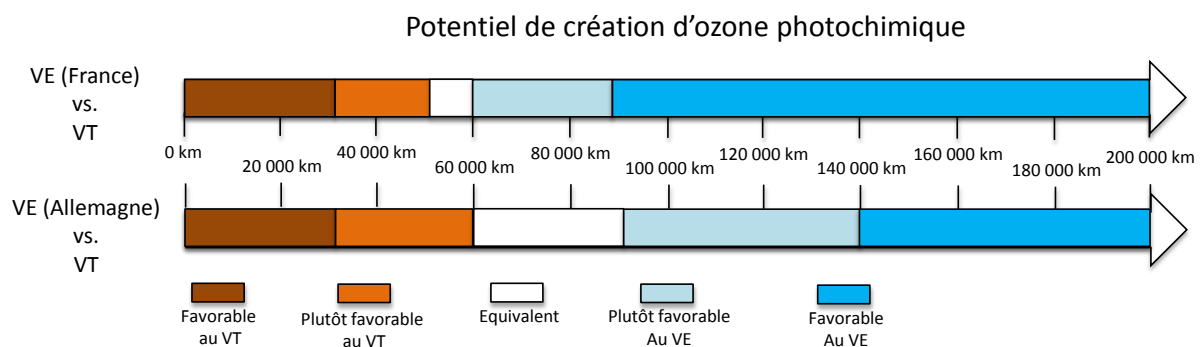


Figure 1-19 : Domaines de pertinence environnementale du véhicule électrique (France et Allemagne) comparés au véhicule thermique pour le potentiel de création d'ozone photochimique en 2012

2-7 Synthèse des domaines de pertinence environnementale

2012

En synthèse des résultats précédents, nous pouvons récapituler les domaines de pertinence environnementale des indicateurs considérés pour le cas du véhicule électrique comparé aux véhicules thermiques essence et diesel en France, en 2012.

France 2012	Impact énergétique	Potentiel de contribution globale à l'effet de serre	Potentiel d'épuisement des ressources fossiles	Potentiel d'acidification atmosphérique	Potentiel d'eutrophisation de l'eau	Potentiel d'ozone photochimique
Véhicule électrique vs. Véhicule thermique	Quasi-équivalent, plutôt favorable au VT en dessous de 100 000 km	Plutôt favorable au VE à partir de 50 000 km	Plutôt favorable au VE à partir de 30 000 km	Défavorable au VE	Plutôt favorable au VE à partir de 80 000 km vs. Diesel Plutôt favorable au VT en dessous de 190 000 km vs Essence	Plutôt favorable au VE à partir de 60 000 km

Figure 1-20 : Domaines de pertinence environnementale du véhicule électrique en France comparés aux véhicules thermiques essence et diesel pour les six impacts potentiels retenus en 2012

Il convient de préciser que les résultats pour le véhicule utilitaire montrent les mêmes domaines de pertinence environnementale.

Mise en perspective des résultats

Pour mettre en perspective ces résultats d'ACV, une « normation » est proposée pour le cas français. Pour chaque indicateur, la contribution des véhicules est divisée par la contribution de tous les secteurs d'activité au niveau mondial, par habitant et par an. Cette approche permet de déterminer à quels impacts les véhicules contribuent le plus, relativement aux autres secteurs d'activités. Il peut donc s'agir d'un outil efficace pour considérer les différents enjeux sur une échelle globale. Il est toutefois essentiel de préciser que la plus grande contribution ne correspond pas nécessairement à l'impact le plus préjudiciable. Compte-tenu de l'incertitude des données statistiques utilisées pour le calcul, seuls les ordres de grandeur sont significatifs.

A titre explicatif, la figure suivante montre par exemple que la consommation énergétique d'un véhicule électrique sur toute sa durée de vie représente 5 fois la consommation mondiale d'énergie primaire totale par habitant par année.

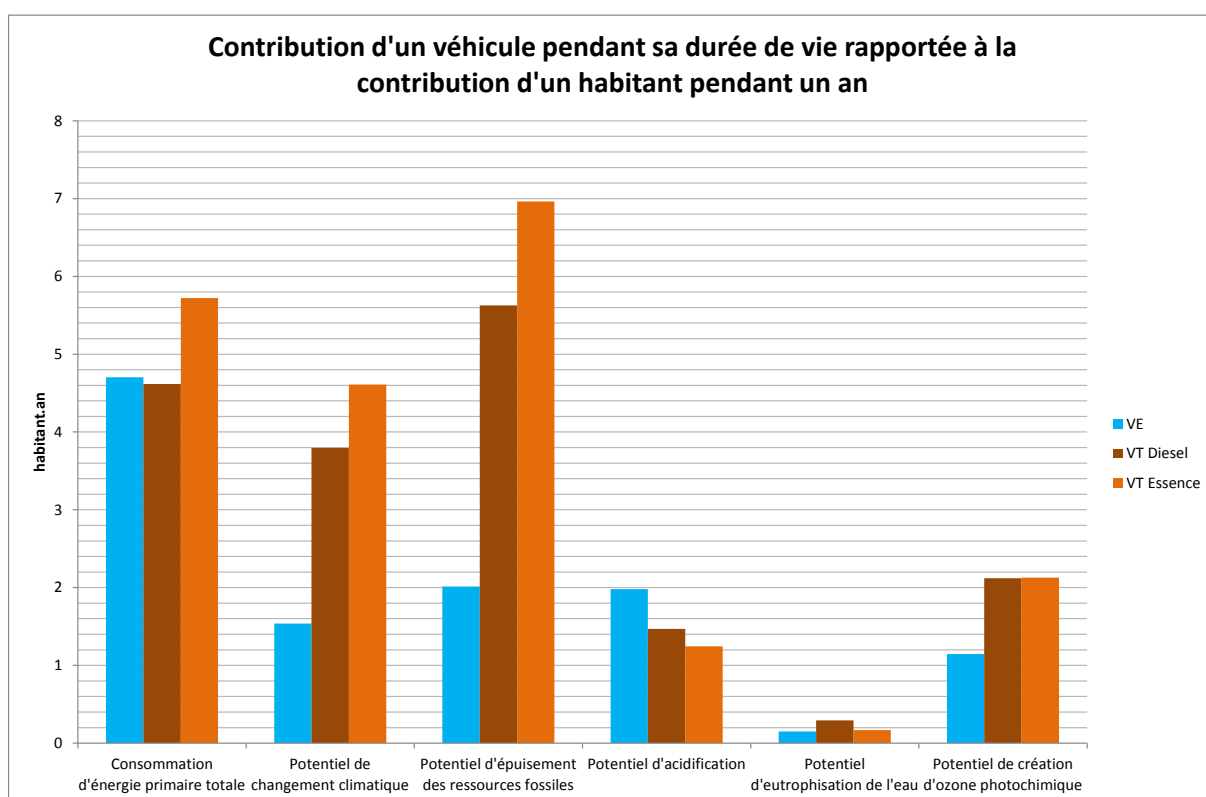


Figure 1-21 : Normation des six impacts potentiels retenus pour le VP en France en 2012

Cette figure montre que les contributions majoritaires des véhicules thermiques actuels sont concentrées sur la consommation d'énergie primaire totale, le potentiel de changement climatique et le potentiel d'épuisement des ressources fossiles.

La substitution d'un VP thermique par un VP électrique dans le cas du scénario de référence France 2012 permettrait d'améliorer significativement les contributions du potentiel de changement climatique et du potentiel d'épuisement des ressources fossiles. En revanche, la contribution d'un VE à la consommation d'énergie primaire totale n'est pas moins importante que celle d'un VT. Nous pouvons également noter la contribution plus importante du VE pour le potentiel d'acidification.

2-8 Tendances 2020 par rapport à 2012

La plupart des interprétations faites pour le scénario de référence de 2012 sont valables pour le scénario 2020.

Les principales évolutions sont les suivantes :

- La batterie Lithium Fer Phosphate (LiFePO₄), qui représente 50% de la composition de la batterie pour le scénario 2020, réduit les impacts potentiels de la batterie de 20 à 40% à l'exception du potentiel d'épuisement des ressources minérales
- L'évolution des bouquets électriques nationaux à l'horizon 2020 ne change pas les conclusions de l'étude. En effet, l'accroissement de la part d'énergie renouvelable n'est pas suffisante pour modifier sensiblement les indicateurs, notamment pour l'indicateur du changement climatique en Allemagne
- A l'horizon 2020, l'impact du confort thermique et de la performance de la batterie seront moindres pour le véhicule électrique comparé au scénario 2012, ainsi les plages de variabilités tendent à rétrécir
- En 2020, la consommation d'énergie primaire des véhicules diesel et essence est plus faible qu'en 2012 grâce à l'allègement des véhicules. Pour le véhicule électrique, les hypothèses de production d'électricité et de fabrication de la batterie entraînent de fortes variabilités. Le Plan climat-énergie européen fixe des objectifs visant à diminuer de 20% les émissions de gaz à effet de serre, de réduire de 20% la consommation d'énergie et d'atteindre 20% d'énergie renouvelables dans le mix énergétique d'ici 2020. Ainsi, les scénarios 2020 reflètent les changements à venir des mix électriques nationaux et du mix moyen européen liés aux politiques de réduction de gaz à effet de serre, de sûreté énergétique, d'électricité d'origine nucléaire, en Europe et dans les différents états membres. Pour les scénarios 2020, les mix énergétiques utilisés proviennent de l'étude de la Commission Européenne « EU Energy Trends to 2030 »³. Pour la France, deux scénarios additionnels sont calculés à partir des informations issues de l'étude « des scénarios prospectifs Energie-Climat-Air à l'horizon 2030 » de la DGEC

Nous pouvons synthétiser les tendances 2020 par rapport à 2012 en comparant les indicateurs d'impact potentiel à 150 000 km pour les véhicules électrique, diesel et essence de référence à ces deux horizons temporels.

France 2020 vs. France 2012	Consommation d'énergie primaire totale [GJ]	Potentiel de changement climatique [kg CO ₂ -Eq]	Potentiel d'épuisement des ressources fossiles [MJ]	Potentiel d'acidification [kg SO ₂ -Eq]	Potentiel d'eutrophisation de l'eau [kg Phosphate-Eq]	Potentiel de création d'ozone photochimique [kg Ethene-Eq]
Véhicule électrique	Quasi-équivalent	Quasi-équivalent	Quasi-équivalent	Amélioration importante	Quasi-équivalent	Amélioration
Véhicule diesel	Amélioration	Amélioration importante	Amélioration importante	Quasi-équivalent	Amélioration importante	Amélioration
Véhicule essence	Amélioration	Amélioration importante	Amélioration importante	Dégradation	Dégradation importante	Amélioration

Figure 1-22 : Evolutions attendues à l'horizon 2020 pour les véhicules électrique, thermiques essence et diesel sur les six impacts potentiels retenus

³ Les scénarios de base de l'étude « European Commission (EC) – Directorate General for Energy: EU Energy trends to 2030 – Update 2009, Luxembourg, 2010 » sont utilisés.

3 Matières critiques et nuisances locales

Cette phase de l'étude consiste à fournir des éléments complémentaires permettant de mettre en perspective les résultats de l'analyse de cycle de vie. Ces informations, bien que non intégrées dans l'ACV, doivent pourtant être considérées.

3-1 Etude des matières critiques

Des matières considérées comme critiques sont mobilisées pour la production des batteries des véhicules électriques, mais aussi dans les pots catalytiques des véhicules thermiques ou la fabrication de carburants. Une estimation des volumes consommés à l'horizon 2020 par les véhicules européens a été comparée à la production annuelle, ainsi qu'à la taille des ressources estimées. La flotte européenne de véhicule électrique à l'horizon 2020 est estimée à un parc entre 110 000 et 638 000 unités. Ces prévisions s'appuient sur l'étude JRC « Plug-in Hybrid and Battery Electric Vehicles Market penetration scénarios of electric drive vehicles ».

Il ressort de cette analyse que le développement du véhicule électrique en Europe à l'horizon 2020 ne constitue pas une menace pour l'approvisionnement des matériaux critiques identifiés dans l'étude. Seul l'approvisionnement en cobalt dont la consommation annuelle liée au véhicule électrique représenterait près de 7% de la production annuelle mondiale peut être sensible. Du fait de son coût, les fabricants de batteries cherchent d'ores et déjà à le substituer. La réduction de la proportion de cobalt dans la batterie entraînera une amélioration de la performance environnementale du véhicule électrique.

3-2 Etudes des nuisances locales

Il est important de rappeler ici que les impacts considérés dans une ACV classique ne permettent pas de prendre en considération les bénéfices locaux du véhicule électrique en ville en termes de pollution atmosphérique et de bruit. Une étude spécifique sur les effets potentiellement bénéfiques de l'introduction de VE sur la pollution atmosphérique locale a donc été menée. Les résultats sont présentés dans le deuxième module du présent rapport. Bien que ciblées sur le développement du véhicule électrique en milieu urbain, les émissions générées par les centrales de production d'électricité et par la filière de fabrication du véhicule électrique ont été évaluées afin de considérer l'éventuel report des émissions du lieu d'usage des véhicules vers ces sites de production.

L'étude propose ainsi une première analyse de la contribution d'un parc de véhicule électrique sur la pollution atmosphérique locale et le bruit. Les volumes estimés pour une ville de 500 000 habitants à l'horizon 2020 sont basés sur les prévisions nationales de 2M de VE à l'horizon 2020 dont 2/3 d'hybride et 1/3 de tout électrique. Conformément au Livre Vert⁴, l'objectif de 2M de VE sur le territoire national se traduit en un parc de 5 000 VE à l'échelle d'une ville de 500 000 habitants. Cependant, une telle taille de parc ne représente que 1,8% du parc de véhicules particuliers de la ville et n'est pas suffisant pour conduire à un effet sensible sur la qualité de l'air et les nuisances sonores.

⁴ Livre Vert, 2011, Negre, L., Livre Vert sur les infrastructures de recharge ouvertes au public pour les véhicules « décarbonés », Avril 2011

Cependant, dans le but de renforcer la lutte contre la pollution de l'air dans les agglomérations, l'Union Européenne a mis en chantier des directives au niveau de la réduction des émissions atmosphériques. A l'horizon 2020, des contraintes sur la qualité de l'air pourraient être imposées aux grandes villes Européennes renforçant ainsi l'attractivité du véhicule électrique comme solution de mobilité.

En matière d'émissions polluantes, les impacts négatifs du véhicule électrique sont principalement localisés aux points de production d'électricité et de fabrication de la batterie. Le véhicule électrique présente donc un net avantage sur son équivalent thermique en cas de sévérisation des mesures sur la qualité de l'air dans des zones dédiées.

4- Suites envisageables de l'étude

4-1 Sources d'amélioration

Certains points méthodologiques peuvent être approfondis afin d'enrichir la qualité des résultats :

- Les facteurs d'émissions utilisés pour les véhicules thermiques ainsi que des valeurs prospectives du contenu carbone de l'électricité sont en cours de mises à jour. Ces dernières sont étudiées dans la Base Carbone gérée et animée par l'ADEME. Les résultats de l'étude ACV pourraient ainsi bénéficier de ces dernières évolutions.
- Il apparaît également souhaitable de consolider les travaux sur les infrastructures de recharge et les conditions d'usage réel du véhicule électrique,
- L'indicateur du potentiel d'épuisement des ressources minérales ne prend pas en compte l'Uranium nécessaire à la production d'énergie nucléaire. D'autres méthodologies de cet indicateur potentiel existent mais ne permettent pas d'identifier l'impact de l'épuisement de cette ressource,
- Les méthodologies disponibles pour les indicateurs potentiels de toxicité et d'écotoxicité (non pris en compte dans le cadre de cette étude) mériteraient d'être étudiées.

4-2 Approfondissements sur l'évolution du bouquet électrique

Cette étude met en évidence l'importance cruciale du bouquet électrique pour l'intérêt environnemental du véhicule électrique. Dès lors, il apparaît nécessaire d'étudier :

- l'impact de la décarbonisation progressive de l'électricité explicitement au cœur de certaines politiques énergétiques européennes
- les effets d'un système incitatif de « réseau intelligent » ou « smart grid » visant à éviter de recourir aux modes de production d'électricité «de pointe», plus coûteux économiquement et souvent plus impactant en termes d'environnement⁵

⁵ Les moyens dits « de pointe » couvrent la production d'électricité thermique (qui est plus impactante que la production d'électricité nucléaire de base en termes de gaz à effet de serre, d'acidification, d'eutrophisation) et dans une moindre mesure l'hydraulique (qui affiche en revanche des impacts moindres).

4-3 Approfondissements sur l'évolution de la batterie

La forte contribution de la fabrication de la batterie au bilan environnemental global du véhicule souligne la nécessité de poursuivre l'étude pour qualifier les avantages apportés par :

- des technologies alternatives de batteries – par exemple LiFePO_4 ou LiMn_2O_4 ,
- le recyclage des batteries lorsqu'elles arriveront en fin de vie,

4-4 Approfondissements sur l'évolution des véhicules et des usages

Cette étude a été faite sur des véhicules électriques dont les caractéristiques (taille, masse, puissance...) sont très proches des véhicules thermiques actuels. Une étude ciblée sur des véhicules très légers, aux performances adaptées à la ville (accélération, vitesse max), possédant soit une batterie de taille réduite pour le véhicule électrique soit un moteur thermique adapté pour le véhicule thermique permettrait de comparer le potentiel des technologies électrique et thermique, voire hybride, sur de telles utilisations, notamment dans le cadre de services de mobilité.

Le développement de ces nouveaux services de mobilité peut également générer une utilisation plus intensive des véhicules électriques permettant ainsi d'amortir la phase de fabrication. Une évaluation complémentaire pourrait être nécessaire, notamment si ces services font appel à de la recharge rapide, mode qui n'a pas été considéré dans l'étude.

Préface

Ce rapport présente les travaux du projet «Elaboration selon les principes des ACV des bilans énergétiques, des émissions de gaz à effet de serre et des autres impacts environnementaux induits par l'ensemble des filières de véhicules électriques et de véhicules thermiques, VP de segment B (citadine polyvalente) et VUL à l'horizon 2012 et 2020 réalisé par PE INTERNATIONAL et Gingko 21 pour l'ADEME.»

L'étude comporte deux modules :

- **Module 1**
 - o Recherche bibliographique sur les études existantes dans le domaine des véhicules électriques et thermiques ;
 - o Réalisation d'une ACV comparative entre un véhicule électrique et un véhicule thermique pour une voiture particulière du segment B et un véhicule utilitaire, aux horizons 2012 et 2020 ;
 - o Compilation des résultats de l'ACV dans un rapport en conformité avec la norme ISO 14044.
- **Module 2**
 - o Compilation des aspects environnementaux qualitatifs liés aux véhicules électriques complémentaires à l'ACV : impacts locaux et matières critiques ;
 - o Analyse et intégration de ces éléments dans le rapport final pour une mise en perspective des résultats d'ACV.

1. Objectifs de l'étude

1.1 Contexte

Avec un plan ambitieux de véhicules décarbonés, le gouvernement assure la promotion de véhicules électriques. Les constructeurs développent parallèlement des véhicules électriques et également hybrides. Les bénéfices de ces véhicules n'ont toutefois pas fait l'objet d'études complètes et approfondies sur la base de données fiables et consensuelles, et des informations contradictoires sont diffusées sur les bénéfices et coûts environnementaux comparés des véhicules électriques et thermiques. Dans ce contexte, l'ADEME et ses ministères de tutelle ont jugé indispensable de collecter et d'analyser les données nécessaires au calcul des bilans énergétiques, des émissions de gaz à effet de serre et des autres impacts environnementaux potentiels associés aux véhicules électriques.

Cette étude vise à permettre aux pouvoirs publics d'explorer le domaine de pertinence environnementale des véhicules électriques par rapport aux véhicules thermiques à travers deux exemples, une petite berline et un véhicule utilitaire léger. Ce domaine de pertinence sera défini en s'appuyant d'une part sur une analyse de cycle de vie au sens des normes ISO 14040 et 14044 (Module 1), et d'autre part sur une étude des risques et bénéfices des véhicules électriques non pris en compte dans l'ACV (Module 2).

Le développement des véhicules automobiles électriques est un sujet particulièrement délicat à traiter en ACV car il combine à la fois de grandes incertitudes et des conséquences importantes en termes de politique publique.

Les incertitudes concernent

- les choix technologiques, notamment sur les batteries,
- les usages, notamment les modes et horaires de charge,
- les performances à l'usage et dans le temps de ces nouveaux systèmes techniques,
- l'évolution des bouquets électriques appelés.

En termes de politique publique, les enjeux se situent à de multiples niveaux :

- politique énergétique et performance nationale en termes de GES,
- politique environnementale au niveau local, notamment dans le cadre de la mise en place de mesures sur la qualité de l'air dans des zones dédiées,
- complétés d'un éventuel enjeu d'indépendance sur les matières critiques.

La puissance publique doit notamment prendre des décisions en termes de mise en place de l'infrastructure de recharge, de soutien à la R&D et d'éventuels systèmes d'incitation.

Réaliser une ACV dans un tel contexte demande un soin particulier. Les outils mobilisés pour cette étude sont des trois ordres :

- un mode de gouvernance ouvert (cf. section 1.5 ci-dessous),
- la restriction du champ de l'étude à l'aide de scénarios probables, qui laissent

- cependant le champ ouvert à d'autres investigations,
- des calculs d'incertitudes dans le champ défini pour l'étude.

1.2 Objectifs

L'objectif de l'étude est de comparer, pour un véhicule particulier et un véhicule utilitaire léger, les performances environnementales du véhicule électrique (VE) à celles du véhicule thermique (VT) selon des conditions différentes afin d'identifier des zones de « pertinence environnementale » pour chacun des véhicules.

La performance environnementale⁶ sera étudiée sur le cycle de vie entier des produits. La phase d'usage se limite aux déplacements dits de proximité (une définition de la « proximité » est donnée dans le chapitre 2.2 définition de la fonction). L'étude sera réalisée pour des véhicules particuliers et utilitaires légers assemblés en France, produits et utilisés en 2012 et à horizon 2020. Par ailleurs, des conditions d'utilisation en France et dans différents pays d'Europe seront prises en compte. Pour le véhicule VT, un scénario en France et un scénario européen moyen sera étudié, quant au véhicule électrique, les scénarios seront proposés pour les cinq plus gros marchés automobiles européens : la France, l'Allemagne, le Royaume-Uni, l'Italie et l'Espagne - un scénario européen moyen sera également envisagé.

L'analyse est réalisée pour :

- ✓ des véhicules particuliers du segment B⁷. Le VE sera comparé aux 2 motorisations disponibles pour le VT (Diesel et essence),
- ✓ Des véhicules utilitaires légers. Le VE sera comparé aux 2 motorisations disponibles pour le VT (Diesel et essence).

Pour 2012 et 2020, les technologies des batteries reflétant l'état de l'art actuel doivent être analysées.

Les véhicules électriques sont encore une technologie émergente. Cela engendre deux conséquences dans notre étude :

- Certaines hypothèses comportent une importante marge d'incertitude
- L'analyse doit permettre la modélisation de quelques améliorations de cette technologie émergente.

C'est pourquoi certaines hypothèses qui ont été retenues tout au long du projet en collaboration avec le comité technique pour définir le scénario 2012, peuvent être parfois optimistes.

L'incertitude inhérente à l'évaluation des impacts des technologies émergentes constitue une limitation de l'étude : la durée de vie réelle des batteries, les pertes en production, les schémas d'usage sont mal connus, de même qu'il est impossible d'anticiper des innovations de rupture sur les batteries. Cela explique en partie que le scénario 2020 reste proche du scénario 2012.

⁶ Bilan relatif de différents indicateurs d'impact

⁷ Segment des « citadines compact ».

1.3 Approche attributionnelle versus conséquentielle

Deux approches possibles de l'ACV

En analyse de cycle de vie, deux approches sont possibles afin de modéliser un inventaire du cycle de vie (ICV)⁸ :

l'ACV attributionnelle, s'intéresse à la chaîne de valeur d'un produit ou d'un service donné. Le système étudié peut être existant ou programmé mais doit appartenir à une technosphère statique dans le sens où les relations de causalités dues à l'évolution du marché ne sont pas prises en compte. Il devient donc difficile d'évaluer les impacts liés à une prise de décision ou de considérer d'éventuels effets rebonds.

- l'ACV conséquentielle vise à évaluer les conséquences environnementales d'une décision. Le système étudié interagit avec le marché et ces changements potentiels et appartient donc à une technosphère dynamique.

L'approche conséquentielle est plus complète que l'approche attributionnelle, mais elle induit simultanément une plus grande incertitude, en raison de la multitude des processus potentiellement affectés, et de la difficulté à déterminer précisément la chaîne de cause à effet.

Une étude attributionnelle

L'ADEME a choisi de réaliser une ACV attributionnelle pour comparer les impacts environnementaux cumulés sur le cycle de vie de véhicules automobiles de proximité, thermiques et électriques (sur les segments B et VUL).

Les impacts sont donc comparés à l'échelle du cycle de vie d'un véhicule unitaire (berline de segment B ou VUL, en 2012 et en 2020).

Cependant, dans la phase d'interprétation des résultats, un effort particulier a été dédié à la mise en perspective des résultats, en prenant en compte les effets cumulés sur une flotte moyenne (1,8% de véhicules tout électrique en 2020). Cet effort concerne plus précisément :

- la pollution atmosphérique locale en zone urbaine,
- le bruit en zone urbaine,
- la consommation de matières critiques (terres rares, platinoïdes, cobalt).

Cette étude attributionnelle pourrait servir de base à une future étude conséquentielle.

1.4 Public visé

Cette étude a été mandatée par l'ADEME en raison de certains désaccords entre les parties prenantes concernant l'impact environnemental actuel des véhicules électriques.

Cette étude doit contribuer à l'information de tous les décideurs susceptibles d'avoir à prendre des décisions en lien avec le développement du véhicule électrique. Pour des raisons de transparence, les résultats de cette étude seront rendus publics.

⁸ source : ILCD Handbook

1.5 Gouvernance de l'étude

L'étude est pilotée par un comité de pilotage qui regroupe les différents ministères de tutelle de l'ADEME. 3 réunions du comité de pilotage ont été organisées tout au long du projet.

Un comité technique a été créé regroupant les différentes parties prenantes de la mobilité électrique. Ce comité est composé d'une trentaine de membres qui apportent leur expertise, fournissent les données nécessaires à la modélisation et valident les hypothèses proposées. 6 réunions du comité technique ont été organisées, dont un « atelier 2020 » dédié à la validation des hypothèses considérées à l'horizon 2020.

Composition du comité technique	
ADEME	IFPEN
AGPM AGPB	LA POSTE
Amis de la Terre	MEEDDM
AREVA	PSA Peugeot-Citroën
AVERE	RECUPYL
CCFA	RENAULT
CEA	RTE
CITEPA	SAFT
CNPA	FEDEREC
DOW KOKAM	SFRAP
EDF	Recupyl
ERDF	UFIP
FNE	UMICORE
GDF Suez	UTAC

Pour plus d'efficacité, des sous-comités thématiques ont été organisés :

- ✓ Sous-comité véhicule et composants,
- ✓ Sous-comité filières énergétiques,
- ✓ Sous-comité usage,
- ✓ Sous-comité recyclage.

Chaque sous-comité s'est réuni au moins une fois.

2. Champ de l'étude

2.1 Définition du système

2.1.1 Contexte

Dans le cadre de la réduction des impacts environnementaux potentiels liés au transport, 3 leviers⁹ complémentaires peuvent être identifiés :

- ✓ La maîtrise de la demande de transport,
- ✓ L'amélioration de l'efficacité énergétique des véhicules,
- ✓ Le développement de carburants/modes de propulsion alternatifs.

L'implantation du véhicule électrique offre la perspective d'un mode de transport n'émettant aucun gaz à effet de serre au niveau du véhicule pendant la conduite (pas d'émissions du pot d'échappement).

Ainsi, plusieurs raisons pourraient favoriser le développement du parc de véhicules tout électrique (VE) :

- ✓ La prise de conscience générale des enjeux environnementaux,
- ✓ Les efforts de R&D des batteries (plus d'autonomie, plus de cycles de charge/décharge...),
- ✓ Une volonté des constructeurs,
- ✓ Le renchérissement du prix du pétrole, et par conséquent des carburants,
- ✓ Une incitation politique à l'échelle nationale et européenne et en particulier les politiques d'amélioration de la qualité de l'air, (type ZAPA¹⁰),

Depuis 2012, plus d'une dizaine de modèles de véhicules électrifiés (VE et VHR¹¹) sont commercialisés en France. Le pourcentage de la flotte de véhicules électriques reste marginal, puisqu'on dénombre en France, en 2011, 2 630 VE (pour 37 millions de véhicules roulants).

Du fait de l'incitation des pouvoirs publics, via une aide financière, de l'amélioration continue des technologies et du développement parallèle des infrastructures de charge, la part de VE dans le parc français et européen devrait augmenter de façon sensible.

En 2012, les immatriculations de VE sont de 5 663 VE¹².

Selon les objectifs du plan gouvernemental¹³, 2 millions de véhicules électrifiés devraient rouler à l'horizon 2020, dont un tiers de VE, soit 650 000 VE. Ce scénario a

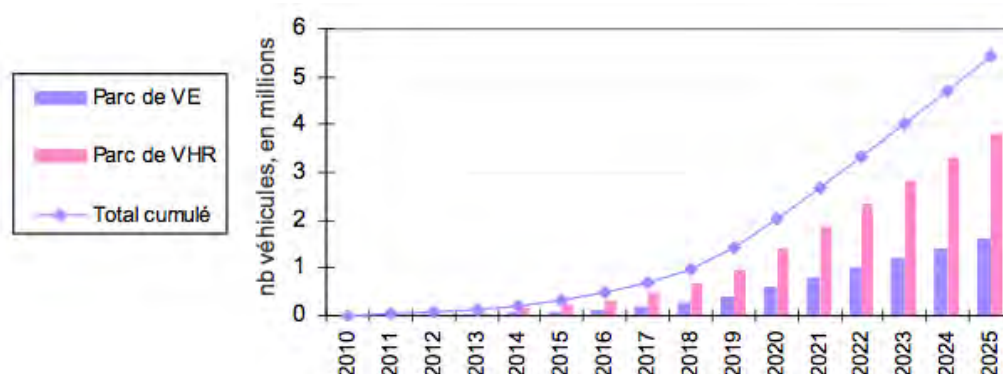
⁹ CGDD, 2010

¹⁰ Zone d'Actions Prioritaires pour l'Air. Ces ZAPA favorisent le développement des véhicules électriques et sont de nature à améliorer la qualité de l'air dans ces zones ainsi que le niveau de bruit.

¹¹ Véhicule Hybride Rechargeable

¹² Chiffres DGEC/SCEE/SD6

été construit sur la base d'une pénétration progressive de ces véhicules sur le marché automobile, lente en début de période, puis s'accéléralant à partir de 2015 / 2016 (voir ci-dessous).



Source : scénario CGDD

Figure 2-1: Scénario de développement du parc de véhicules décarbonés pour la France

La France est ambitieuse quant au développement du véhicule électrifié à l'horizon 2020, les autres pays membres de l'Union Européenne prévoient également un déploiement intensif de ces nouvelles motorisations. Le tableau suivant montre les objectifs de déploiement des véhicules électrifiés à l'horizon 2020 dans différents pays membre de l'UE.

Tableau 2-1 : Prévisions du parc de véhicules électrifiés à l'horizon 2020 (excepté pour les Pays-Bas, à l'horizon 2015 et l'Espagne, à l'horizon 2014)

Danemark	200 000
France	2 000 000
Allemagne	1 000 000
Irlande	350 000
Pays Bas	10 000
Espagne	1 000 000
Suède	600 000
Royaume Un	1 550 000
Total	6 710 000

Selon les estimations du JRC¹⁴, le parc de véhicules légers (VP et VUL) en Europe atteindrait 270 000 000 véhicules en 2020¹⁵. Ainsi les prévisions de ventes des véhicules électrifiés (VHR et VE) en Europe représenteraient 2,5% du parc.

Dans la présente étude, les résultats sont calculés pour des véhicules (thermiques et électriques) existant en 2012. Des scénarios sont ensuite élaborés pour des véhicules produits et utilisés en 2020.

¹³ Voir les dossiers de presse du 1er octobre 2009 : « Lancement du plan national pour le développement des véhicules électriques et hybrides rechargeables » et du 13 avril 2010 : « Avancées du plan de développement des véhicules électriques et hybrides », Jean-Louis Borloo et Christian Estrosi.

¹⁴ JRC, Technical note, 2010

¹⁵ Pour l'Allemagne, il se peut que cette politique soit revue à la baisse, notamment du fait du choix énergétique de sortie du nucléaire.

2.1.2 Véhicules étudiés

Dans cette étude, nous nous intéressons exclusivement au véhicule tout électrique, c'est à dire, un véhicule qui fonctionne uniquement à partir d'une batterie rechargeable sur le secteur, disposant de 100 à 150 kilomètres d'autonomie suivant les modèles.

L'étude couvre aussi bien les voitures particulières (VP) que les véhicules utilitaires (VUL). Les véhicules VE (VP et VUL) sont comparés à 2 motorisations de véhicules thermiques : Diesel et essence.

2.1.2.1 Véhicules particuliers

Les VT et VE considérés sont des véhicules moyens du segment B¹⁶, assemblés en France, offrant un confort comparable pendant leur utilisation. Les véhicules du segment B représentent 40% des ventes sur les 9 premiers mois de l'année 2011¹⁷. Ces véhicules moyens ont été modélisés à partir de données de constructeurs ; leurs caractéristiques sont décrites ci-après :

Tableau 2-2 Détail des véhicules particuliers étudiés

Véhicule Particulier (VP)	Essence	Diesel	Electrique
Segment	B	B	B
Norme d'émission	Euro 5	Euro 5	/
Consommation (l/100km)	5,9	4,1	/
Energie batterie (kWh)	/	/	24
Autonomie (km) ¹⁸	760	1080	≈ 150 ¹⁹
Masse batterie ²⁰ (kg)	/	/	238
Masse (t)	1,11	1,15	1,31
Cylindrée (cm3)	1150	1450	/
Puissance (kW)	55	53	55
Longueur (m)	3,9	3,9	3,8
Largeur (m)	1,7	1,7	1,65
Hauteur (m)	1,5	1,5	1,6

Pour les véhicules thermiques étudiés, les modèles essence et Diesel choisis dans notre étude, représentent 41,2% des ventes du segment B sur l'année 2011, d'après les statistiques trimestrielles du CCFA.

¹⁶ Le segment B a été retenu pour des questions de performance de VE et de leur intérêt/compatibilité avec une utilisation sur des trajets de proximité

¹⁷ Statistiques trimestrielles CCFA, Novembre 2011

¹⁸ Autonomie des véhicules sur la base d'un volume réservoir de 45l pour un véhicule thermique

¹⁹ L'autonomie des véhicules électriques dépend de nombreux paramètres, cependant, comme pour le véhicule thermique, le cycle NEDC permet d'obtenir une valeur normative

²⁰ Pour le VE, le poids correspond au poids du véhicule plus celui de la batterie.

Pour le VE, les volumes de ventes sur les modèles commercialisés courant 2012 restent faibles (9 314 VE vendus en France en 2012). Dans la mesure où les constructeurs français sont leaders sur le marché français, il est supposé que leurs modèles électriques correspondant au segment B seront parmi les plus vendus dès 2012.

La masse des VE considérés sans batterie est de 1,31t, soit 12% de plus que la masse du VT Diesel (1,15 t) et 15% de plus que le VT essence (1,11 t). Le VE est plus lourd que les VT en raison du pack batterie (238 kg dans le scénario choisi). L'augmentation de masse n'est cependant pas simplement dépendante de la masse batterie étant donné que les modèles électriques et thermiques du VP sont issus de conceptions différentes. Les masses des véhicules utilitaires sont quant à elles plus simples à définir étant donné que les VUL électriques sont conçus sur les mêmes bases que les thermiques : seule la motorisation et quelques adaptations des équipements changent (voir chapitre suivant). Les pourcentages d'augmentation de masse des VP sont cohérents avec ceux obtenus pour le VUL.

2.1.2.2 Véhicules utilitaires légers

Tableau 2-3 Détails des véhicules utilitaires légers étudiés

Véhicule utilitaire léger	Diesel	Electrique
Capacité de chargement (m3)	3,3	3,3
Norme d'émission	Euro 5	/
Consommation (l/100km)	5,3	/
Energie batterie (kWh)	/	24
Autonomie (km)	1080	150
Masse batterie (kg)	/	238
Masse (t)	1,33	1,48
Cylindrée (cm3)	1675	/
Puissance (kW)	50	45
Longueur (m)	4,09	4,09
largeur (m)	1,74	1,74
Hauteur (m)	1,83	1,83

Le VUL thermique sélectionné représente 14,5% des ventes sur les 9 premiers mois de 2011, ce qui est représentatif étant donnée la diversité des modèles disponibles.

Le VUL électrique sélectionné repose sur les mêmes caractéristiques dimensionnelles que son équivalent thermique. Les hypothèses d'autonomie (150 km), de capacité batterie (24 kWh) et de masse batterie sont identiques à celles retenues pour le VP. Le VUL électrique ainsi défini est représentatif du marché français.

Pour le VP comme pour le VUL, la représentativité en France ne présage pas de la représentativité à l'échelle européenne.

2.1.2.3 Les véhicules à l'horizon 2020

Les véhicules choisis (VP et VUL) à l'horizon 2020 sont modélisés à partir des véhicules de 2012. Il est impossible de prévoir les ventes à cet horizon et donc de définir la représentativité des véhicules modélisés. 3 sources d'informations ont été combinées pour construire des scénarios probables à l'horizon 2020 :

- ✓ La réglementation,
- ✓ La bibliographie disponible,
- ✓ La consultation des acteurs clés (constructeurs, fabricants de batteries, énergéticiens...).

Cette méthode de construction des scénarios a été validée par le comité technique au cours d'un « Atelier 2020 ». Durant cet atelier, chaque membre a apporté son expertise spécifique pour donner le maximum de robustesse aux hypothèses choisies.

Cependant le déploiement du VE et le downsizing²¹ opéré par les constructeurs automobile nous confortent dans le choix des véhicules. En effet, les véhicules thermiques et électriques pris en considération à l'horizon 2020 sont basés sur des modèles commercialisés en 2012 ayant subi des améliorations :

- ✓ Réduction de la masse du véhicule
- ✓ Amélioration de la performance en phase d'usage : nouvelle(s) technologie(s) de batterie pour le VE, norme Euro6 des carburants pour le VT
- ✓ Amélioration des performances des auxiliaires

Les caractéristiques détaillées des véhicules 2020 sont présentées au chapitre 3. L'utilisation des véhicules est supposée inchangée de 2012 à 2020.

2.1.3 Exclusion des infrastructures de charge et de distribution de carburant

Par décision du commanditaire, les infrastructures de distribution du carburant et de l'électricité ne sont pas prises en compte dans cette étude. Les pouvoirs publics considèrent la mise en place d'une infrastructure de charge des VE comme un investissement qui pourra être amorti sur une longue période. Cette exclusion constitue une limitation de l'étude. Une annexe propose des éléments quantitatifs sur l'impact potentiel du développement d'une telle infrastructure.

2.1.4 Mode de charge (lent/rapide)

²¹ Le downsizing est relatif à la taille du moteur et non à celle du véhicule. L'objectif est d'utiliser un moteur plus petit tout en ayant une puissance équivalente en sortie. Au lieu d'avoir un moteur à 4 cylindres, on choisit un moteur de 3 cylindres avec turbo.

L'étude se limite au mode de charge lent (6 h, 8 kVA). Cette décision s'appuie sur les recommandations du Livre Vert²² sur les infrastructures de recharge ouvertes au public rédigé par le Sénateur Louis Nègre, qui prévoit 95 % de charge lente. Ce choix a des conséquences importantes, notamment sur :

- ✓ Le rendement de charge,
- ✓ l'infrastructure
- ✓ le mix électrique appelé.

2.2 Définition de la fonction

Dans le cadre de l'étude, la fonction commune au VP et au VUL électrique est d'effectuer des déplacements de proximité (ou locaux).

L'enquête nationale transports et déplacements donne la définition suivante de la mobilité locale :

« La mobilité locale est définie comme l'ensemble des déplacements que les individus réalisent dans un rayon de 80 kilomètres autour de leur domicile et sur le territoire national. Elle concerne essentiellement les déplacements quotidiens pour aller travailler, étudier, faire ses courses, ses démarches administratives, accompagner quelqu'un, se rendre sur un lieu de loisir, etc. Avec 98 % des déplacements des personnes résidant habituellement en France, la mobilité locale représente en volume l'essentiel des déplacements. »

Comme le montre le tableau suivant, un français réalise en moyenne 3,15 déplacements quotidiens pour une distance moyenne de 25,2 km/jour. La voiture reste le mode de transport dominant des déplacements : en 2008, 65 % d'entre eux sont réalisés en voiture – comme passagers ou conducteurs – ces trajets en voiture représentent 83 % des distances parcourues par les français sur des déplacements de proximité.

Tableau 2-4 : Répartition des déplacements et des kilomètres parcourus par mode de transport

²² Livre Vert, 2011, Negre, L., Livre Vert sur les infrastructures de recharge ouvertes au public pour les véhicules « décarbonés », Avril 2011

Mode de transport	Déplacements quotidiens		Kilomètres quotidiens parcourus	
	Nombre par personne	%	Nombre par personne	%
Voiture comme conducteur	1,67	53	17,4	69
Voiture comme passager	0,37	12	3,6	14
Deux roues motorisé	0,05	2	0,4	2
Autre mode mécanisé	0,02	1	1,8	1
Transport collectif urbain	0,19	6	0,2	7
Autre transport collectif	0,06	2	0,2	4
Vélo	0,09	3	0,6	1
Marche	0,7	22	0,9	2
Total	3,15	100	25,2	100

Les particularités du VE (autonomie limitée) en font un moyen adapté aux déplacements locaux.

VP

La fonction de la voiture particulière est de transporter jusqu'à 4-5 personnes avec bagages sur de courtes distances pendant la durée de vie du véhicule. Seule des utilisations sur de courtes distances sont considérées. La performance technique des deux véhicules est comparable et a été validée par les constructeurs automobiles (OEM) participant à ce projet. Il en est de même pour la notion de confort²³ : le confort thermique est pris en compte, alors que les équivalences de conduite (vitesse, accélération) sont exclues des limites du système. L'autonomie, qui peut être considérée comme une mesure de confort, n'est également pas prise en compte. Cela est expliqué dans le paragraphe « Unité fonctionnelle »

La capacité indiquée est la capacité maximale, sachant qu'en France, le nombre moyen de passagers par voiture est de 1,4 (ENDT).

VUL

La fonction du véhicule utilitaire léger est de transporter des biens sur de courtes distances.

La capacité de chargement des VUL est de 3,3 m³.

Les véhicules thermiques peuvent assurer tout à la fois des déplacements locaux et des trajets de longues distances. En cela, ils ne sont pas strictement fonctionnellement équivalents aux véhicules électriques de taille similaire.

Il existe cependant certains types d'usages pour lesquels la capacité des VT à parcourir de longues distances est peu, voire pas utilisée :

- ✓ Seconde voiture du foyer,

²³ La notion d'agrément de conduite (vitesse, accélération) est exclue du périmètre. En revanche, le confort thermique est pris en compte.

- ✓ Véhicules d'artisan,
- ✓ Certaines flottes d'entreprise.

Dans cette étude, nous considérons seulement les usages, qui, à l'horizon 2012, permettent d'établir une comparaison équitable entre les VT et les VE. A l'horizon 2020, un quatrième type d'usage, l'autopartage, a été identifié en complément aux autres types d'usage. Cependant, ce type d'usage n'est pas considéré dans cette étude étant donné que les véhicules utilisés pour ce service appartiennent au segment A.

Ces typologies d'usage ont été validées par l'ensemble du comité technique. Les informations détaillant ces typologies ont été collectées à partir de la bibliographie et des indications transmises par les constructeurs.

Typologie des utilisations

Tableau 2-5 Typologies d'usage du VE

France	2 ^{ème} voiture du foyer	Véhicule professionnel (PME)	Flotte de véhicules de société	Auto-partage en milieu urbain (scénario 2020)
Type de véhicule	Petit véhicule particulier (Segment B)	Véhicule utilitaire léger	Toutes les tailles (y compris VUL)	Petit véhicule (Segment A) urbain spécifique
km par jour (moyenne)	45 ²⁴	55 ²⁵	80	/
km par jour (max)	/	60	/	
Jours d'utilisation/an	290	260	218	365
km par an	13050	14300	17440	/
Mode de recharge	Au domicile à partir de 19h ou au travail à partir de 9h	Au domicile à partir de 19h	Préférable de nuit, recharge en continu de jour pour une utilisation intensive	Préférable de nuit, recharge en continu de jour pour une utilisation intensive

Un consensus des constructeurs automobile stipule que le kilométrage moyen sur la durée de vie des véhicules (10 ans) est de 150 000 km. Afin de faciliter la comparabilité avec d'autres études d'analyse de cycle de vie, cette distance est également considérée, d'autant plus qu'elle est cohérente avec la moyenne des distances du tableau ci-dessus²⁶. Si l'on traduit 150 000 km sur les 10 ans de vie du véhicule, soit 15 000 km/an, cela revient à une distance moyenne par jour de 40 à 75 km en fonction du nombre de jours considérés.

²⁴ CGDD 2010

²⁵ Cette donnée correspond à la moyenne des trajets journaliers de proximité des artisans d'après le panorama issu de l'enquête nationale transports et déplacements 2008" - CGDD - MEDDTL

²⁶ En prenant l'hypothèse que la flotte de VE serait composée de 20% de 2^{ème} véhicules de foyer, de 40% de véhicules professionnels et de 40% de flotte de véhicules d'entreprise, en 2012 et en 2020.

Les véhicules utilitaires légers (VUL) parcourent en moyenne 14 900 km par an et ont un âge moyen de 9,3 ans.²⁷

2.3 Unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle est la mise à disposition d'un véhicule représentatif du segment B, dont les caractéristiques sont détaillées dans le Tableau 2-2 Détail des véhicules particuliers étudiés, pour le transport de proximité de personnes ou de biens pendant la durée de vie du véhicule, selon les scénarios décrits ci-dessous.

La durée de vie des véhicules particuliers et utilitaires légers étudiés couvrira 150 000 km de trajets de proximité sur 10 ans. Le choix de cette unité fonctionnelle a fait l'objet d'un consensus au sein du comité technique, afin que les résultats de l'étude soient comparables avec d'autres études ACV déjà réalisées. De plus, la distance de 150 000 km sur la durée de vie du véhicule est cohérente avec les différentes typologies du véhicule dédiées aux déplacements de proximité (tableau ci-dessus). Cependant, pour un véhicule destiné aux déplacements de proximité, il est possible que les 150 000 km ne soient pas atteints en 10 ans. Soit la durée de vie en année sera allongée, soit le nombre de kilomètres sera réduit. Deux analyses de sensibilité explorent ce cas de figure :

- Si la durée de vie du véhicule, thermique et électrique est augmentée, dans ce cas, il peut être nécessaire de remplacer la batterie du VE (scénario 1)
- Si le nombre de kilomètres est restreint, les impacts de la phase d'utilisation sont réduits proportionnellement (scénario 2).

Discussion concernant l'unité fonctionnelle

La restriction du véhicule thermique à des trajets de proximité alors qu'il a la capacité de parcourir de longue distance mérite d'être discutée. Il serait en effet envisageable de considérer un véhicule thermique utilisé principalement pour couvrir de petites distances dans le cadre de l'unité fonctionnelle choisie, et exceptionnellement utilisé sur de longues distances hors du cadre de l'unité fonctionnelle. Il conviendrait alors de définir la proportion des trajets qui concernent la grande distance et sont donc situés hors de l'unité fonctionnelle (par exemple 10%). La phase d'usage telle que définie précédemment par la fonction resterait inchangée. La seule différence concernerait la production et la fin de vie du véhicule thermique dont il faudrait affecter la proportion de 10% des trajets de grande distance, situés hors de l'unité fonctionnelle. Or la contribution de la phase d'usage dominant largement le bilan global du véhicule thermique, une allocation de 10% des phases de production et de fin de vie n'aurait que peu d'influence sur les résultats. Cette alternative donnerait des résultats très proches de celle retenue, hormis pour l'indicateur « épuisement des ressources minérales ».

2.4 Flux de référence

²⁷ « Les véhicules utilitaires légers au 1^{er} janvier 2011 », Chiffres&statistiques n°310, Avril 2012, CGDD - MEDDTL

Les flux de référence associés sont :

- ✓ 1 VP sur sa durée de vie (10 ans, 150 000 km),
- ✓ 1 VUL sur sa durée de vie (10 ans, 150 000 km).

2.5 Frontières du système

Ce chapitre montre les différentes étapes du cycle de vie prises en considération dans le cadre de l'étude. Pour chaque procédé intermédiaire, les flux entrants et sortants pertinents²⁸ sont pris en considération. Les flux entrants sont principalement des flux de matière et d'énergie consommés, quant aux flux sortants, ils représentent les émissions dans l'eau, l'air et le sol. Il est supposé que les procédés intermédiaires ne changent pas de 2012 à 2020, étant donné la proximité de cet horizon. Les flux entrants et sortants peuvent changer en fonction des évolutions technologiques, ces modifications sont présentées dans le chapitre 3.

2.5.1 Production

2.5.1.1 Fabrication du véhicule et des composants

Pour la phase de production du véhicule (électrique et thermique) les étapes d'extraction des minerais, de transport et de mise en forme des matières premières sont prises en compte. Les entrants et sortants du site de fabrication du véhicule renseignent les impacts liés à :

- ✓ L'atelier d'emboutissage,
- ✓ L'atelier de ferrage,
- ✓ L'atelier de peinture,
- ✓ La chaîne d'assemblage.

La fabrication des pièces des fournisseurs est calculée à partir de la composition matière du véhicule. Elle est obtenue en combinant les matériaux avec les inventaires moyens de production des produits semi-finis. Ces inventaires sont issus du logiciel d'ACV GaBi5 et de l'extension de sa base professionnelle SP19. Les moteurs électriques et l'électronique sont considérés comme des pièces issues de fournisseurs.

Pour le VE, les entrants et sortants du site de fabrication de la batterie sont également pris en compte. Les chutes de production de la batterie ne sont pas prises en compte, ce qui représente un cas favorable pour le VE.

Les véhicules (VE et VT) et la batterie (VE) sont assemblés en France, un bouquet électrique moyen français est utilisé pour ces étapes.

L'amortissement du matériel et des bâtiments n'est pas pris en compte.

²⁸ En fonction des critères de coupure et des catégories d'impacts utilisés

2.5.1.2 Logistique

Dans cette étude, la logistique amont et aval, est incluse dans la phase de production. La logistique amont prend seulement en compte la distance du fournisseur de rang 1 à l'usine. La logistique aval, pour la transformation, couvre la distance de l'usine aux centres de distribution.

La distribution regroupe toutes les consommations et émissions liées au transport du véhicule. La valeur utilisée est générique étant donnée la diversité des points de vente des véhicules et le peu d'importance de cette phase sur l'ensemble du cycle de vie du produit²⁹. Les résultats en chapitre 4 le confirme. De plus, la présente étude étant comparative, la phase de distribution présente peu d'enjeu car peu discriminante.

2.5.2 Utilisation

La phase d'utilisation du véhicule comprend la production et l'utilisation du carburant (filières pétrolières ou électriques) ainsi que la production et le recyclage ou la mise en décharge des pièces de rechange.

2.5.2.1 Carburant

La phase de production du carburant intègre la production du pétrole brut, son transport, son raffinage et la mise à disposition du carburant dans les stations-service. Les matières entrantes (pétrole brut principalement) et les émissions liées à l'ensemble de ces procédés intermédiaires sont prises en considération. En revanche, l'étude ne couvre pas la construction des infrastructures mises en place pour la distribution de carburant. Elles sont considérées comme un investissement qui s'amortit sur plusieurs années.

2.5.2.2 Electricité

A l'instar de la filière thermique, la modélisation de la production de l'électricité intègre l'extraction de minerais énergétiques, leur transport, la génération et la distribution de l'électricité pour chaque source électrique disponible (pétrole, charbon, gaz, nucléaire, renouvelable...). Les bouquets électriques utilisés sont un assemblage de ces différentes sources, représentatives du périmètre géographique de l'étude. Les infrastructures (centrales thermiques, réacteurs nucléaires, panneaux solaires, éoliennes...) de la filière électrique sont prises en compte. En revanche, les installations de distribution (lignes moyenne et haute tension, transformateurs) de l'électricité ne sont pas prises en compte.

Les mix électriques pris en compte sont des mix de consommation. Les pertes de charge au sein du réseau sont prises en compte dans les données.

La phase d'utilisation du véhicule comprend l'utilisation (combustion) du carburant ainsi que la production et le recyclage ou la mise en décharge des pièces de rechange.

²⁹ Environmental certificate Mercedes-Benz- S Class, 2005

2.5.2.3 Usage véhicules thermiques

Les émissions de gaz d'échappement obtenues à partir des cycles de conduite normalisés NEDC sont utilisées pour modéliser l'impact sur l'air des véhicules thermiques. Les limites d'émissions des normes Euro 5 et Euro 6 sont données dans le tableau suivant.

Tableau 2-6 Limites d'émissions de la norme Euro 5

VP	Norme Euro 5	
	<i>Essence</i>	<i>Diesel</i>
NOx (mg/km)	60	180
CO (mg/km)	1000	500
PM (mg/km)	5	5
HC+Nox (mg/km)	/	230
HC (mg/km)	100	/
HC-NM (mg/km)	68	/

Tableau 2-7 Limites d'émissions de la norme Euro 6

VP	Norme Euro 6	
	<i>Essence</i>	<i>Diesel</i>
NOx (mg/km)	60	80
CO (mg/km)	1000	500
PM (mg/km)	5	5
HC+Nox (mg/km)	/	170
HC (mg/km)	100	/
HC-NM (mg/km)	68	/

D'après les constructeurs automobiles, les limites d'émissions EURO 6 sont crédibles pour la modélisation des scénarios à l'horizon 2020. Dans la modélisation, des émissions réelles, correspondant au segment des véhicules choisis, sont prises en compte. Les émissions de polluants sont mesurées durant un cycle de conduite normalisé appelé NEDC (New European Driving Cycle) qui dure 20 minutes. Il comprend une première phase de conduite typée "ville" suivi d'une phase de conduite plus rapide typée "route". La vitesse moyenne durant ce cycle est de 33 km/h.

Les facteurs d'émissions varient également en fonction de nombreux paramètres : poids et segment du véhicule, motorisation, vitesse, auxiliaires...
Pour les véhicules particuliers, les émissions par km sont minimales pour des vitesses proches de 70 km/h :

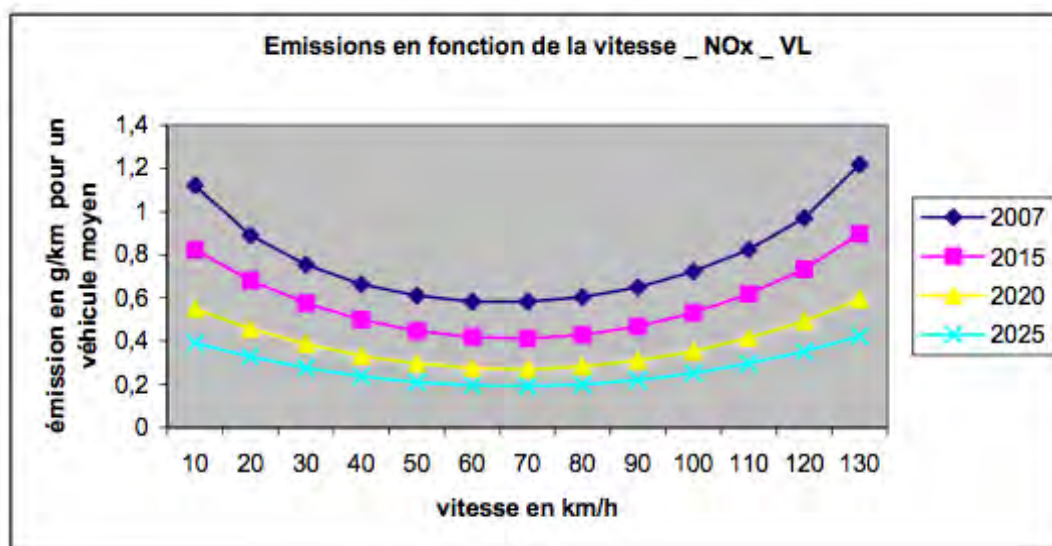


Figure 2-2 Facteurs d'émissions des NOx en fonction de la vitesse pour un véhicule léger

Cette courbe est applicable à l'ensemble des polluants atmosphériques.

Ainsi les incertitudes liées aux facteurs d'émissions des polluants atmosphériques sont importantes. Le cycle NEDC est souvent pointé du doigt du fait qu'il n'est pas représentatif d'un usage réel du véhicule. C'est pourquoi d'autres cycles de conduite s'approchant d'un usage réel sont utilisés.

Afin de répondre à cette incertitude, un autre cycle de conduite issu du projet ARTEMIS sera utilisé.

Pour le chapitre relatif à l'impact sonore du VE comparé au VT, 2 autres cycles de conduite sont utilisés :

- ✓ Un cycle modélisant un trajet en ville (arrêts prolongés et vitesse moyenne avoisinant les 20 km/h),
- ✓ Un cycle modélisant un trajet embouteillé (arrêts fréquents et vitesse moyenne avoisinant les 10 km/h)

Ces cycles de conduite provenant de l'INRETS sont détaillés en chapitre 5 et ont été sélectionnés pour être représentatifs d'un usage en ville qui pourrait représenter l'usage principal du VE.

2.5.2.4 Usage véhicules électriques

La phase d'utilisation comprend la charge du VE. Dans le cadre de l'étude, on prend en compte une charge classique dite « normale » (charge de 3kVA sur une durée d'environ 8 heures). La charge normale devrait représenter 95% des recharges³⁰. Aussi, les charges accélérées et rapides ne sont pas prises en compte. Le type de charge impacte principalement la mise en place des bornes, le mix électrique lié à

³⁰ Livre Vert, 2010

l'heure de recharge et le rendement de la charge³¹. La question du rendement du chargeur et de l'influence de la charge rapide sur la durée de vie des batteries reste posée.

Concernant la charge du véhicule électrique, l'échange rapide de batteries et le « tender » (batterie de recharge embarquée en remorque), deux solutions envisagées pour augmenter l'autonomie du véhicule, ne sont pas considérées dans l'étude car elle est focalisée sur les déplacements de proximité.

L'infrastructure est hors du champ de l'étude par décision du commanditaire. L'idée est que l'infrastructure mise en place sera disponible pour une longue période de temps, comme c'est actuellement le cas pour les infrastructures liées à la distribution du carburant.

Une note sur le bilan énergétique et CO2 des infrastructures de charge est disponible en Annexes³².

2.5.2.5 Cycle de conduite

Un cycle de conduite définit les conditions, la vitesse et le temps, selon lesquelles la consommation d'énergie et les émissions de CO2 et autres sont mesurées.

Les conditions limites définissent généralement les paramètres pertinents à la consommation d'énergie et aux émissions, comme la température de départ, les changements de vitesse (seulement pour les véhicules à transmission manuelle), la préparation du véhicule, le taux de charge, et autres paramètres. Avec ces conditions limites, on peut obtenir des résultats reproductibles. Les cycles de conduite sont généralement réalisés sur un moteur ou sur un véhicule sur banc d'essai.

Depuis le 1er Janvier 1996, la consommation de carburant et les émissions mesurées sont réalisées sur le cycle de conduite européen (NEDC). Ceci est défini par la règle d'ECE R101 qui est valable pour les véhicules électriques, hybrides, et véhicules thermiques hybrides plug-in et conventionnels.

Le NEDC au total dure 1180 secondes (environ 20 minutes). Il est composé d'un cycle de 780 secondes en milieu urbain et d'un cycle de 400 secondes en milieu rural. La température ambiante lors de la mesure doit être comprise entre 20 ° C et 30 ° C. Les conditions de démarrage à froid sont présentées sur la figure suivante.



Figure 2-3 Cycle de conduite NEDC

³¹ Knowles M.J. et al. Analysis of the efficiency of Electric Vehicle Rapid Charge Systems, 2011

³² Lucas et al, Life cycle analysis of energy supply infrastructure for conventional and electric vehicles, 2011

Le manuel de facteurs d'émissions (HBEFA), ou plus précisément le modèle PHEM calcule les émissions pour des situations de circulation spécifiques qui sont :

- Différentes zones (rural, agglomération),
- Différents types de route
- Etat du trafic (fluide, lourd, saturé, arrêt)
- Limitations de vitesse.

Ces conditions sont regroupées dans le modèle TREMOD par IFEU, afin de refléter les conditions de circulation réelles. Un aperçu des situations de circulation est donné dans la figure suivante.

Zone	Type de route	Limite de vitesse (km/h)											
		30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	>130
Rural	Voie rapide												
	Voie semi-rapide												
	Autoroute												
	Route principale												
	Route principale sinueuse												
	Route secondaire sinueuse												
	Route secondaire												
	Chemin												
Agglomération	Voie rapide												
	Voie rapide urbaine												
	Autoroute												
	Périphérique												
	Route principale												
	Route secondaire												
	Chemin												

Figure 2-4 Différentes situations de trafic selon l'HBEFA 3.1

2.5.3 Fin de vie

En accord avec la plupart des études ACV publiées dans le domaine de l'industrie automobile, la phase de fin de vie est modélisée par un scénario reflétant les exigences de la Directive Européenne 2000/53 CE relative au traitement des Véhicules Hors d'Usage. Cela inclut le drainage des liquides, le démontage obligatoire de certaines parties (pneus, vitrages, filtre à huile et à carburant...), le broyage du reste du véhicule et le traitement des éléments broyés.

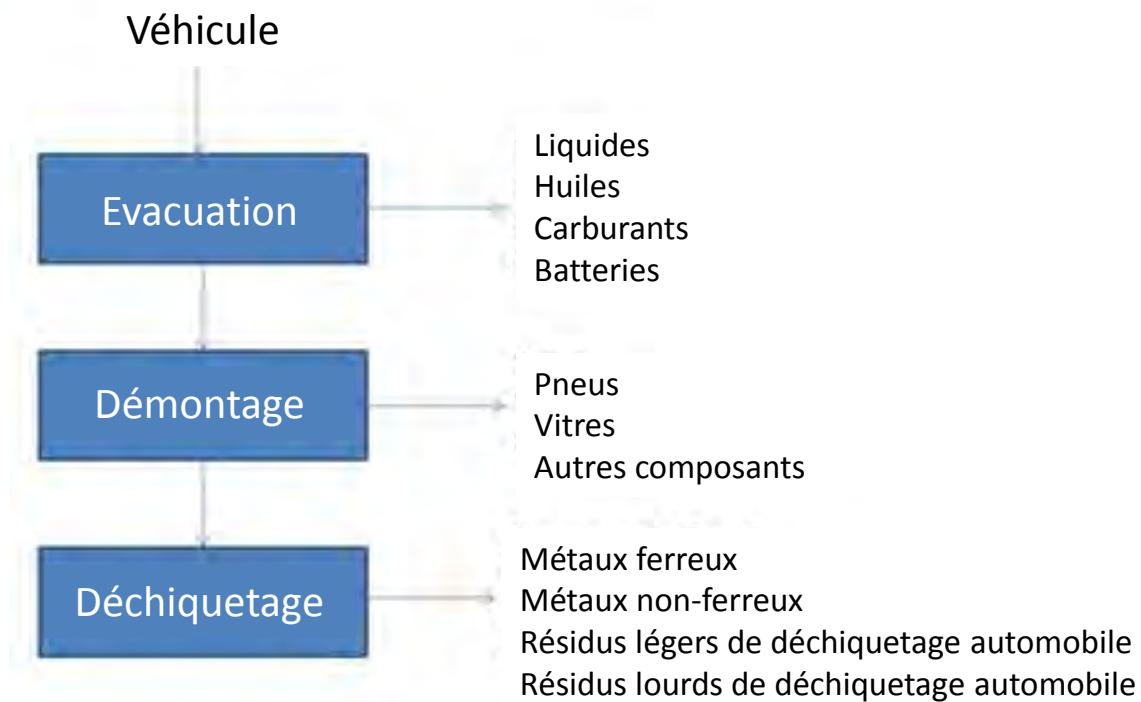


Figure 2-5 Fin de vie d'un véhicule

Cette figure présente le schéma de traitement d'un véhicule en fin de vie d'un véhicule. Les légers déchets issus du procédé RBA, résidus de broyage automobile, ou déchiqueteuse sont incinérés, les plus lourds sont mis en décharge.

Il existe plusieurs méthodes pour modéliser la fin de vie des produits en ACV :

- ✓ La méthode des stocks,
- ✓ La méthode des impacts évités.

La méthode des stocks est la plus couramment utilisée dans l'industrie automobile. Les deux méthodes sont décrites ci-dessous.

2.5.3.1 Méthode des stocks (règles de coupures)

Dans cette méthode, on considère un stock de matière récupérée, qui provient de matériaux en fin de vie et sert à la fabrication de produits recyclés.

On ne considère aucun impact (ni positif, ni négatif) lorsque de la matière récupérée est envoyée vers le stock ou lorsque de la matière récupérée est prélevée du stock. Cela signifie que :

- ✓ Les impacts liés à la production de matière vierge sont portés par le produit qui utilise cette matière vierge,
- ✓ Les impacts liés à la collecte et au procédé de recyclage (transformation de la matière récupérée en matière première secondaire utilisable) sont portés par le produit qui utilise la matière recyclée,
- ✓ Aucun impact n'est porté par la matière récupérée issue du stock et utilisée pour produire le matériau recyclé via le procédé de recyclage,
- ✓ Aucun crédit n'est attribué à la matière envoyée vers le stock.

La méthode des stocks est le cas de « base » de l'étude. La méthode des impacts évités est utilisée uniquement en tant que scénario dans la phase d'interprétation des résultats.

2.5.3.2 Méthode des impacts évités (system expansion)

La méthode des impacts évités consiste à ramener le procédé de recyclage à un procédé monofonctionnel en ôtant du système considéré la co-fonction non étudiée.

Quand on s'intéresse à la fin de vie d'un produit dans une filière de recyclage, la co-fonction non étudiée est la production de matière première secondaire qui se substitue à de la production de matière vierge. Dans le cas des boucles fermées et boucles ouvertes avec même voie principale, la matière vierge substituée est la même que celle qui compose le produit.

L'industrie automobile est en général, peu favorable au calcul de crédits issus du recyclage³³. Cela est dû au fait que les impacts évités peuvent être remis en question de différentes manières abaissant le niveau de crédibilité de l'étude. Par exemple : est-ce que la qualité des matériaux recyclés est comparable avec celle des matériaux vierges? Ou encore : est-ce que les scénarios étudiés seront toujours valables à la fin de vie du véhicule? Pour ces raisons, en accord avec le comité technique, la méthode des impacts évités est seulement présentée comme un scénario.

Les constructeurs automobiles, membres du comité technique, nous ont transmis un scénario réaliste de recyclage des VHU post 2015 (France) et permettant l'atteinte des taux réglementaires :

- ✓ Métaux ferreux et non ferreux : recyclage 100 %,
- ✓ Matières organiques (plastiques, caoutchouc, fibres) : recyclage 50 % -

³³ Site web de Daimler:

<http://www.daimler.com/dccom/0-5-1312394-1-1312442-1-0-0-0-0-0-16158-876574-0-0-0-0-0-0.html>

- valorisation énergétique 30 % - mise en décharge 20 %,
- ✓ Verre (4 % du VHU) : recyclage 90 % - mise en décharge 10 %,
- ✓ Fluides : recyclage 50 % - valorisation énergétique 50 %,
- ✓ Peinture et produits des procédés : valorisation énergétique 40 % - mise en décharge 60 %,
- ✓ Batterie du VE : recyclage 90 % - mise en décharge 10%

Le recyclage des batteries des VE est obligatoire. L'hypothèse du recyclage de 90% de la masse de la batterie a été validée par le comité technique.

Deux grandes voies de recyclage se développent en parallèle : la pyrométallurgie et l'hydrométallurgie³⁴.

Pyrométallurgie :

Les principales étapes sont les suivantes :

Pré-broyage et tri,

Fusion à haute température (la combustion de la phase organique fournit une partie de l'énergie nécessaire),

Affinage de la fraction métallique.

Hydrométallurgie :

Les principales étapes sont les suivantes :

- ✓ Broyage et de tri : étape préalable pour séparer et valoriser les éléments organiques des éléments métalliques. Les plastiques « externes » des batteries sont séparés lors de la phase de déconstruction et sont vendus pour être traités / recyclés par un prestataire spécialisé,
- ✓ Mise en solution des métaux (lixiviation). Selon la nature de la phase à traiter, la lixiviation est réalisée soit à l'aide d'un acide, soit d'une base avec au besoin l'ajout d'un oxydant. Les métaux en solution apparaissent sous forme ionique,
- ✓ Traitement du concentré non-ferreux qui en résulte,
- ✓ Purification des impuretés notamment les métaux lourds,
- ✓ Séparation sélective des différents sels de métaux majoritaires.

Les phases de séparation et de purification sont réalisées par des techniques de cémentation ou de précipitation. Le choix de l'une ou l'autre de ces techniques est conditionné par l'élément à séparer, sa quantité et le procédé chimique utilisé.

Une fois que les différents sels métalliques sont séparés, une phase ultérieure d'affinage est nécessaire. Elle sera réalisée par des mini métallurgies. Les teneurs en métal dans les sels à l'issue du procédé par hydrométallurgie sont à priori suffisantes pour procéder à cet affinage.

Le Comité Technique a choisi d'étudier le recyclage par pyrométallurgie. Nous noterons cependant que certains industriels français s'orientent vers la voie de

³⁴ Etude de la seconde vie des batteries des véhicules électriques et hybrides rechargeables, ADEME, juillet 2011.

l'hydrométallurgie avec notamment la participation à des projets européens visant à développer différents process hydrométallurgiques pour traiter les différentes chimies des batteries automobiles. La pyrométallurgie a été considérée comme une hypothèse plus pertinente compte-tenu des capacités industrielles de traitement étant en cours de mise en place au niveau Européen.

Seul le crédit de la matière vierge est considéré dans le calcul. Ainsi, avant de calculer les bénéfices du recyclage, les scories (flux intrants) de l'inventaire sont déterminées puis déduites de la matière recyclable en fin de vie du véhicule. Pour la matière restante, les impacts du recyclage sont considérés ainsi que les impacts évités pour le même poids de matière vierge.

2.6 Allocations

Pour la phase de conduite de la phase d'utilisation, aucune règle d'allocation n'est appliquée au véhicule.

Pour les phases de fabrication du véhicule de production d'électricité et de fin de vie, des règles d'allocation sont appliquées au niveau des données amont issues de la base GaBi. Les détails de ces règles d'allocation sont disponibles dans la documentation publique de GaBi³⁵.

Pour un produit de raffinerie, une allocation du procédé de raffinage est nécessaire afin d'obtenir les émissions et les consommations énergétiques correspondant à chaque produit. Les produits légers issus du raffinage, comme l'essence, le Diesel ou le kérosène demandent une quantité importante de brut. Des étapes additionnelles du raffinage, comme la distillation sous vide, le cracking ou l'hydrocracking sont réalisées après la distillation atmosphérique qui transforme les composants les plus lourds du brut en produits légers.

L'effort majeur pour couvrir la demande de ces produits légers est la consommation élevée d'énergie et les émissions par unité de Diesel ou d'essence par rapport au fuel lourd.

La consommation de Diesel, d'essence et de kérosène a tendance à augmenter depuis l'an 2000 et contribue à l'utilisation croissante de techniques améliorées. En Europe, cette augmentation de la consommation est due:

- ✓ Au consommateur qui achète de plus en plus de VP Diesel,
- ✓ A une demande croissante en carburant pour l'aviation et le transport (Purvin, 2011).

En Europe, la consommation de Diesel approche de son plafond avant de décroître, ce sera fait avant 2020, celle d'essence décroît depuis 1995.

En 2010, la production moyenne en Europe de la raffinerie se répartissait de la manière suivante : 22,2 % de Diesel, 33,4% d'essence et 44,3% d'autres produits (JEC 2011a).

³⁵ Site web de PE INTERNATIONAL

<http://www.pe-international.com/fileadmin/gabi/documentation5/GaBiModellingPrinciples.pdf>

Du fait de l'augmentation de la consommation de Diesel en Europe, les impacts se concentrent sur la production de Diesel et diminuent sur l'essence et aux autres produits issus de la raffinerie.

Pour la phase de production du carburant, toutes les émissions de raffinerie sont allouées aux produits selon des clés d'allocation calculées à partir des données disponibles dans l'étude JEC well-to-wheels analysis (JEC 2011a) :

- ✓ Les émissions de CO₂ sont allouées aux produits selon la clé d'allocation en CO₂ équivalent,
- ✓ Les autres émissions et les consommations d'énergie de la raffinerie sont allouées aux produits à l'aide des clés d'allocation énergétique.

Cette méthode d'allocation a fait l'objet d'un consensus de l'ensemble des membres du comité « Filières énergétiques ».

Tableau 2-8 Facteurs d'allocation pour les produits issus de la raffinerie en Europe

	g CO ₂ /MJ carburant	Facteur d'allocation CO ₂	Energie primaire carburant/ MJ	Facteur d'allocation énergie primaire
Essence	7.0	1.19	0.08	1.10
Diesel	8.6	1.46	0.1	1.37
Autre produits de raffinerie	3.1	0.53	0.05	0.65
Total produits raffinés	5.9		0.07	

Les émissions de CO₂, pour un produit moyen issu de la raffinerie, est de 5,9 g/MJ, comparé à 8,6 g/MJ pour le Diesel et à 7,0 g/MJ pour l'essence dans l'étude JEC. En conséquence, les émissions de CO₂ pour un kilogramme de produit moyen issu de la raffinerie dans la présente étude ACV ont été multipliées par 1,46 pour le Diesel et 1,19 pour l'essence. Toutes les autres émissions et consommations de la raffinerie ont été multipliées par les facteurs d'allocation énergétique.

2.7 Règles de coupure

Pour les véhicules, il n'y a pas de règles de coupure explicites qui sont appliqués. Les modèles des véhicules prennent en compte la masse entière du véhicule. Pour chaque matériau ou famille de matériaux, l'inventaire d'un matériau et procédé représentatif est choisi dans la base GaBi Professional. Ces inventaires incluent également des taux de chutes spécifiques et les impacts environnementaux liés à la valorisation de ces chutes;

L'étude prend en compte la production et l'assemblage des OEM dans l'usine de production du véhicule. L'assemblage des moteurs, boîte de vitesse et autres éléments des fournisseurs n'ont pas été pris en compte.

Pour la production des batteries, la même approche a été utilisée. Pour la production des cellules, aucune donnée sur les chutes de production et leur recyclage n'est disponible, pour cette raison, cela n'a pas été pris en compte.

Les données générales de production de matériaux, d'énergie, et procédés de production viennent de GaBi 5. La documentation est disponible au publique.

<http://www.gabi-software.com/databases/professional/>

Dans la base de données GaBi Professional, les équipements de production sont généralement négligés. Le système offre une bonne qualité des résultats des catégories d'impacts évaluées (potentiel de changement climatique, potentiel d'épuisement des ressources fossiles, potentiel d'acidification, potentiel d'eutrophisation de l'eau, potentiel de création d'ozone photochimique). Le potentiel d'épuisement des ressources minérales étant relativement nouveau, l'exhaustivité des inventaires n'est pas définie, ainsi les résultats pour cette catégorie peuvent être moins exacts que ceux des autres catégories. Les résultats ne sont donc pas préconisés pour orienter les décisions.

Pour la phase d'utilisation, la production du carburant et de l'électricité a été prise en compte ainsi que la production des pièces de rechange. Concernant la fin de vie, l'impact environnemental du désassemblage est négligé. La production de biens d'équipement n'est pas considérée comme pour le système complet.

2.8 Inventaire du cycle de vie (ICV)

Les flux élémentaires issus de l'inventaire présents dans le tableau ci-dessous sont utilisés afin d'enrichir l'interprétation des résultats. Les besoins en énergie primaire d'origine renouvelable et non renouvelable permettent de comparer les filières pétrolière et électrique. Les flux quantifiant les émissions de CO₂, de CO, de NO_x, de SO₂ et de COV renseignent l'impact lié à la pollution atmosphérique locale, ils seront notamment utilisés dans le module 2.

Le mix électrique a un impact très important dans le cycle de vie du véhicule électrique. Dans ce contexte, la radioactivité doit être discutée. Bien qu'il n'existe pour l'instant pas d'indicateur environnemental associé aux déchets radioactifs, ces derniers seront néanmoins mis au regard des autres flux d'inventaire sélectionnés.

Tableau 2-9 : Flux d'inventaire présentés dans ce rapport

Paramètres d'inventaire	Unité de référence
<u>Entrants</u>	
Besoin en énergie primaire d'origine non renouvelable	MJ
Besoin en énergie primaire d'origine renouvelable	MJ
<u>Sortants</u>	
CO ₂	kg
CO	kg
NO _x	kg
SO ₂	kg
Composés Organiques Volatils (sauf méthane)	kg

Particules (PM 10 - 2,5) ³⁶	kg
Déchets radioactifs (High)	kg
Déchets radioactifs (Medium)	kg
Déchets radioactifs (Low)	kg
Radifères ³⁷	kg
Emissions radioactives dans l'air	Bq
Emissions radioactives dans l'eau	Bq

2.9 Catégories d'impact et indicateurs

L'évaluation des impacts environnementaux potentiels est basée sur la méthodologie du Centrum voor Milieuwetenschappen (CML) de Leiden (NL) /CML2001³⁸, largement utilisée dans l'industrie. La sélection des catégories d'impact est basée sur le choix fait par l'industrie Européenne de l'automobile et de nombreuses autres parties prenantes dans le cadre du projet Européen LIRECAR et est cohérente avec les recommandations de l'ADEME dans son appel d'offre. De plus, comme les données primaires de GaBi viennent de l'industrie, ils sont en conformité avec la méthodologie CML 2001.

Le tableau suivant présente les différentes catégories d'impact et leurs indicateurs associés.

L'étude dans son ensemble se concentre sur le respect des standards internationaux définissant les principes ACV, notamment ISO 14040 et 14044 mais également autant que possible l'International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook développé par l'Institute for Environment and Sustainability (IES), Joint Research Centre (JRC), European Commission. Les méthodologies préconisées par ILCD n'ont en revanche pas été utilisées pour le choix des catégories d'impact et indicateurs.

³⁶ Grosses particules de taille comprise entre 10 et 2,5 µm, ce flux a été choisi car il est représentatif des émissions de particules du secteur des transports et est bien documenté dans la base de données GaBi.

³⁷ Contrairement aux déchets radioactifs qui sont confinés, les radifères sont émis à l'air libre sur les sites d'extraction

³⁸ Version mise à jour de Novembre 2010

Tableau 2-10 : Catégories d'impact choisies

Catégories d'impact	Indicateurs	Commentaires	Unités de référence
Changement climatique	CML 2001 Gaz à effet de serre (GWP ₁₀₀)	Absorption et ré-émission des radiations infrarouges par le gaz de l'atmosphère qui conduit au réchauffement climatique.	kg CO ₂ - Eq.
Eutrophisation de l'eau	CML 2001 Potentiel d'Eutrophication (EP)	Surfertilisation du sol et de l'eau	kg Phosphate-Eq.
Oxydation photochimique	CML 2001 Oxydation photochimique (POCP)	Création d'ozone dans la troposphère à partir de composés organiques volatiles et de NOx.	kg Ethylene- Eq.
Acidification atmosphérique	CML 2001 Potentiel d'acidification (AP)	Classification des émissions capables de former des éléments acides, ce qui se traduit par une perte d'éléments minéraux nutritifs pour les arbres et la végétation, par exemple.	kg SO ₂ - Eq.
Epuisement des ressources fossiles	CML 2001 Epuisement des ressources abiotiques fossiles (ADPf)	Mesure l'épuisement des ressources énergétiques fossiles.	MJ
Epuisement des ressources minérales	CML 2001 Epuisement des ressources abiotiques élémentaires (ADPe)	Mesure de l'épuisement des ressources en minerais ou autres matériaux.	kg Sb-Eq.

Les catégories d'impact suivantes ne sont pas prises en compte dans le cadre de l'étude :

Tableau 2-11 Catégories d'impact non sélectionnées

Catégories d'impact	Indicateurs	Commentaires	Unités de référence
Diminution de la couche d'ozone	CML 2001 Diminution de la couche d'ozone	Phénomène de destruction de la couche d'ozone stratosphérique dû à certaines molécules, comme les CFC. Cette couche d'ozone stratosphérique est fondamentale pour la vie terrestre car elle absorbe les rayons UV nocifs.	kg R11-Eq.
Toxicité humaine	CML 2001 Toxicité humaine	Impacts des émissions polluantes sur la santé humaine.	kg DB 1-4-Eq
Eco-toxicité	CML 2001 Eco-toxicité aquatique/maritime/terrestre	Impacts des émissions polluantes sur la biosphère (hors être humain).	kg DB 1-4-Eq

D'un part, la précision des méthodes de caractérisation de l'indicateur de la toxicité varie de 100 à 1000 pour la toxicité homme et de 10 à 100 pour l'eco-toxicité aquatique. Ces valeurs sont données par /Rosenbaum/ pour la méthode USEtoxTM, une des méthodologies les plus scientifiquement reconnues. D'autre part, la base de données GaBi réalisé à partir d'informations des professionnelles, ne dispose pas d'une finesse d'inventaire nécessaire à la caractérisation de qualité de ces indicateurs d'impact. Par exemple, les émissions de COV sont généralement mesurés en une seule et même famille agrégé.

La catégorie d'impact concernant la diminution de la couche d'ozone n'est pas prise en compte car la contribution de l'automobile à cet impact est faible et ne représenterait pas ici un grand intérêt. En effet, suite au protocole de Montréal, tous les flux ayant un potentiel de destruction de la couche d'ozone ont été interdits.

Conformément aux recommandations des normes ISO 14 040 et 44, les indicateurs End-point ne sont également pas utilisés dans cette étude.

Les éléments facultatifs comme la normation, le regroupement et la pondération n'ont pas été retenus dans le cadre de cette étude bien qu'une breve mise en perspective normée est proposée dans le résumé.

2.10 Types et sources des données

Les données d'entrée utilisées dans le cadre de cette étude sont de 3 natures :

- ✓ Des données spécifiques directement collectés auprès des membres du comité technique (composition masse matière des véhicules et des batteries, émissions et consommations des sites de fabrication...)
- ✓ Des données génériques provenant des bases de données GaBi Professional (données relatives à l'extraction, le transport et la mise en forme des matières premières)
- ✓ Des données issues de la littérature disponible (les bouquets électriques à l'horizon 2020 proviennent de l'étude « EU energy trends to 2030 » édité par DG environnement³⁹)

La plupart des données amont sont issues de la base de données GaBi Professional, dont la documentation est disponible publiquement.

Les données générales de l'inventaire pour la production des matériaux, énergie, et procédés sont également issues de la base de données GaBi.

Pour le scénario 2020, les données GaBi de 2012 sont utilisées. Ainsi, la qualité des données du scénario 2020 est inférieure à celle du scénario 2012.

Afin d'assurer la représentativité des technologies utilisées pour le scénario 2020, un « atelier 2020 » a été organisé. Il a permis aux membres du comité technique de discuter des hypothèses à prendre en compte dans le scénario 2020 pour les véhicules thermiques et électriques. La procédure de l'atelier 2020 est décrite dans le Chapitre 3.1.1.

³⁹ European Commission (EC) – Directorate General for Energy: EU Energy trends to 2030 – Update 2009, Luxembourg, 2010.

2.11 Exigences sur la qualité des données

La qualité des données est jugée selon :

- ✓ **La précision** (mesurée, calculée ou estimée),
- ✓ **La complétude** (Cf. est-ce qu'il y a des émissions non reportées ?),
- ✓ **La cohérence** (degré d'uniformité de la méthodologie appliqué à l'étude source d'informations),
- ✓ **La représentativité** (géographique, temporelle, technologique).

2.11.1 Précision et la complétude

La précision dans la collecte des données et les connaissances techniques pour évaluer les éléments pertinents sont les facteurs les plus importants qui influencent le degré d'incertitude des résultats d'une analyse de cycle de vie⁴⁰.

Ces données en amont de l'inventaire des données de la base de données GaBi sont largement distribuées et utilisées dans le logiciel GaBi. Les données ont été utilisées dans des modèles ACV dans le monde entier depuis plusieurs années pour des applications industriels et scientifiques, pour des études internes ou pour des revues critiques.

Ces données ont été comparées avec d'autres bases de données et valeurs venant d'industriels et de la littérature.

Durant la réalisation du modèle, des contre-vérifications concernant la plausibilité des flux (masse et énergie) ont été faites continuellement.

Pour les scénarios 2020, des jeux de données datant de 2012 ont été utilisés. Ainsi, la qualité des scénarios 2020 est inférieure à celle des scénarios 2012.

Afin d'assurer la représentativité technologique des scénarios 2020, un « atelier 2020 » a été organisé. Au cours de cet atelier, les membres du comité technique ont discuté des hypothèses à considérer pour élaborer les scénarios 2020 pour les VT et les VE. Le déroulé de « l'atelier 2020 » est détaillé dans le Chapitre 3.1.1.

2.11.2 Complétude

Tous les procédés spécifiques et pertinents pour les différentes options sont considérés et modélisés afin de représenter chaque situation spécifique. Tous les procédés amont sont issus de la base GaBi Professional (voir la documentation GaBi 5). Les chutes de production de la batterie, les consommations des auxiliaires et les consommations correspondant à un usage réel ne sont pas prises en compte. Ces

⁴⁰ La précision de 100 % d'un système est une valeur plutôt théorique qui exigerait des efforts inadéquats. Dans le meilleur des cas, on peut atteindre une inclusion de 95-98 % des flux d'énergie et la masse. Selon Kupfer (2005) l'intégration de 95 % du système vient avec une erreur inhérente de plus de 12 % quant aux résultats d'impact, ce qui signifie que la précision peut être évaluée à 88 %. Si la perfection est augmentée à 99 % (incluant des efforts exponentiellement accrus) la précision des résultats de LCA atteint 96 % maximum. (Source: Kupfer, Thilo: Prognosis of environmental effects for developing chemical plants : a contribution to Life Cycle Engineering; University Stuttgart, Dissertation, 2005)

points sont traités dans l'analyse d'incertitude. La quantité importante de flux élémentaires pour chaque procès assure la complétude du modèle. En outre, les jeux de données GaBi sont issus de données industrielles qui ne présente pas la qualité et la précision nécessaire à la caractérisation exacte des impacts environnementaux. Par exemple les émissions de COV sont généralement mesurées de façons agrégées. Aucune indication sur les émissions individuelles n'est disponible, ainsi, certaines catégories d'impact comme la toxicité humaine ou l'écotoxicité aquatique sont difficilement utilisables.

2.11.3 Cohérence

Pour assurer la cohérence des données, seules les données primaires ayant le même niveau de détail ainsi que les données amont des bases de données GaBi sont utilisées. Lors de la construction du modèle, des vérifications croisées concernant la plausibilité des flux matière et d'énergie sont continuellement réalisées. Les données primaires représentatives des technologies ont été vérifiées et recalculées plusieurs fois par PE INTERNATIONAL. Aucune incompatibilité n'a pu être trouvée. Les règles utilisées pour collecter les données primaires sont les mêmes que celles utilisées pour réaliser les jeux de données de la base GaBi, ce qui assure la cohérence des données créées avec celles déjà existantes.

2.11.4 Reproductibilité

Il est difficile de définir des règles homogènes en terme de qualité de données pour une étude de cette ampleur.

Le périmètre géographique est traité au travers des différents scénarios. Chaque processus provient de la base de données professionnelle GaBi. Les données seront représentatives pour un véhicule assemblé en France et utilisé dans les pays européens suivants : France, Allemagne, Italie, Espagne, Royaume-Uni, ainsi qu'une moyenne européenne. Lorsque des données françaises n'étaient pas disponibles, des données de niveau européen ont été utilisées.

L'utilisation de la dernière version de la base de données assure la représentativité des données pour les périmètres technologiques et temporels. Aussi, elle permet de s'assurer que les méthodologies sélectionnées et la qualité des jeux de données sont comparables. Tout jeu de données utilisé dans le système daterait de moins de cinq ans.

Le périmètre technologique est moins représentatif, en raison des technologies émergentes détaillées dans l'étude, surtout pour le scénario 2020.

La précision ne peut pas être évaluée en utilisant les bases de données professionnelles actuelles GaBi.

La reproductibilité est disponible pour tout praticien indépendant ayant accès aux informations confidentielles utilisées dans l'étude, et ayant accès aux bases de données professionnelles GaBi correspondantes.

D'autre part, des données primaires ont été collectées dans le cadre de ce projet. Ici, la qualité des données collectées est hétérogène.

Fabrication

La fabrication du véhicule est basée sur la nomenclature masse/matière et les données des sites des constructeurs.

Les données des sites (consommations et émissions) sont des moyennes de production annuelle rapportées aux véhicules étudiés. Afin d'être en adéquation avec les données issues de GaBi, ces données primaires ne devraient pas être âgées de plus de cinq ans. La chaîne d'assemblage se trouve en France. Une moyenne des données sur plusieurs années n'est pas nécessaire.

Phase d'Utilisation

En phase d'utilisation, la consommation du véhicule est basée sur les conditions du cycle NEDC. Les mesures des résultats sont typiquement des mesures à point unique. Cependant, le cycle NEDC est accepté et utilisé de la même manière partout dans l'UE. C'est la base commune de toute comparaison concernant les mesures de consommation de carburant réalisées dans l'UE.

Fin de Vie

Pour la fin de vie du véhicule, aucune donnée primaire n'est collectée. La modélisation de la fin de vie est basée sur la composition du véhicule communiquée au stade de fabrication.

La Batterie

La batterie a un impact environnemental considérable sur la durée de vie du véhicule électrique. Les fabricants de batteries impliqués dans le projet ne fabriquent pas les batteries pour les véhicules évalués. Des données moyennes secondaires sur la fabrication des batteries ne sont pas disponibles pour réaliser une ACV basée sur la composition de la batterie, des données primaires doivent être collectées. Les données primaires utilisées sur des batteries qui pourraient convenir au véhicule électrique étudié, en terme de taille et d'autonomie. Les données réunies sont représentatives d'une fabrication de batterie en France.

Toutes les données collectées se traduisent en catégories d'impact et en paramètres ICL présentés dans la section 2.9.

Les Scénarios 2020

Pour les scénarios 2020, les mix électriques sont adoptés comme source majeure de changements futurs d'émissions pour le VE. Les changements dans les rendements de production d'énergie et de matériaux étant difficiles à estimer, seuls les changements de mix électriques ont été retenus.

2.12 Hypothèses et limitations

La limitation principale de cette étude concerne les données utilisées à l'horizon 2020. Les approximations réalisées sont détaillées dans un souci de transparence, afin d'assurer la représentativité des résultats.

Les autres limitations concernent :

- ✓ La durée de vie des batteries, pour lesquelles il manque un réel retour d'expérience,
- ✓ Les infrastructures de charge, qui restent hors du champ de l'étude,
- ✓ Les usines de production des batteries, dont la construction n'est pas prise en compte, et dont l'exploitation est modélisée par leur seule consommation d'électricité durant la production de la batterie,
- ✓ L'usage réel des véhicules, approché au travers de cycles normalisés par essence imparfaits.

2.13 Revue critique

L'étude propose de comparer deux types de véhicules, thermique et électrique, et sera rendue publique. Pour ces raisons, une revue critique par un panel d'experts indépendants est obligatoire au regard des normes ISO 14040/44. Le panel d'experts est composé de :

- ✓ Jérôme Payet (président du panel),
- ✓ Matthias Finkbeiner
- ✓ Andreas Ciroth.

Tous les experts travaillent depuis déjà de nombreuses années sur des projets pointus d'analyse de cycle de vie et disposent également de solides connaissances dans l'industrie automobile.

Le rapport du panel de revue critique est inclut dans ce rapport.

Les membres du panel de la revue critique ont travaillé sur la version anglaise ; on considère que la traduction Française de ce rapport reflète complètement le contenu du rapport en Anglais qui a été revu.

2.14 Format du rapport

La présente étude est comparative et de ce fait, le rapport a été rédigé en suivant les recommandations de la norme ISO 14 044 pour les études comparative destinées à être publiées.

3. Inventaire

3.1 Collecte des données d'inventaire

3.1.1 Atelier 2020

L'atelier "2020" a pour objectif de construire un scénario représentatif de 2020 afin de déterminer l'évolution des résultats ACV pour cette période-là.

Pour obtenir des valeurs pour la modélisation des différentes étapes du cycle de vie du véhicule en 2020, différentes sources ont été choisies:

- ✓ Valeurs de réglementation,
- ✓ Données de la littérature,
- ✓ Conseils des membres du comité technique.

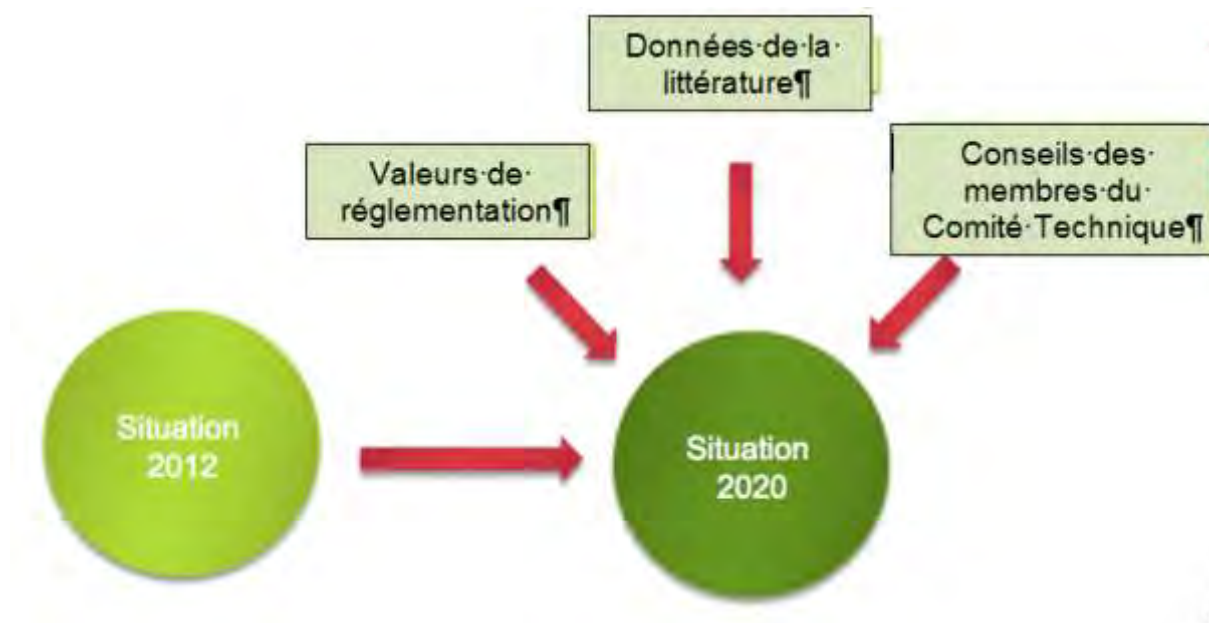


Figure 3-1 Procédure de "l'atelier 2020"

2 groupes ont été réunis pour travailler sur ces différents sujets:

- ✓ Véhicules et batteries,
- ✓ Electricité et carburants.

Les hypothèses décrites plus loin pour la collecte des données pour le scénario 2020 sont issues des décisions prises lors de cet "atelier 2020".

Cette procédure renforce la qualité des données pour ce scénario-là.

3.1.2 Composition matière des véhicules

Un véhicule est un système relativement complexe. La phase de production, qui comprend une chaîne d'approvisionnement longue, l'est tout particulièrement. Ainsi, pour collecter les données de la production du véhicule de manière précise et efficace, une approche simplifiée ou « screening approach » a été choisie. La figure suivante illustre cette démarche. Dans cette approche, la collecte des données se résume à renseigner une nomenclature (*EN : Bill of Materials*) pour le véhicule entier et les informations environnementales de l'usine de production.

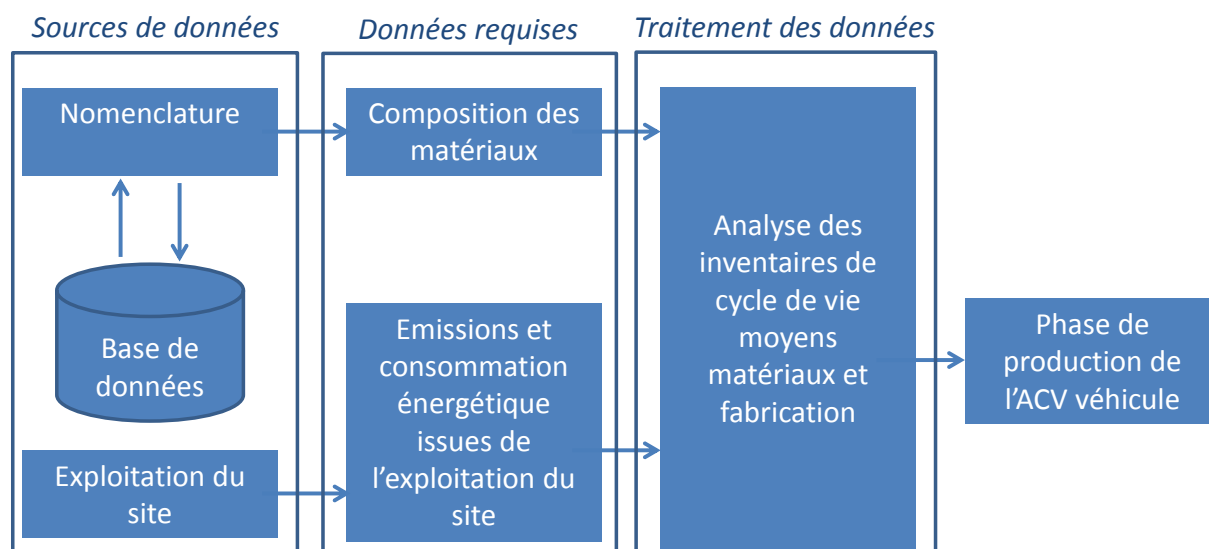


Figure 3-2 : ACV d'un véhicule par une approche par criblage

La nomenclature couvre la masse totale du véhicule. La description de chaque élément permet de définir le matériau, le produit semi-fini et les procédés de fabrication nécessaires pour obtenir le produit final, c.f. le matériel "DC01" est une tôle galvanisée et le procédé utilisé est l'emboutissage. Les procédés sont connectés avec les inventaires de données de la base GaBi.

3.1.2.1 Scénarios 2012

La figure ci-dessous montre une composition matière moyenne de trois véhicules particuliers. Pour le VE, la composition matière de la batterie n'est pas prise en compte comme expliqué dans la partie 3.1.4 Batteries.

La composition de chaque véhicule (VT et VE) est une moyenne des compositions de véhicules existants, fournies par les constructeurs, membres du comité technique. Le véhicule Diesel est constitué de 711 kg d'acier et d'éléments ferreux. Les polymères sont également très présents avec 218 kg, suivis des alliages légers (65 kg), des carburants et auxiliaires (60 kg), d'autres matériaux (43 kg), de métaux lourds non ferreux (37 kg) et d'autres polymères (15 kg). Toutes les autres classes de matériaux sont à peine visibles sur le diagramme mais peuvent être extraites à partir du Tableau 3-1. Le poids total du véhicule Diesel est de 1145 kg.

Le poids calculé du véhicule essence total est de 1 111 kg.

En comparaison au véhicule Diesel, la composition matière d'un véhicule essence moyen est assez similaire. De petites différences existent au niveau des fractions d'acier et de métaux ferreux, des alliages légers, ainsi que pour certains autres

matériaux. Ces différences peuvent être attribuées aux fonctions d'allumage du moteur et de l'isolation acoustique des véhicules essence.

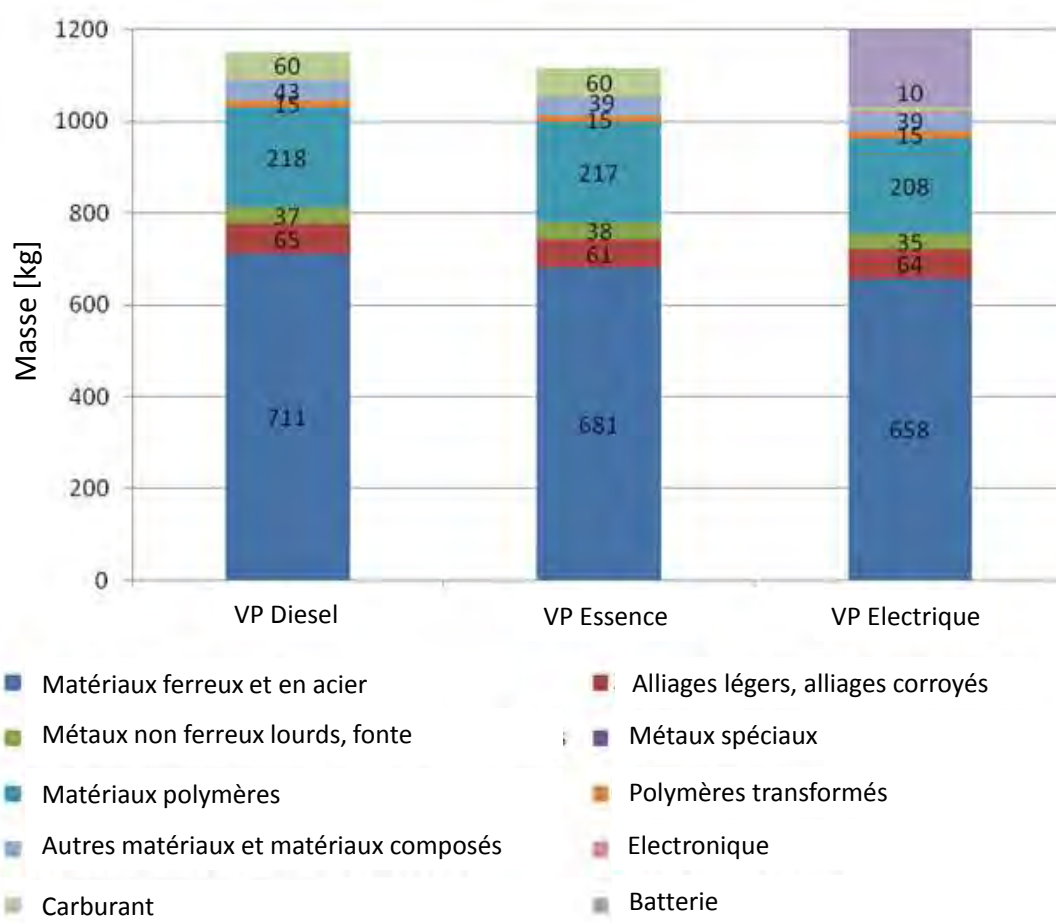


Figure 3-3 Composition matière d'un véhicule particulier

Pour le véhicule électrique, le poids calculé est de 1 031 kg en excluant la batterie. Sur le véhicule électrique, les quantités d'acier et de métaux ferreux, de polymères, de carburants et d'auxiliaires sont inférieures en comparaison aux deux variantes du VT. Les véhicules électrique et thermique étant de conception différente, les différences de masse sont difficiles à analyser. Les VE sont des véhicules construits pour des usages précis et les données recueillies ne sont pas suffisamment détaillées pour permettre des comparaisons avancées. Toutefois, les données révèlent que la masse du moteur et de la boîte de vitesse est d'environ 170 kg pour le moteur Diesel et de 130 kg pour le moteur à essence alors que la masse d'un moteur électrique et celui de la boîte de vitesse est d'environ 110 kg. Cela reflète bien les différences des composants d'acier et de fer. De plus, le véhicule électrique n'a pas de réservoir de carburant, ce qui conduit à une plus faible masse de polymère. Compte tenu de ces éléments, la composition matière du véhicule électrique est considérée comme réaliste.

Le Tableau 3-1 montre la composition matière des VP et les écarts par rapport à la moyenne. On observe que la composition matière des VT étudiés est proche. Seule

la fraction de polymères affiche, avec ± 23 kg pour l'essence (et ± 26 kg pour le Diesel), des écarts considérables entre les véhicules étudiés. La composition matière de l'équipement intérieur des véhicules est la principale cause de ces écarts. Les écarts pour les véhicules électriques sont beaucoup plus grands, par rapport aux VT. En effet, les véhicules électriques considérés se situent soit à la frontière des segments B et C (en termes de taille), soit à la frontière des segments A et B. Ceci explique notamment les grandes différences pour l'acier, les matériaux ferreux et les polymères.

Tableau 3-1 Composition matière des véhicules particuliers et écarts entre les véhicules (hors batterie) pris en compte pour établir un véhicule moyen

Catégorie de matériaux	VP Diesel 2012	VP Essence 2012	VP Electrique 2012
1 Matériaux ferreux et en acier (kg)	711 $\pm$ 7	681 $\pm$ 3	658 $\pm$ 123
2 Alliages légers et alliages corroyés (kg)	65 $\pm$ 6	61 $\pm$ 13	64 $\pm$ 5
3 Métaux non ferreux lourds, fonte (kg)	37 $\pm$ 5	38 $\pm$ 4	35 $\pm$ 9
4 Métaux spéciaux (kg)	0,15 $\pm$ 0,1	0,08 $\pm$ 0,03	0,03 $\pm$ 0,03
5 Matériaux polymères (kg)	218 $\pm$ 23	217 $\pm$ 26	208 $\pm$ 30
6 Polymères transformés (kg)	15 $\pm$ 0	15 $\pm$ 0	15 $\pm$ 0
7 Autres matériaux et matériaux composés (kg)	43 $\pm$ 1	39 $\pm$ 2	39 $\pm$ 5
8 Electronique (kg)	3 $\pm$ 1	3 $\pm$ 1	4 $\pm$ 3
9 Carburants et auxiliaires (kg)	60 $\pm$ 4	60 $\pm$ 0	10 $\pm$ 0

VUL

La figure suivante montre la composition matière et des trois VUL moyens étudiés. Pour le VE, la composition matière de la batterie n'est pas incluse pour des raisons de confidentialité.

Les véhicules Diesel sont composés de 893 kg d'acier et de matériaux ferreux, de 212 kg de polymères, suivis des alliages légers (68 kg), des carburants et des auxiliaires (72 kg), des métaux non ferreux des métaux lourds (29 kg), de polymères transformés (15 kg) et d'autres matériaux non spécifiés (39 kg). Toutes les autres classes de matériaux sont à peine visibles dans le diagramme, mais peuvent être extraites des

Tableau 3-2 et Tableau 3-1.

Le poids calculé du VUL Diesel moyen est de 1335 kg.

En comparaison avec le véhicule Diesel, la composition matière du véhicule essence moyen est assez similaire. Le poids calculé du VUL essence moyen est de 1 330 kg.

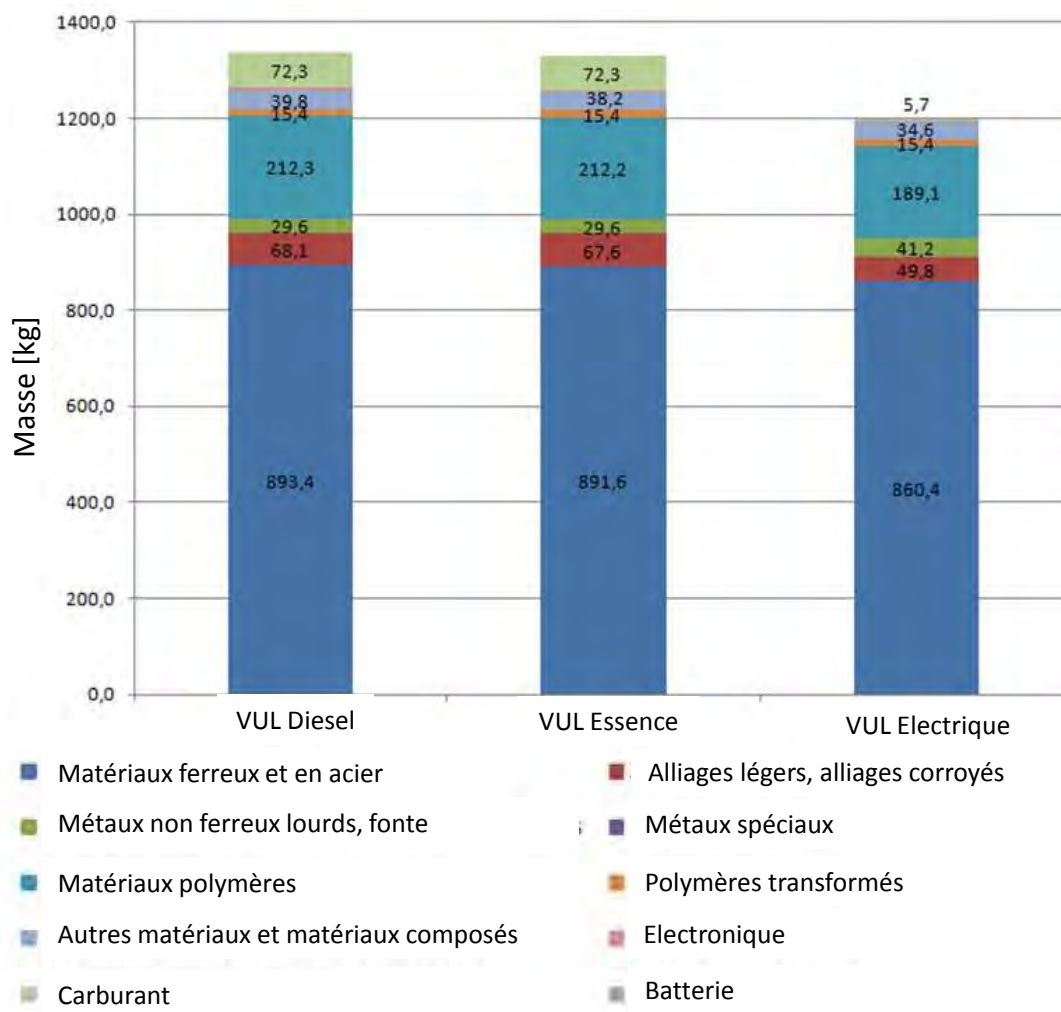


Figure 3-4 Composition matière des VUL (hors batterie) étudiés

Pour le VE, le poids calculé est de 1 200 kg, hors batterie. Pour le VE, les fractions d'acier et de métaux ferreux, de polymère et de carburant et auxiliaires sont plus petites, comparées à celles du VT. Pour la fraction de carburant et auxiliaires, la diminution semble évidente, dans la mesure où le VE n'utilise pas de carburant fossile. Pour les autres fractions, il n'est pas possible d'assimiler les écarts à des différences spécifiques, dans la mesure où les nomenclatures des véhicules ont été fournies avec des niveaux de détail différents. Toutefois, les données révèlent que la masse du moteur et de la boîte de vitesse atteint environ 180 kg pour les moteurs Diesel et essence. La masse d'un moteur électrique et de son réducteur est d'environ 140 kg. Cela explique les différences pour les éléments en acier et métaux ferreux. Le VE n'a également pas de réservoir de carburant, ce qui conduit à une plus faible masse de polymères.

Le

Tableau 3-2 montre la composition matière des différents VUL étudiés. Il montre que tous les véhicules considérés sont assez semblables dans leur composition matière.

Tableau 3-2 Composition matière et écarts des VUL (hors batterie) étudiés entre les véhicules pris en compte pour établir un véhicule moyen

Catégorie de matériaux	VUL Diesel 2012	VUL Essence 2012	VUL Electrique 2012
1 Matériaux ferreux et en acier (kg)	893 +/- 10	892 +/- 11	860 +/- 47
2 Alliages légers et alliages corroyés (kg)	68 +/- 11	68 +/- 11	50 +/- 2
3 Métaux non ferreux lourds, fonte (kg)	30 +/- 2	30 +/- 2	41 +/- 11
4 Métaux spéciaux (kg)	0,1 +/- 0,07	0,09 +/- 0,06	0,04 +/- 0,02
5 Matériaux polymères (kg)	212 +/- 1	212 +/- 1	189 +/- 12
6 Polymères transformés (kg)	15 +/- 0	15 +/- 0	15 +/- 0
7 Autres matériaux et matériaux composés (kg)	40 +/- 10	38 +/- 9	35 +/- 8
8 Electronique (kg)	4 +/- 3	3 +/- 2	3 +/- 2
9 Carburants et auxiliaires (kg)	72 +/- 0	72 +/- 0	6 +/- 0

3.1.2.2 Scénarios 2020

Une des cibles principales de l'évolution technique des véhicules de nos jours est la réduction des émissions de CO₂ pendant la phase d'utilisation. Les innovations dans le secteur de l'automobile sont généralement introduits via une approche « top down » : les innovations sont d'abord intégrées aux véhicules haut de gamme, pour ensuite être introduites sur le marché de masse. Suivant cette observation, différents articles reflétant l'état de l'art du développement des véhicules haut de gamme actuels ont été étudiés. Les mesures d'innovation observées sur ce segment à l'heure actuelle sont :

- ✓ Le « downsizing »,
- ✓ Le moteur « Start&Stop »⁴¹,
- ✓ La réduction des frottements,
- ✓ Un design allégé,
- ✓ L'hybridation.

Parmi ces innovations, seul l'allègement du véhicule et l'hybridation peuvent avoir une influence significative sur la composition matière des véhicules. Comme les véhicules hybrides n'entrent pas dans le cadre de l'étude, l'allègement du véhicule reste la seule mesure quantifiable permettant de modéliser la production d'un véhicule à l'horizon 2020.

⁴¹ Les premiers véhicules dotés d'un moteur Start&Stop sont maintenant sur le marché, cependant cette technologie n'est pas largement répandue sur le marché. Les véhicules étudiés en 2012 n'incluent donc pas de moteur Start&Stop.

Il a été décidé avec les constructeurs que l'allègement du véhicule à l'horizon 2020 serait principalement modélisé par l'intégration d'une fraction d'aluminium⁴² plus importante. Les constructeurs ont fait l'hypothèse d'une réduction de 100 kg du poids pour les véhicules du segment B, grâce au remplacement de 288 kg d'acier par 188 kg d'aluminium. Les compositions matière des véhicules à l'horizon 2020 sont présentées dans le Tableau 3-3 pour les VP et dans le Tableau 3-4 pour les VUL.

Tableau 3-3 Composition matière des VP (hors batterie) à l'horizon 2020

Catégorie de matériaux	VP Diesel 2020	VP Essence 2020	VP Electrique 2020
1 Matériaux ferreux et en acier (kg)	605	604	572
2 Alliages légers et alliages corroyés (kg)	256	256	238
3 Métaux non ferreux lourds, fonte (kg)	30	30	41
4 Métaux spéciaux (kg)	0,10	0,09	0,04
5 Matériaux polymères (kg)	212	212	189
6 Polymères transformés (kg)	15	15	15
7 Autres matériaux et matériaux composés (kg)	40	38	35
8 Electronique (kg)	4,4	3,1	3,3
9 Carburants et auxiliaires (kg)	72	72	5,7

Tableau 3-4 Composition matière des VUL (hors batterie) à l'horizon 2020

Catégorie de matériaux	VUL Diesel	VUL Essence	VUL Electrique
1 Matériaux ferreux et en acier (kg)	893,4	891,6	860,4
2 Alliages légers et alliages corroyés (kg)	68,1	67,6	49,8
3 Métaux non ferreux lourds, fonte (kg)	29,6	29,6	41,2
4 Métaux spéciaux (kg)	0,1	0,1	0,0
5 Matériaux polymères (kg)	212,3	212,2	189,1
6 Polymères transformés (kg)	15,4	15,4	15,4
7 Autres matériaux et matériaux composés (kg)	39,8	38,2	34,6
8 Electronique (kg)	4,4	3,1	3,3
9 Carburants et auxiliaires (kg)	72,3	72,3	5,7

⁴² Il existe d'autres techniques d'allègement envisageables comme l'intégration de la fibre de carbone. Cependant, dans un souci de simplicité et en accord avec les constructeurs, seule cette hypothèse a été retenue.

3.1.3 Fabrication du véhicule

3.1.3.1 Usine d'assemblage

Le fonctionnement de l'usine inclut les opérations suivantes :

- ✓ Atelier d'emboutissage,
- ✓ Atelier ferrage,
- ✓ Atelier de peinture,
- ✓ Chaîne d'assemblage.

Etant donné qu'une usine fabrique normalement une seule gamme de véhicules spécifiques, ces opérations peuvent être modélisées séparément ou bien modélisées comme une boîte noire pour l'usine entière. Il est possible parfois que des usines fabriquent des véhicules sans avoir d'atelier d'emboutissage propre ou que l'atelier d'emboutissage fabrique des pièces pour d'autres usines. Dans ces cas-là, il faut appliquer des allocations.

Dans cette étude, la logistique amont et aval pour la fabrication et la transformation est incluse dans la phase de production. La logistique amont prend seulement en compte la distance entre le fournisseur de rang 1 et l'usine. Les autres parties de la logistique sont déjà prises en compte dans les données amont des bases GaBi. La logistique en aval, pour la transformation, couvre la distance de l'usine aux centres de distribution.

Pour la fabrication du véhicule, les consommations et émissions de l'usine d'assemblage ont été prises en compte. Les données annuelles des tableaux de bord environnementaux des usines d'assemblage ont été ramenées par calcul à un véhicule. Les flux d'inventaire moyens collectés auprès des constructeurs sont présentés dans le Tableau . Les données sont représentatives des véhicules essence et Diesel. Les VE ne sont pas encore produits à l'heure actuelle. Aussi les consommations et émissions considérées pour la fabrication du VT ont été prises pour simuler la fabrication du VE.

Tableau 3-5 Fabrication des véhicules

	Unité	VUL	VP
Entrée			
Energie thermique Gas Naturel	MWh	0,29	0,9
Energie thermique charbon	MWh	-	0,69
Propane	kg	36,1	0
Electricité	kWh	0,41	0,75
Emissions dans l'Air			
COV	kg	4,87	2,75
SO2	kg	0,13	0,003
N2O	kg	0,28	0,24
CH4	kg	0,06	0
R134a	kg	0,01	0

3.1.3.2 Transport amont

Il n'est pas possible de collecter les données de la logistique amont. L'hypothèse d'une distance de 500 km en camion a été prise pour tous les véhicules étudiés.

3.1.3.3 Transport aval

Pour le transport aval, les distances et moyens de transport suivants ont été considérés.

Tableau 3-6 Distances et moyens de transport aval

Moyen de transport	Distance
Camion	550km
Bateau	150km
Train	150km

3.1.3.4 Scénarios 2020

Il est supposé que les consommations et émissions de l'usine d'assemblage à l'horizon 2020 sont les mêmes que celles des scénarios 2012. En effet, il n'est pas possible de connaître les émissions et consommations annuelles des sites de fabrication des véhicules. Cette hypothèse devrait avoir peu d'impact sur le résultat car les bilans environnementaux de la phase d'assemblage des véhicules sont faibles comparés à l'usage des véhicules ou à la production des matériaux.

3.1.4 Batteries

La batterie est un sujet hautement sensible et confidentiel. Les détails peuvent uniquement être fournis dans une annexe confidentielle, qui sera consultable par le panel de revue critique. Les informations suivantes décrivent ainsi de façon qualitative la production de la batterie.

Batteries 2012

Les batteries étudiées sont basées sur la technologie NMC (Nickel Cobalt Manganèse). La technologie NMC a été choisie en accord avec le comité technique, cependant il existe d'autres technologies disponibles dès 2012 sur le marché. Par exemple les batteries Li-Ion type LMO (LiMn2O4).

La même batterie est utilisée pour les VP et les VUL électriques.

La batterie considérée présente une capacité totale de 24kWh, et une capacité des cellules individuelles de 148Wh. Le poids total de la batterie est de 238 kg. La même batterie est utilisée pour les VP et les VUL.

Batteries 2020

Les experts « Batteries » au sein du comité technique se sont accordés sur deux technologies de batteries possibles pour 2020, toutes deux dites « Lithium-Ion » :

- ✓ La première est la batterie NMC avec une teneur réduite en cobalt. Les résultats montrent que le cobalt est un des facteurs importants de l'impact environnemental de la batterie. La teneur en cobalt a été réduite de 20% par rapport au scénario de base,
- ✓ La seconde technologie étudiée est celle basée sur le phosphate de fer, LiFePO_4 , avec une faible quantité de LiNiCoMnO .

A l'horizon 2020, une grande diversité de batteries sera disponible et le manque d'expérience dans ce domaine ne nous permet pas de définir avec précision l'état de l'art des technologies utilisées à cet horizon. C'est pourquoi, la batterie modélisée pour les scénarios à l'horizon 2020 est un mélange des 2 technologies décrites ci-dessous. Les données récoltées auprès des fabricants de batteries et de la littérature disponible ont permis cette modélisation « hybride ».

Par rapport à la batterie utilisée pour le scénario 2012, la batterie 2020 subit une amélioration au niveau des composants. Cependant, aucune amélioration de la performance de la batterie liée à ce changement de composants n'a été considérée. Nous disposons de peu de transparence sur les évolutions de caractéristiques fonctionnelles, il est probable qu'à l'horizon 2020 le gain se fasse surtout sur l'aspect sécuritaire, ce qui n'est pas reflété dans l'analyse d'impact.

Le modèle ACV des deux batteries est essentiellement basé sur la composition matière des batteries. Les pertes de production, n'ont pas été prises en compte.

La composition masse matière des batteries a été fournie par les producteurs de batteries participants à ce projet. La consommation d'énergie nécessaire à la fabrication des cellules a également été fournie.

Les résultats montrent que les impacts majeurs sont principalement dus aux matériaux de la batterie. La disponibilité de ces données est généralement faible. Le Tableau 3-7 présente l'inventaire des flux de la production des batteries.

Tableau 3-7 Inventaire de batterie

Jeu de données	Source	Commentaire
Electronique	GaBi professional database	Modèle moyen contenant signal et électronique de puissance
Tôle d'aluminium	GaBi professional database	Utilisé pour le bac batterie
Câble cuivre	GaBi professional database	Utilisé à plusieurs endroits du modèle de batterie
Polypropylene	GaBi professional database	Bac batterie, séparateur (film)
Polyethylene	GaBi professional database	Séparateur (film)
DMC – dimethyl carbonate	GaBi professional database	Electrolyte
LiPF ₆ - Lithium hexafluorophosphate	GaBi professional database	Electrolyte
Production de masse active	Literature	Basé sur Dewulf
Sulphate de cobalt	Estimation	Basé sur métaux cobalt et acide sulfurique

Sulphate de manganese	Estimation	Basé sur Manganèse et acide sulphurique
Sulphate de Nickel	Estimation	Basé sur Nickel et acide sulphurique
Carbon black	GaBi professional database	Additives
PVDF - Polyvinylidene Fluoride	GaBi professional database	Additives
Feuille d'Aluminium	GaBi professional database	
NMP	GaBi professional database	Solvent
Graphite	Littérature	Anode
Methylcellulose	GaBi professional database	
Electricité FR	GaBi professional database	

3.1.5 Carburants

3.1.5.1 Scénarios 2012

Raffinerie

L'inventaire de cycle de vie (En: LCI, Fr: ICV) pour l'essence et le gazole est calculé à partir du modèle de raffinerie de la base de données GaBi 2011. Un ajustement de la modélisation a été fait pour s'aligner avec les règles d'allocation appliquées par le JEC dans l'étude Well-to-wheels analysis (JEC 2011a) pour la modélisation d'une raffinerie.

Le tableau suivant présente les données utilisées dans cette étude pour calculer les inventaires des procédés de raffinerie pour produire de l'essence et du Diesel. Basé sur l'étude JEC WTW (JEC 2011a) les facteurs d'allocation pour les différents combustibles des raffineries ont été calculés pour allouer les émissions et la consommation en ressources à des produits de raffineries (voir également l'article 2.6). Les facteurs d'allocation ont été appliqués aux inventaires issus de GaBi. Les facteurs d'allocation pour le dioxyde de carbone ont été utilisés exclusivement pour le dioxyde de carbone, les facteurs de répartition de l'énergie ont été utilisés pour la consommation en ressources ainsi que pour toutes les autres émissions de dioxyde de carbone, comme présenté dans le tableau.

Tableau 3-8 Calcul des inventaires pour le Diesel et l'essence

	JEC		Facteur d'allocation utilisés dans l'étude		GaBi	Données d'entrée utilisée dans l'étude ADEME	
	Diesel MJ/MJ	Essence MJ/MJ	Diesel	Essence	Moyenne produit MJ/MJ	Diesel [MJ/MJ]	Essence [MJ/MJ]
Energie primaire	0.1	0.08	1.37	1.1	0.07	0.096	0.077
	Diesel [g/MJ]	Essence [g/MJ]	Diesel	Essence	Average product [g/MJ]	Diesel [g/MJ]	Essence [g/MJ]
CO ₂	8.6	7	1.46	1.9	5.3	7.7	6.3
NO _x			1.37	1.1	6.9 E-3	9.4 E-3	7.5E-3
SO ₂			1.37	1.1	2.1 E-2	2.8E-2	2.3E-2
CO			1.37	1.1	5.3 E-3	7.3E-3	5.9E-3

Le tableau suivant présente certaines émissions sélectionnées et la demande d'énergie primaire pour les inventaires du Diesel et de l'essence utilisés dans cette étude.

Tableau 3-9 Emissions sélectionnées et PED du Diesel et de l'essence

	Diesel			Essence		
	Extraction, Traitement, Transport (MJ/MJ ou g/MJ)	Raffinage (MJ/MJ ou g/MJ)	Total (MJ/MJ ou g/MJ)	Extraction, Traitement, Transport (MJ/MJ ou g/MJ)	Raffinage (MJ/MJ ou g/MJ)	Total (MJ/MJ ou g/MJ)
Energie primaire	0.097	0.096	0.193	0.083	0.077	0.160
CO ₂	3.98	7.7	11.72	3.88	6.3	10.19
NO _x	2.0E-2	9.4E-3	2.9E-2	1.9E-2	7.5 E-3	2.7 E-2
SO ₂	3.2E-2	2.8E-2	6E-2	3.1E-2	2.3 E-2	5.4E-2
CO	8.0E-3	7.3E-3	1.5E-2	7.9E-3	5.9 E-3	1.4E-2

Les facteurs d'allocation utilisés pour les inventaires des véhicules essence et Diesel diffèrent de ceux généralement utilisés dans GaBi. Ainsi, des différences significatives, en particulier au niveau des émissions de SO_x, apparaissent. Ces facteurs d'allocation ont uniquement été utilisés pour l'élaboration des inventaires des carburants dans la phase d'usage.

Biocarburants

Les dernières données sur le taux de biocarburants dans l'essence et le gazole d'Eurostat datent de 2009 et indiquent un taux de 4,7% de bioDiesel et 2,3% de bio essence en termes de contenu énergétique des biocarburants. En l'absence de données plus récentes, les objectifs de la directive européenne sur les biocarburants (EC 2003⁴³) sont utilisés pour modéliser le scénario 2012. Selon cette directive, l'essence et le gazole vendus sur le marché pour le transport doivent inclure 5,75% de biocarburants depuis le 31 décembre 2010.

En Europe, le bioDiesel est principalement produit à partir de colza (environ 70%), d'huile de soja et d'huile de palme (7% chacun), d'huile de tournesol (2,4%), d'autres huiles végétales (4%), d'huiles recyclées (6%) et d'autres 3,6% (USDA 2010). Dans cette étude, le bioDiesel utilisé est modélisé en prenant l'hypothèse qu'il est 100% d'origine colza (ester méthylique de colza).

Pour ce qui est du bioéthanol en Europe, il vient principalement de betteraves à sucre et de blé (26%). Pour cette étude, la bioessence est modélisée avec 50% de bioessence issue de betterave à sucre et 50% de bioessence issue de blé. Il est à noter que les données sur les matières premières sont des estimations en raison du fait que très peu de données officielles sont disponibles (USDA 2010).

3.1.5.2 Scénarios 2020

Raffinerie

Pour définir les possibles changements de l'inventaire de cycle de vie d'un carburant conventionnel en 2020, il faut considérer plusieurs aspects qui mettent en évidence l'influence de nombreux paramètres dont la valeur reste incertaine. Les principaux aspects qui peuvent avoir une influence sur l'ICV d'un carburant conventionnel en 2020 sont les suivants :

- ✓ Réduction des émissions suite à l'application de mesures de protection environnementale,
- ✓ Amélioration de l'efficacité énergétique de l'approvisionnement en pétrole brut et du raffinage,
- ✓ Augmentation de la pratique des techniques avancées de récupération de pétrole (enhanced oil recovery) et de la production de pétrole brut non conventionnel,
- ✓ Pourcentage de la production domestique en Europe et origine des importations,
- ✓ Modification du brut,
- ✓ La directive sur la qualité des carburants de 2009 qui indique un objectif de réduction en 2020 de 10% du niveau de GES des carburants mis à consommation,

⁴³ Source : <http://www.ecn.nl/units/ps/themes/renewable-energy/projects/nreap/>

- ✓ Evolution de la demande en produits raffinés (et notamment des volumes respectifs essence/Diesel).

Les mesures de protection de l'environnement pourraient réduire les impacts associés à la production et le transport de pétrole brut. La réduction continue de la ventilation et du torchage du gaz associé, que ce soit par réinjection ou par son utilisation, dans des pays comme la Russie et le Nigeria (Elvidge 2011), pourrait être un facteur clé dans la réduction des gaz à effet de serre du pétrole brut approvisionné en Europe.

L'amélioration de l'efficacité énergétique au sein de la chaîne d'approvisionnement de carburant Diesel et essence et le remplacement de carburant (par exemple, l'utilisation de gaz associé au lieu du Diesel) pourraient conduire à une réduction de la consommation d'énergie et des émissions issues de la combustion. En revanche, une plus grande pratique des techniques avancées de récupération de pétrole (enhanced oil recovery), de l'exploration en eau profonde, ainsi que des forages plus profonds pourraient plus que compenser les gains d'efficacité possibles. De plus, l'augmentation prévue de la part des sables bitumineux va entraîner une augmentation de la consommation d'énergie (AIE 2011).

Un facteur important dans l'inventaire du cycle de vie du Diesel et de l'essence en 2020 est l'évolution du brut des raffineries européennes et l'évolution de la demande. L'origine du pétrole raffiné en Europe peut avoir une grande influence sur le bilan environnemental des carburants.

Différents changements tels qu'une diminution de la production de pétrole domestique en mer du Nord, la hausse des importations de Russie, de la région Caspienne, de l'Afrique et du Moyen-Orient pourraient entraîner une baisse de consommation du pétrole brut léger non sulfuré (Purvin 2009) et demander plus d'efforts pour convertir le pétrole brut dans les produits souhaités.

Dans le même temps, la tendance actuelle est croissante pour les voitures à moteur Diesel et pour le transport aérien ; le transport va modifier plus encore la production de brut en Europe vers une distillation moyenne (Purvin 2011). Les unités de mise à niveau nécessaire (hydrocraquage et coke) vont encore accroître leur demande en énergie pour la production de carburant classique, notamment pour le Diesel. Plus d'informations sur la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre pour la production marginale du Diesel sont données dans l'étude JEC (JEC 2011B). Les perspectives actuelles indiquent une diminution de la Diésélisation à partir d'Euro 6.

Biocarburants

La directive sur les énergies renouvelables (CE 2009) formule un objectif de gain de 10% des émissions de CO₂/MJ sur le cycle de vie des carburants. Une partie viendra des biocarburants. Pour le scénario de 2020, un mélange de 10% de biodiesel pour le Diesel et de 10% de bioéthanol pour l'essence est considéré. Les hypothèses sur les matières premières pour produire ces biocarburants sont les mêmes que dans le scénario de 2012 (hypothèses validées par le sous-comité filières énergétiques).

3.1.6 Électricité

3.1.6.1 Scénarios 2012

Pour une comparaison entre une motorisation thermique et électrique, il est indispensable de réaliser une analyse précise de l'électricité fournie. Bien que le VE n'émette aucun polluant pendant sa phase d'usage, des émissions importantes peuvent avoir lieu pendant la production de l'électricité. Pour comparer différents types de motorisations, les aspects suivants doivent être considérés :

- ✓ Le mix énergétique et la technologie utilisée pour la production d'électricité de la région ou du pays considéré,
- ✓ L'année de référence de la production d'électricité,
- ✓ L'interdépendance entre la charge de la batterie et la production de l'électricité dans le cadre d'un réseau intelligent (smart grid).

L'année de référence du scénario 2012 est l'année 2008. Les données d'ICV pour le scénario 2012 proviennent de la base de données du logiciel GaBi (GaBi 2011).

La Base Carbone est une base nationale de données publiques contenant un ensemble de facteurs d'émissions et données sources. Elle est destinée à la réalisation réglementaire ou volontaire de bilans Gaz à Effet de Serre. Cette base est issue, pour une large partie des données historiques du Bilan Carbone de l'ADEME, et pour une autre partie de données nouvelles ayant pu être publiées au cours des derniers mois.

Dans cette étude, le véhicule électrique étant évalué sur sa durée de vie, il ne semble pas opportun de prendre les valeurs historiques (que ce soit moyenne ou par usage) de la Base Carbone.

En effet, pour le scénario de référence, à l'horizon 2012, la consommation du VE considéré ne peut logiquement pas apparaître en tant que contributeur dans les données historiques de la Base Carbone. En termes de méthodologie, il est donc difficile d'affecter un facteur d'émissions spécifique au VE sur sa durée de vie à venir. Pour ce faire, il nous faudrait des valeurs prospectives des facteurs d'émissions. Ces travaux sont en cours, dans le cadre de la Base Carbone notamment dans son volet Plan d'actions, mais leurs résultats n'étant pas disponibles au moment de la publication de ce rapport. Les informations concernant les mix énergétiques de ces données d'ICV proviennent de l'IEA (International Energy Agency) - *statistics Electricity Information 2010* (IEA 2010) – et sont resumées dans le Tableau 3-10.

Tableau 3-10 Mix énergétique pour l'électricité du scénario 2012

Scénarios 2012	FRA	ALL	GB	ESP	ITA	UE27
Nucléaire	76,5%	23,3%	13,5%	18,8%	0,0%	27,8%
Charbon	4,1%	44,1%	32,2%	15,5%	13,5%	26,6%

Pétrole	1,0%	1,4%	1,6%	5,7%	9,9%	3,1%
Gaz	4,5%	15,2%	45,7%	39,2%	56,0%	24,3%
Biomasse & Déchets	1,0%	4,6%	2,8%	1,3%	2,4%	3,3%
Hydro	11,9%	4,2%	2,4%	8,3%	14,8%	10,6%
Eolien	1,0%	6,4%	1,8%	10,3%	1,5%	3,5%
Solaire	0,0%	0,7%	0,0%	0,8%	0,1%	0,2%
Geothermie et autres	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,7%	0,5%

L'étude des impacts potentiels et des bénéfices environnementaux de l'utilisation du VE dans un réseau intelligent n'est pas prise en compte, tout comme la possibilité de stocker de l'électricité d'origine renouvelable à l'aide des batteries du VE pour l'utiliser en période de pointe. Pour l'horizon 2012, il est considéré que ces options ne sont pas opérationnelles, et que la taille du parc de VE ne justifie pas leur mise en place.

Bouquet « Green Mix »

En plus des mix nationaux moyens, un bouquet « green mix » est également utilisé. Ce mix est modélisé à partir de la part d'énergie renouvelable fournie en Europe en 2012.

Tableau 3-11 "Green mix" européen à l'horizon 2012

Scénarios 2012	Green Mix
Nucléaire	
Charbon	
Pétrole	
Gaz	
Biomasse & Déchets	18,2%
Hydro	58,6%
Eolien	19,3%
Solaire	1,1%
Geothermie et autres	2,8%

Le « green mix » est utilisé en raison des offres « d'électricité verte » qui accompagneront l'intégration du véhicule électrique.

Les facteurs de CO₂ eq de la production d'1 kWh sont présentés ci-dessous pour chaque scénario électrique utilisé. Les autres indicateurs d'impact et flux d'inventaire de la production d'1 kWh sont disponibles en annexes.

	VP elec 2012 FRA	VP elec 2012 UE27	VP elec 2012 ALL	VP elec 2012 GB	VP elec 2012 ESP	VP elec 2012 ITA	VP elec 2012 Green Mix
Potentiel de changement climatique [kg CO ₂ - Equiv.]	1,10E-01	4,89E-01	6,23E-01	4,46E-01	5,86E-01	5,51E-01	1,40E-01

Bouquet japonais

Les scénarii de référence 2012 et 2020 prennent l'hypothèse d'un assemblage des véhicules électriques et thermiques en France et d'une fabrication de la batterie en France. L'étude des variabilités des données d'entrée propose de faire varier le pays de production de la batterie en considérant une fabrication au Japon. Un bouquet électrique Japonais a donc été utilisé afin de modéliser un scénario de fabrication de la batterie. Le bouquet utilisé provient de la dernière version du logiciel GaBi⁴⁴.

Tableau 3-12 Bouquet électrique japonais en 2012

Scenarios 2012	Mix Japon
Nucléaire	23,9%
Charbon	23,7%
Pétrole	12,9%
Gaz	29,1%
Biomasse & Déchets	1,4%
Hydro	7,7%
Eolien	0,5%
Solaire	0,4%
Geothermie et autres	0,4%

3.1.6.2 Scénarios 2020

Pour chaque région ou pays, 2 scénarios ont été calculés : un scénario 2012 et un scénario 2020. Les scénarios 2020 reflètent les changements à venir des mix électriques nationaux et du mix moyen européen liés aux politiques :

⁴⁴ National Greenhouse Gas Inventory Report of Japan
Source : Ministry of Environment, Japan, National Greenhouse Gas Inventory Report of Japan, Onogawa, Japan, 2010

- ✓ de réduction de gaz à effet de serre,
- ✓ de sûreté énergétique,
- ✓ d'électricité d'origine nucléaire,

... en Europe et dans les différents états membres.

Pour les scénarios 2020, les mix énergétiques utilisés proviennent de la Commission Européenne *EU Energy Trends to 2030* (EC 2010)⁴⁵. Pour la France, deux scénarios additionnels sont calculés à partir des informations issues de l'étude « des scénarios prospectifs Energie-Climat-Air à l'horizon 2030 » de la DGEC (DGEC 2011), nommés « AMS Objectif » et « scénario pré-grenelle ». Le scénario « pré-grenelle » est un scénario tendanciel estimant l'évolution de la consommation d'énergie de la France en l'absence des objectifs et mesures décidés lors du Grenelle de l'Environnement. Le scénario avec mesures supplémentaires « AMS Objectif » est un scénario fondé sur la modélisation de l'impact de l'ensemble des mesures décidées à l'été 2010, et des objectifs sectoriels inscrits dans la loi suite au Grenelle de l'environnement. Ce scénario décrit l'évolution du système énergétique français en prenant en compte les objectifs et les mesures réellement décidés, et leurs effets à ce jour.

Les améliorations possibles des rendements et des émissions des centrales électriques ne sont pas prises en compte dans les scénarios 2020. Les installations de stockage de carbone (Carbon Capture Storage, CCS) pour les centrales thermiques au charbon ne sont pas prises en compte non plus pour les scénarios⁴⁶ 2020.

La part d'importation dans les mix nationaux et l'origine de ces importations sont supposées stables. Les fournisseurs des énergéticiens, notamment pour le gaz naturel, le charbon ou le nucléaire, sont inchangés pour les scénarios 2020 par rapport aux scénarios 2008, au regard des technologies d'extraction, de la production locale, des parts d'importation et de leurs origines.

Le tableau ci-dessous décrit les mix électriques des scénarios 2020 utilisés pour calculer les impacts environnementaux potentiels de la production d'électricité. Les mix des scénarios 2020 montrent une grande diversité des filières électriques utilisées dans les différents états membres. Tandis que la France possède une part importante d'électricité nucléaire, les autres pays sont plus diversifiés avec des pourcentages importants pour le charbon, le gaz, puis le nucléaire.

Tableau 3-13 Bouquets électriques des scénarios 2020

Scénario 2020	DGEC 2011		EC 2010					
	FRA (Pré-Grenelle)	FRA (AMS Objectifs)	FRA	ALL	GB	ESP	ITA	UE27
Nucléaire	70,0%	76,0%	74,0%	5,4%	11,2%	16,0%	3,7%	24,5%

⁴⁵ Les scénarios de base sont utilisés

⁴⁶ Jusqu'en 2020, aucune incitation au déploiement de CCS n'est prévue. La Commission Européenne (EC 2010) a prévu que 3% des centrales thermiques au charbon seront équipées d'installation CCS en 2020.

Charbon	5,0%	1,0%	2,1%	41,0%	29,8%	20,4%	15,9%	24,9%
Pétrole	1,0%	0,0%	0,1%	1,9%	1,3%	3,7%	3,7%	1,8%
Gaz	7,0%	1,0%	5,1%	23,5%	32,9%	28,3%	53,9%	22,8%
Biomasse & Déchets	3,0%	2,0%	1,9%	5,6%	4,3%	4,6%	4,2%	5,0%
Hydro	9,0%	11,0%	9,0%	3,5%	1,1%	8,3%	10,4%	8,9%
Eolien	4,0%	8,0%	7,0%	16,1%	18,9%	15,5%	4,9%	10,5%
Solaire	1,0%	1,0%	0,8%	2,8%	0,0%	3,1%	1,6%	1,2%
Geothermie et autres	0,0%	0,0%	0,1%	0,1%	0,5%	0,0%	1,5%	0,3%

Les facteurs en CO₂eq/kWh sont disponibles en annexes pour chaque scénario électrique utilisé.

Pour une meilleure comparaison de l'évolution des bouquets électriques dans le temps, les figures suivantes illustrent les changements entre les scénarios 2012 et 2020 pour chaque pays étudié.

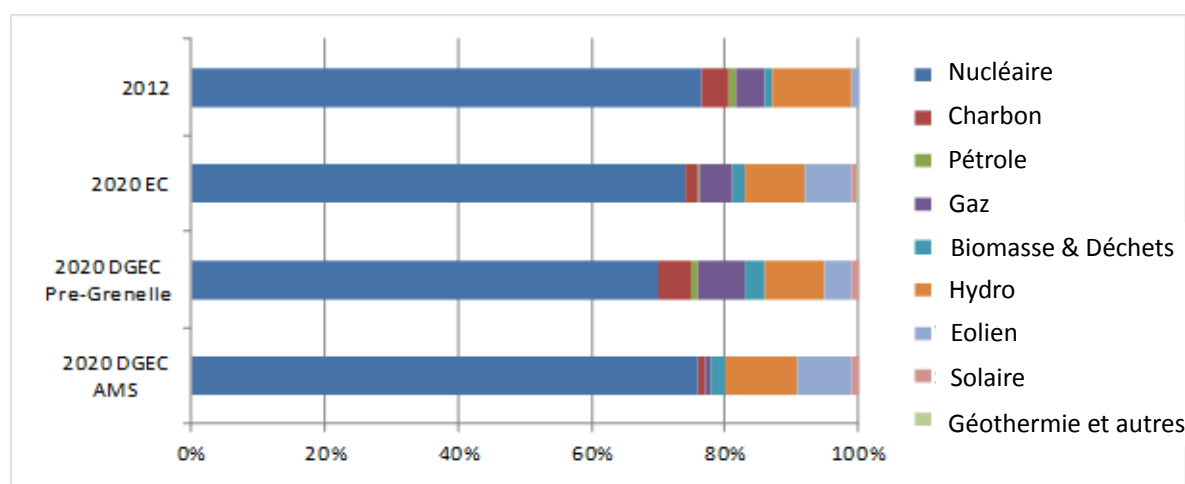


Figure 3-5 Comparaison des bouquets électriques des scénarios 2012 et 2020 en France

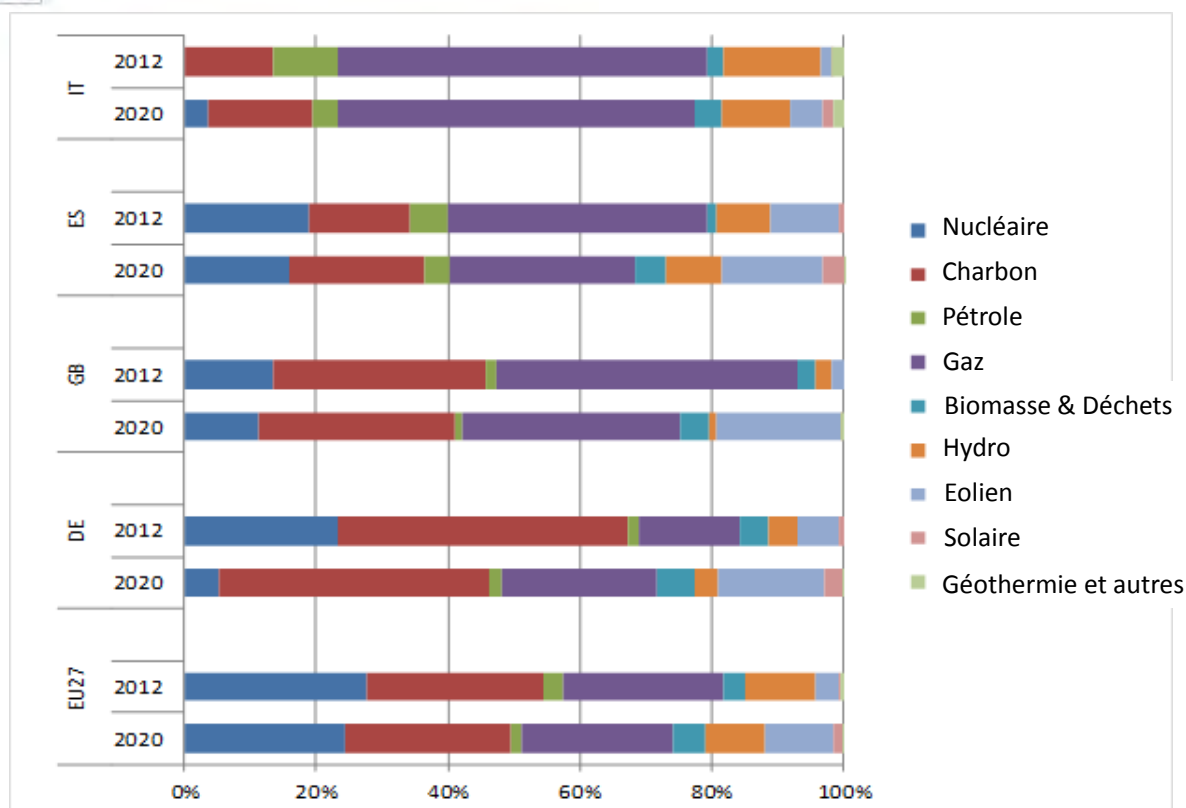


Figure 3-6 Comparaison des bouquets électriques des scénarios 2012 et 2020 en Europe

Les changements entre le scénario français pour 2012 et les 3 scénarios pour 2020 sont légers comparés aux autres pays membres de l'UE. Les principales différences entre les scénarios 2012 et 2020 sont les parts de l'électricité éolienne, du gaz naturel, du charbon et du nucléaire.

Les principaux changements du bouquet italien sont la réduction de la part d'électricité issue de la filière pétrolière de 10% en 2008 à 4% en 2020, et la réintroduction de l'électricité nucléaire⁴⁷. La part d'électricité issue des énergies renouvelables augmentera de 19,5% à 21,7%.

Le scénario 2020 pour l'Espagne montre l'augmentation de la production d'électricité d'origine renouvelable. La part d'énergie renouvelable représente 20% en 2008 et 31% en 2020. La moitié de cette augmentation est imputable aux éoliennes, l'autre moitié à la biomasse et au photovoltaïque. L'utilisation de centrales thermiques au charbon représente 14,5% en 2008 et 20,5% en 2020. L'utilisation de gaz naturel passera de 39% à 28%.

En 2008, 6% de l'électricité britannique est produite à partir d'énergie renouvelable. La majorité de l'électricité provient du gaz naturel (45%) et du charbon (32%). En 2020, la part d'énergie renouvelable devrait représenter 24% du bouquet national. Cette augmentation sera réalisée intégralement à l'aide d'énergie éolienne et est

⁴⁷ Les scénarios 2020 issus de *EU Energy Trends to 2030* (EC 2010) ont été calculés en 2009, avant l'accident nucléaire de Fukushima. En mars 2011, le gouvernement italien a annoncé un moratoire suivi d'un referendum en Juin 2011 contre l'introduction du nucléaire.

nécessaire afin de compenser la diminution de la part du gaz naturel (de 45% en 2008 à 33% en 2020).

Le scénario 2020 pour l'Allemagne indique une augmentation de la part d'énergie renouvelable de 14% en 2008 à 27% en 2020 (principalement de l'énergie éolienne). L'autre politique d'importance en Allemagne est la sortie du nucléaire prévue pour 2022. Ainsi la part d'électricité nucléaire passera de 23% en 2008 à 5,4% en 2020⁴⁸. De plus, la part du charbon diminuera de 44% en 2008 à 40% en 2020. L'électricité générée en 2008 par le nucléaire et le charbon ne sera pas intégralement remplacée par les énergies renouvelables et sera compensée par le gaz naturel (de 15% en 2008 à 23,5% en 2020).

L'évolution du bouquet moyen européen est principalement influencée par le développement des 5 pays membres traités dans cette étude. Ces pays représentent 66% de la production nette d'électricité en Europe en 2008 (IEA 2010). La part d'énergie renouvelable augmentera de 17% en 2008 à 25% en 2020, principalement du fait de l'implantation importante d'éoliennes. Les parts de gaz naturel et de pétrole diminueront de 1,5 points, tout comme la part de charbon (moins 2 points). La part d'énergie nucléaire passera de 27,8% en 2008 à 24,5% en 2020.

A l'horizon 2020, il a été décidé au cours des réunions du comité technique, de se concentrer uniquement sur les 3 scénarios du bouquet électrique français (EC, pré-grenelle et AMS) et sur le bouquet moyen européen. Ces scénarios ont été jugés suffisants par l'ensemble du comité, dans la mesure où d'une part les connexions entre les différents réseaux nationaux seront plus importantes et d'autre part, des bouquets électriques de nombreux pays Européens sont déjà pris en compte pour l'horizon 2012 afin d'analyser les variabilités induites par les mix électriques.

⁴⁸ La part de nucléaire dans le scénario 2020 de *EU Energy Trends to 2030* (EC 2010) est basée sur des décisions de 2000. Entre-temps la durée de vie des centrales nucléaires a été allongée en 2010 puis revue à la baisse en 2011 suite à l'accident de Fukushima.

3.1.7 Utilisation

Pour la phase d'usage, une distance de 150 000 km est prise en compte sur l'ensemble du cycle de vie des véhicules. Différents scénarios ont été calculés afin de modéliser les émissions des VT considérés.

Les scénarios de référence sont basés sur les émissions et les consommations de carburants moyennes des cycles NEDC.

VT à l'horizon 2012

Pour le scénario de référence 2012, les données présentées sur cycle NEDC sont des valeurs d'homologation, fournies par les constructeurs. Les émissions sont présentées dans le Tableau 3-14.

Tableau 3-14 émissions du cycle NEDC en 2012

		VP Diesel Moyenne NEDC	VP Essence Moyenne NEDC	VUL Diesel Moyenne NEDC	VUL Essence Moyenne NEDC
CO	g/km	0,3	0,29	0,20	0,44
CO2	g/km	106,5	135,5	138	172
HC	g/km	0,06	0,06	0,054	0,05
FC	l/100km	4,0	5,7	5,2	7,3
NOx	g/km	0,14	0,03	0,213	0,092
PM	Ppm	0,001	0	0,0	0,0005

Un scénario utilisant les émissions pour les cycles de conduite moyens issus de l'outil Handbook Emission Factors for Road Transport (HBEFA) 3.1⁴⁹ a également été considéré. Le Tableau 3-145 montre ces émissions. Les consommations de carburants sont dans les mêmes ordres de grandeur que ceux du cycle NEDC, cependant les résultats pour les émissions de CO et de NOx varient significativement.

Tableau 3-15 émissions du cycle HBEFA Euro 5

		VP Diesel HBEFA sans démarrage à froid	VP Essence HBEFA sans démarrage à froid	VUL Diesel HBEFA sans démarrage à froid	VUL Essence HBEFA sans démarrage à froid
		Moyenne Diesel <1,4l et Diesel 1,4l-2l EU5	Essence <1,4l EU5	Diesel 1,4l<2l EU5	Essence 1,4l<2l EU5
CO	g/km	0,02	0,56	0,02	0,56
CO2	g/km	118	136	135	164
HC	g/km	0,01	0,007	0,01	0,007
FC	l/100km	4,4	5,7	5,1	7,0
NOx	g/km	0,53	0,056	0,53	0,056
PM	Ppm	0,001	0,002	0,001	0,002

VT à l'horizon 2020

Pour le scénario de référence à l'horizon 2020, il est impossible d'obtenir les émissions NEDC, dans la mesure où les véhicules ne sont pas encore produits.

⁴⁹ IFEU, Novembre 2009

Cependant, la réglementation européenne sur les émissions de CO₂ à l'horizon 2020 impose aux constructeurs des véhicules considérés de réduire la consommation de carburant de 20%⁵⁰. Ces 20% ont été utilisés pour estimer la consommation de carburants à l'horizon 2020 sur cycle NEDC. Les émissions sur cycle NEDC du scénario de référence 2020, estimés à partir des cycles HBEFA Euro 5 et Euro 6, sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 3-166 Emissions – scénarios 2020

		VP Diesel NEDC	VP Essence NEDC	VUL Diesel NEDC	VUL Essence NEDC
CO	g/km	0,43	0,23	0,29	0,35
CO ₂	g/km	85	108	110	138
HC	g/km	0,05	0,052	0,05	0,05
FC	l/100km	3,2	4,6	4,2	5,8
NO _x	g/km	0,05	0,03	0,074	0,085
PM	ppm	0,001	0	0,001	0

Un scénario utilisant les émissions pour les cycles de conduite HBEFA Euro 6 a également été considéré. L'entrée en vigueur de la norme Euro 6 est programmée pour 2014. Il est supposé que la tendance du downsizing du moteur va continuer dans un futur proche et se propager de plus en plus pour les véhicules du segment B. Pour les scénarios 2020, il est supposé que les véhicules considérés seront équipés d'un moteur dont la cylindrée ne dépassera pas 1,4L et se situeront ainsi tous dans les plus petites classes utilisées dans HBEFA. Le tableau suivant montre les profils d'émissions pris en compte pour les scénarios 2020 HBEFA.

Tableau 3-177 Emissions du cycle HBEFA Euro 6

		Diesel HBEFA sans démarrage à froid	Essence HBEFA sans démarrage à froid
CO	g/km	0,03	0,44
CO ₂	g/km	100	131
HC	g/km	0,009	0,006
FC	l/100km	3,8	4,9
NO _x	g/km	0,18	0,05
PM	ppm	0,001	0,002

. VE à l'horizon 2012

Pour les VE, les consommations sont présentées dans le Tableau 3-18 pour 2012, elles sont issues d'une moyenne des véhicules considérés (transmis par les constructeurs).

⁵⁰ CAFE Europe 160g/km en 2000, 135 en 2010; cible 95g/km en 2020

Tableau 3-18 Consommations d'électricité des VE à l'horizon 2012

		VP électrique	VUL électrique
Electricité	kWh/100km	14,25	15,5

VE à l'horizon 2020

Pour 2020, les consommations électriques suivantes ont été estimées.

Tableau 3-19 Consommations d'électricité des VE à l'horizon 2020

		VP électrique	VUL électrique
Electricité	kWh/100km	13,8	14,55

La diminution de la consommation électrique entre les scénarios 2012 et 2020 est moins importante que la réduction de consommation prise en compte pour les VT. Ceci peut s'expliquer par le rendement élevé du système de propulsion électrique en général. D'autre part, il n'existe pas de tendance claire pour la réduction de la consommation électrique des VE, si ce n'est celle due à l'allègement des véhicules et à la réduction des frottements (identifiés par les constructeurs).

3.1.8 Consommation des auxiliaires

3.1.8.1 Chauffage

Tous les véhicules du segment B sont équipés d'un système de chauffage. Dans un véhicule essence ou diesel, cette chaleur peut être obtenue à partir du surplus de chaleur des moteurs et n'augmente pas nécessairement la consommation en carburant⁵¹. Cependant, pour les véhicules électriques, cette chaleur doit être fournie électriquement et a donc une influence directe sur la consommation d'énergie.

La demande en énergie pour le chauffage du véhicule a été estimée à 4kW en 2012. Cette valeur correspond à une valeur maximale, en effet, il existe déjà sur le marché des VE équipé de pompe à chaleur permettant de réduire la puissance nécessaire au chauffage du véhicule. Ces systèmes ne sont pas monnaie courante à l'heure actuelle, mais le seront probablement à l'horizon 2020. Ainsi, l'hypothèse est faite dans le scénario 2020 que cette valeur soit égale à 2kW.

De ces valeurs, la consommation additionnelle d'énergie peut être calculée, en se basant sur le cycle NEDC :

$$W_{el} = P_{el} * \frac{t_{NEDC}}{d_{NEDC}}$$

⁵¹ Le rendement "Carnot" des moteurs à combustion interne utilisés pour la propulsion des VT en ville atteint difficilement 25 ou 30%. Pour un moteur fournissant 20kW mécaniques il reste donc au moins une cinquantaine de kW thermiques dont un dixième peut être récupéré pour chauffer l'habitacle. Ce grand excès de calories "gratuites" n'a absolument pas favorisé la construction d'habitacles isolés thermiquement.

Avec

Wel l'énergie consommée sur le cycle NEDC,
Pel, la puissance électrique du chauffage,
t(NEDC) le temps de parcours du cycle NEDC,
d(NEDC) la distance de parcours du cycle NEDC.

Il en résulte que la consommation additionnelle d'électricité pour 2012 est de 0,12 kWh/km et de 0,06 kWh/km pour 2020.

Il est supposé que le chauffage est utilisé 10% du temps sur l'ensemble du cycle de vie du véhicule (donnée fournie par les constructeurs) soit sur 15 000 km. Dans ce cas, la surconsommation liée au chauffage en 2012 sur l'ensemble du cycle de vie du VE représente 1818 kWh et 909 kWh en 2020.

3.1.8.2 Climatisation

Le système d'air conditionné n'est pas forcément présent dans tous les véhicules actuellement en circulation. Comme 90% des véhicules du segment B en sont équipés, il est nécessaire de modéliser un scénario prenant en compte la climatisation. Contrairement au chauffage, la surconsommation liée à la climatisation intervient également pour le véhicule thermique.

D'après les informations récoltées auprès des constructeurs, la puissance du système de climatisation à l'horizon 2012 est de 0,5 kW et de 0,4 kW à l'horizon 2020. En utilisant le calcul présenté ci-dessus, la consommation additionnelle s'élève à 0,015 kWh/km en 2012 et 0,012 kWh/km en 2020.

Il est supposé que la climatisation est utilisée 25% du temps sur l'ensemble du cycle de vie, notamment en raison de l'utilisation des climatisations automatiques et de la fonction de désembuage, soit 37 500 km. Dans ce cas, la surconsommation liée à la climatisation sur l'ensemble du cycle de vie des véhicules thermiques ou électriques représente 568 kWh en 2012 et 465 kWh en 2020.

Pour les VT, il est nécessaire de traduire ce surplus énergétique en consommation de carburant. Il est considéré que le facteur énergétique du Diesel est de 0,264 l/kWh et celui de l'essence de 0,273 l/kWh. Ces données sont utilisées aux horizons 2012 et 2020. La surconsommation liée à la climatisation entraînera ainsi une consommation supplémentaire de carburant équivalente à 149L pour le VT Diesel et 154L pour le VT essence en 2012 et 119L pour le VT Diesel et 123L pour le VT essence en 2020.

3.1.9 Fin de vie

La fin de vie selon la méthode des impacts évités est utilisée uniquement en tant que scénario et n'est donc pas considérée dans le scénario de base. Cette étape prend en considération :

- ✓ Les impacts environnementaux de la phase de recyclage,
- ✓ Les impacts évités par la matière recyclée.

L'évaluation de la fin de vie est basée sur la composition matière des véhicules. Au total, six scénarios ont été réalisés :

- ✓ VP Fin de Vie 2012,
- ✓ VP Fin de Vie 2020,
- ✓ VUL Fin de Vie 2012,
- ✓ VUL Fin de Vie 2020,
- ✓ Batterie Fin de Vie 2012,
- ✓ Batterie Fin de Vie 2020.

La composition matière des véhicules dans chaque segment est assez similaire. Les véhicules électriques présentent généralement une plus petite quantité d'acier et de fer pour la caisse assemblée peinte qu'un véhicule conventionnel entièrement équipé. Afin de limiter le nombre de scénarios, un modèle moyen de fin de vie a été réalisé pour chaque classe de véhicule.

Pour la fin de vie à l'horizon 2012 et 2020, les hypothèses suivantes ont été faites selon les valeurs fournies par les constructeurs au regard des objectifs fixés à l'horizon 2015 par la Directive VHU (voir Chapitre **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Les modèles de fin de vie utilisés pour les véhicules VP, VUL et la batterie sont présentés en annexes.

Les batteries des véhicules électriques sont prises en compte séparément.

La fin de vie est basée sur la composition matière des véhicules moyens étudiés. Les matériaux sont regroupés par catégorie : acier et métaux, aluminium et alliages légers, cuivre et métaux lourds, fluides, verre, plastiques et autres matériaux.

Acier

L'acier et les métaux ferreux regroupent les tôles et les pièces de fonderie du véhicule. Généralement, une distinction est faite entre l'acier inoxydable et l'acier au carbone. Dans le cadre de l'étude, ils ont été traité ensemble étant donné que le procédé de recyclage (fournaise électrique) est comparable et que l'acier inoxydable est limité au pot d'échappement.

Dans la production d'acier, les scories sont généralement utilisées pour contrôler la température des hauts-fourneaux ou en tant que matière secondaire dans la fournaise électrique (acier de seconde fonte). Ces scories sont déduites de la quantité d'acier disponible avant de calculer les crédits de recyclage en boucle fermée. C'est pourquoi, la quantité de scories disponible en fin de vie (588 kg pour le VP et 693 pour le VUL) est inférieure à la quantité disponible pour la composition matière (683 kg pour le VP et 882 kg pour le VUL). L'acier restant est mis dans la fournaise électrique pour le recyclage et le crédit est calculé (production secondaire moins production primaire). Comme des scories sont incorporées dans les hauts-fourneaux, cette quantité doit être connectée à l'inventaire de l'acier primaire.

Aluminium et alliages légers

Pour l'aluminium, la même approche a été utilisée. Une part significative de l'aluminium utilisé dans les véhicules aujourd'hui est de l'aluminium secondaire

(souvent des pièces de fonderie provenant du bloc moteur ou le carter de la boîte de vitesse). La quantité d'aluminium réellement recyclée est petite (22 kg d'aluminium part au recyclage contre 63 kg utilise dans la VP).

Cuivre et plomb

Pour le cuivre, aucune information moyenne sur le contenu recyclé n'était disponible. Du cuivre primaire est utilisé pour la production des véhicules. Il a été considéré que l'intégralité du cuivre utilisé est recyclée et bénéficie donc d'un crédit.

Hormis le plomb, il n'y a pas d'autre métaux lourds dans les bilans masse/matière fournis par les constructeurs. Le recyclage du plomb a été traité de la même façon que le recyclage de l'aluminium.

Fluides

Diesel et essence représentent la plus grosse part des fluides présents dans un véhicule (sauf VE). Ces fluides sont utilisés en tant que carburants dans les cimenteries ou dans les incinérateurs. Un crédit Diesel leurs a été attribué.

Verre

Le verre est généralement recyclé en container, un crédit lui est attribué.

Plastiques

Les plastiques sont soit recyclés, soit incinérés. Pour le recyclage des plastiques, un crédit de polypropylène est attribué. Pour l'incinération des plastiques un crédit d'électricité française et de production de vapeur est attribué

Autres matériaux

Les autres matériaux, notamment des minéraux et de l'électronique sont mis en décharge.

Pour le scénario 2020, l'aluminium est recyclé car le modèle 2020 comprend 188 kg d'aluminium primaire, auxquels un crédit d'aluminium est accordé.

Concernant les batteries, leur recyclage est une obligation de la Réglementation Européenne (objectif de taux de recyclage à atteindre). Dans cette étude, aucune donnée sur la fin de vie des batteries n'a été recueillie.

Le recyclage des batteries vise cependant à récupérer des métaux de la cathode de la batterie, comme du cobalt, du nickel et du manganèse. Dans les procédés pyrométallurgiques, les pertes sont généralement très faibles, et plus de 90% des métaux peuvent être réutilisés, cette hypothèse est validée par le comité technique. Il est estimé que 30% des impacts évités (négatifs) se retrouve en impact du recyclage (positifs), cette hypothèse est également validée par le comité technique.

Un comparatif des deux technologies de recyclage a été réalisé lors de l'étude "2ème vie des batteries de véhicule électrique".⁵².

⁵² Rapport disponible au lien suivant :

<http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?cid=96&m=3&id=79604&p1=00&p2=05&ref=17597>

4. Evaluation des impacts potentiels et analyse

4.1 Scénario de référence

4.1.1 VP 2012

Le scénario de référence regroupe les hypothèses suivantes :

- ✓ Assemblage des véhicules électriques et thermiques en France,
- ✓ Fabrication de la batterie en France,
- ✓ Batterie Li-Ion NMC de 24 kWh
- ✓ Consommations et émissions d'usage mesurées sur le cycle de conduite NEDC,
- ✓ Utilisation en France (pour le VE, un mix électrique moyen est utilisé),
- ✓ La durée de vie de la batterie est identique à la durée de vie du véhicule (150 000 km sur 10 ans),
- ✓ La méthode des stocks est utilisée pour modéliser la fin de vie (voir Chapitre 2.5.3.1).

Les graphiques suivants présentent la comparaison entre un VE et deux VT (essence et Diesel) pour différents indicateurs d'impact potentiel en 2012. Un tableau présentant les valeurs de chaque indicateur d'impact potentiel est présenté en annexes. L'étape du cycle de vie « Electricité » dans les graphiques suivants correspond à la production et à la distribution d'électricité nécessaire à la charge des VE.

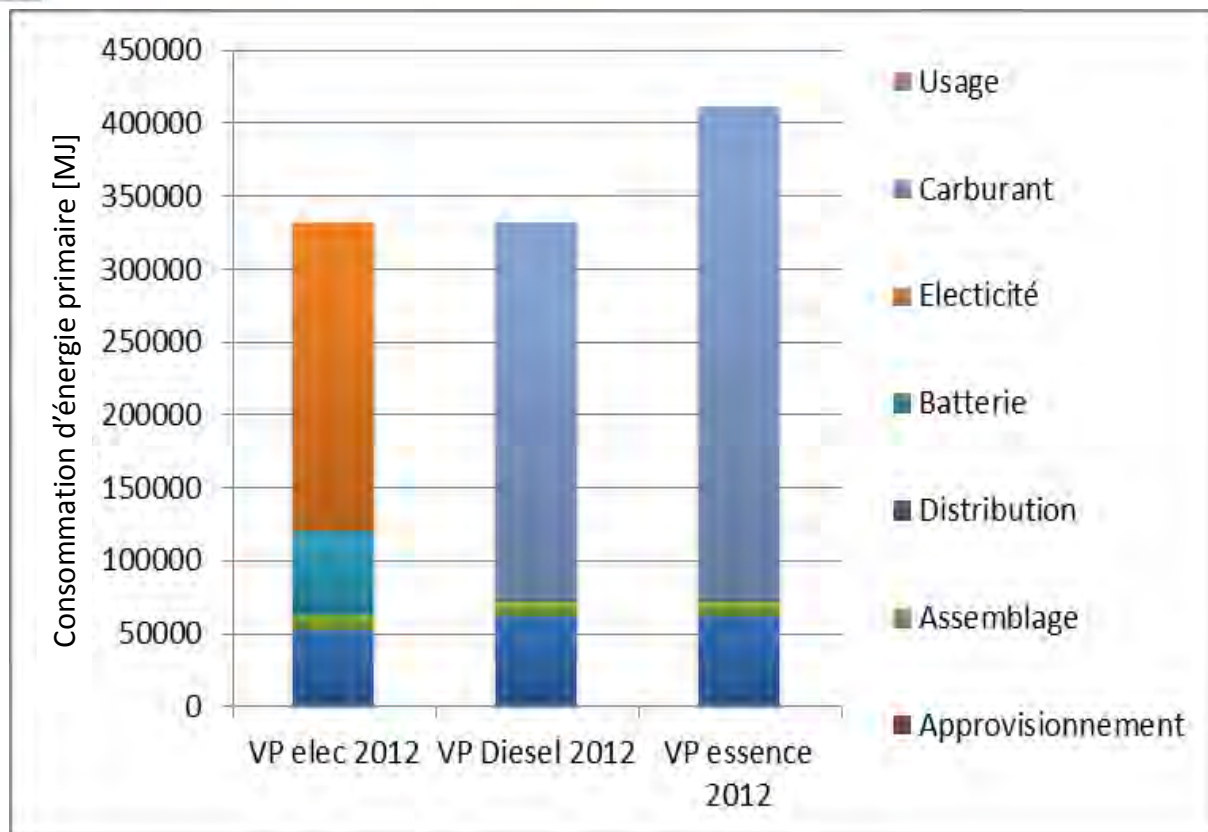


Figure 4-1 Contribution à la consommation d'énergie primaire des différentes étapes du cycle de vie des véhicules particulier électrique, Diesel et essence à l'horizon 2012.

La consommation d'énergie primaire totale est proche pour le VE et les VT (le véhicule essence affiche une consommation d'énergie primaire plus importante par rapport au véhicule Diesel en raison de sa consommation de carburant plus importante). La consommation d'énergie primaire totale du VE provient majoritairement de l'électricité utilisée en phase d'usage et de la fabrication des composants et de la batterie, tandis que celle des VT provient principalement de l'élaboration du carburant et dans une moindre mesure de la fabrication des composants.

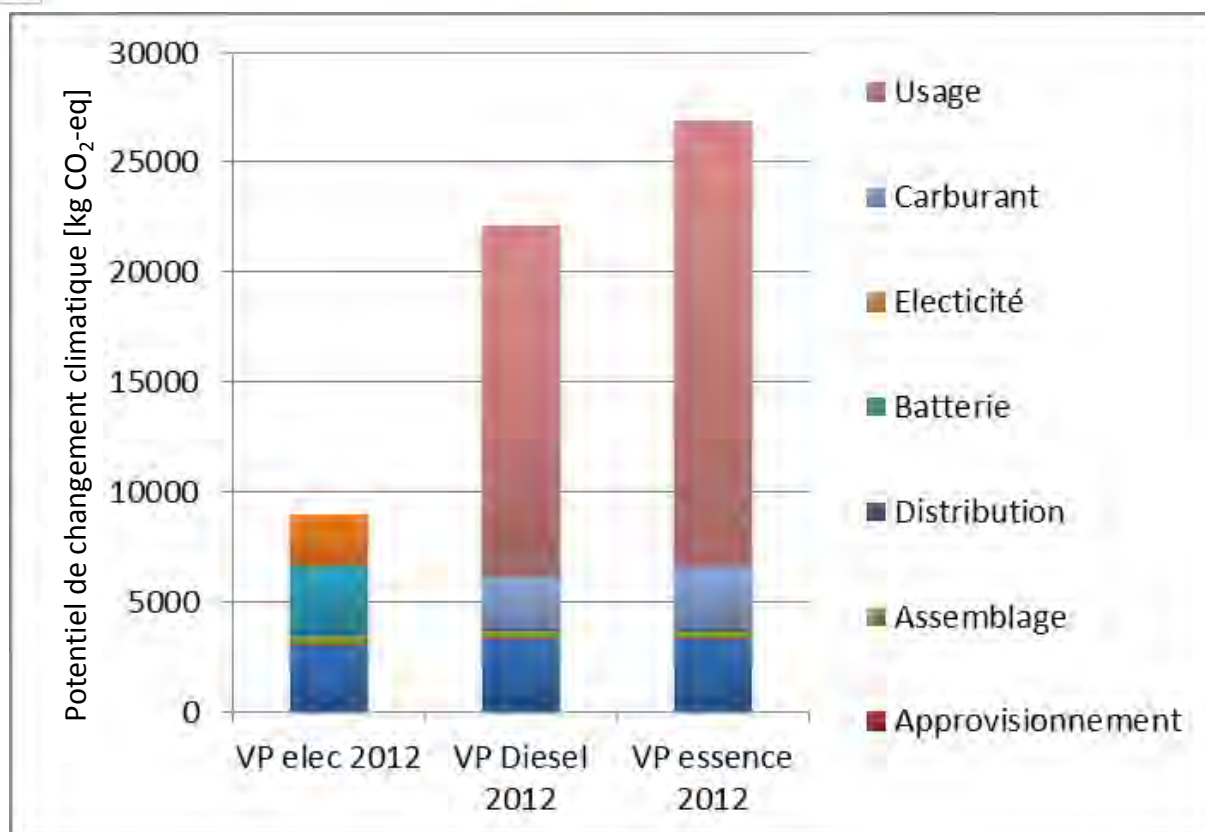


Figure 4-2 Contribution au potentiel de changement climatique des différentes étapes du cycle de vie des véhicules particuliers électrique, Diesel et essence à l'horizon 2012.

Les VT affichent un potentiel de changement climatique fort en raison de leurs émissions de CO₂ en phase d'usage. Le véhicule essence émettant plus de CO₂ que le véhicule Diesel sur une même distance affiche de ce fait un potentiel de changement climatique supérieur à celui-ci. Le VE affiche un bilan bien inférieur au VT sur cet indicateur, en raison de l'origine nucléaire du bouquet électrique français, peu carboné. De ce fait la contribution au potentiel de changement climatique de la fabrication des composants et de la batterie est relativement plus importante que celle de la phase d'utilisation sur le cycle de vie du VE.

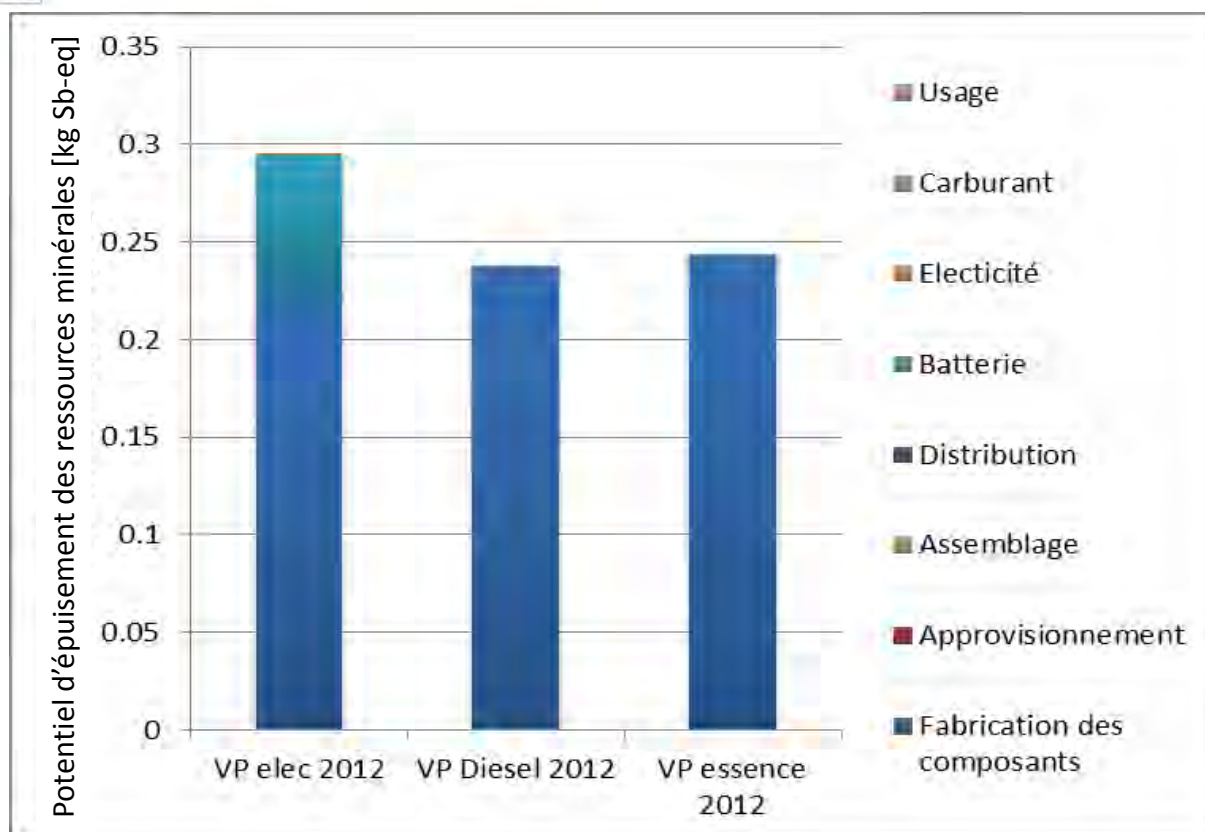


Figure 4-3 Contribution au potentiel d'épuisement des ressources minérales des différentes étapes du cycle de vie des véhicules particuliers électrique, Diesel à l'horizon 2012.

L'origine du potentiel d'épuisement des ressources minérales provient exclusivement de la fabrication des composants (et de la batterie pour le VE). On remarque que le VE possède une contribution plus importante sur cet indicateur en raison de la production de la batterie. Les métaux utilisés pour produire la masse active de la cathode (cobalt et nickel) contribuent fortement au potentiel d'épuisement des ressources minérales mais seront raffinés et réutilisés après le recyclage de la batterie (obligatoire en Europe). L'indicateur du potentiel d'épuisement des ressources minérales ne prend pas en compte l'Uranium nécessaire à la production d'énergie nucléaire. D'autres méthodologies de cet indicateur potentiel (ReCiPe par exemple) ⁵³ existent mais ne permettent pas d'identifier l'impact de l'épuisement de cette ressource. De ce fait, l'énergie nucléaire lors de la phase d'utilisation ne contribue pas à cet indicateur. Les indicateurs d'impact utilisés dans cette étude sont issus de méthodes reconnues et couramment utilisées. Néanmoins, il nous a semblé intéressant d'appliquer en parallèle une méthode d'évaluation de l'impact plus récente telle que la méthode ReCiPe qui présente des valeurs actualisées pour plusieurs catégories d'impact et en particulier pour le facteur Uranium. Une vérification a donc été effectuée en utilisant le facteur Uranium disponible pour le potentiel d'épuisement en métal de la méthodologie ReCiPe. La phase d'utilisation contribue alors de 0.8 à 1,2%.

⁵³ L'Analyse du Cycle de Vie est un outil méthodologique utilisé pour l'analyse quantitative du cycle de vie des produits / activités. Les normes ISO 14040 et 14044 offrent un cadre générique. Après que l'objectif et le périmètre de l'étude aient été déterminés, et que les données aient été collectées, un résultat d'inventaire est calculé. L'interprétation de ce résultat d'inventaire est difficile. Une procédure d'arbitrage, telles que la méthodologie ReCiPe permet d'aider cette interprétation.

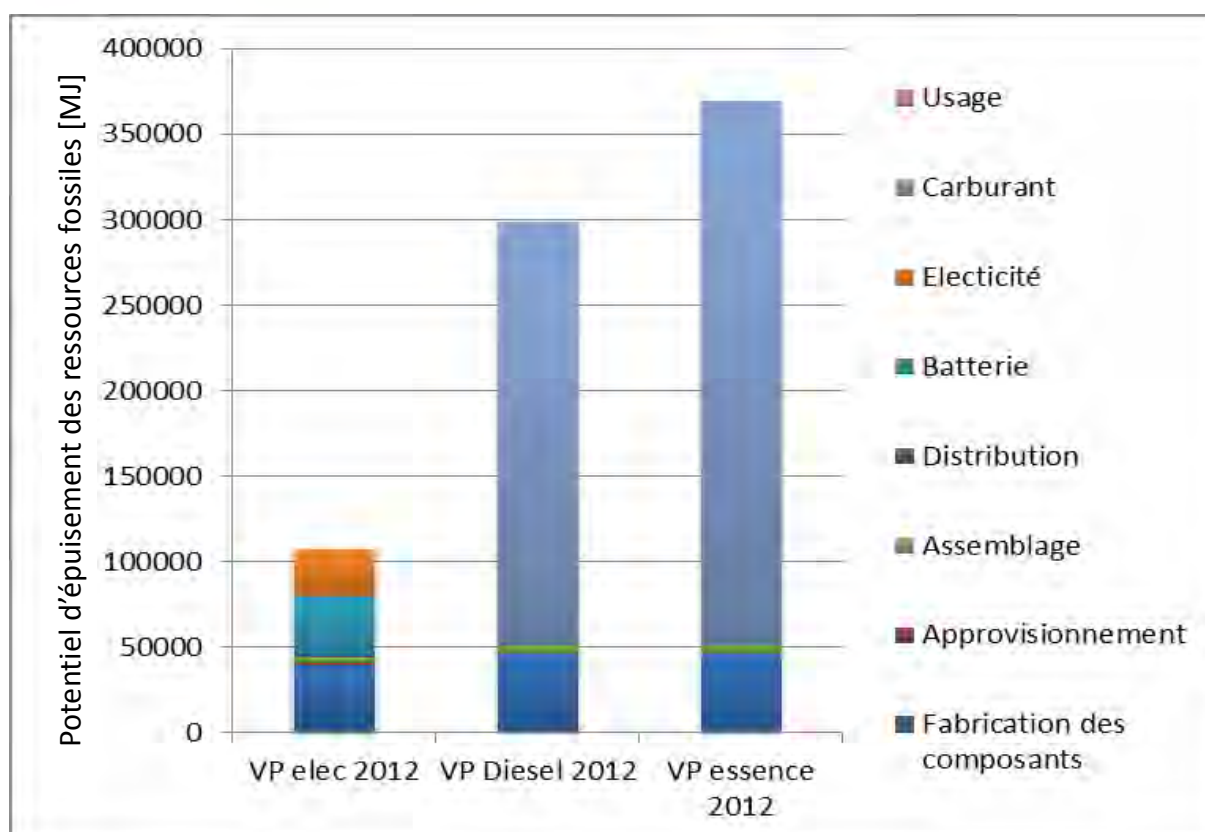


Figure 4-4 Contribution au potentiel d'épuisement des ressources fossiles des différentes étapes du cycle de vie des véhicules particuliers électrique, Diesel et essence à l'horizon 2012.

Les VT ont un potentiel d'épuisement des ressources fossiles beaucoup plus important que celui du VE, en raison du brut extrait pour l'élaboration du carburant et de l'origine de l'électricité utilisée (principalement nucléaire en France). Pour le VE la contribution au potentiel ADP fossile de la batterie est aussi importante que celle de la fabrication des composants.

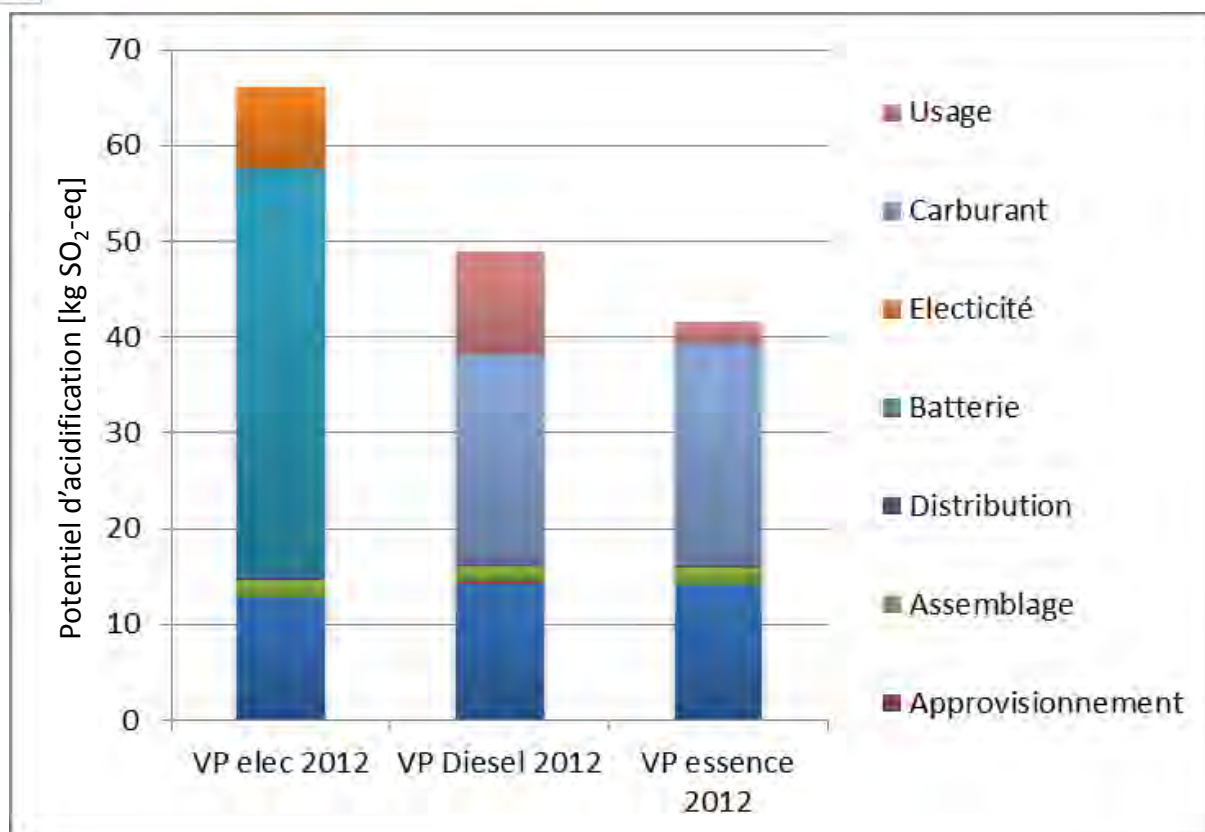


Figure 4-5 Contribution au potentiel d'acidification des différentes étapes du cycle de vie des véhicules particuliers électrique, Diesel et essence à l'horizon 2012.

Le potentiel d'acidification du VE est plus important que celui des VT. On remarque que la production d'électricité et surtout la fabrication de la batterie ont une contribution majeure sur cet indicateur. Les émissions de SO₂ pendant la phase d'extraction des métaux nécessaires à l'élaboration de la batterie expliquent ce résultat. Pour les VT, le potentiel d'acidification vient principalement des émissions de raffinerie (SO₂ et NO_x) et des émissions de NO_x en phase d'usage. Les véhicules Diesel émettent plus de NO_x que les véhicules essence ce qui explique la différence entre les 2 scénarios.

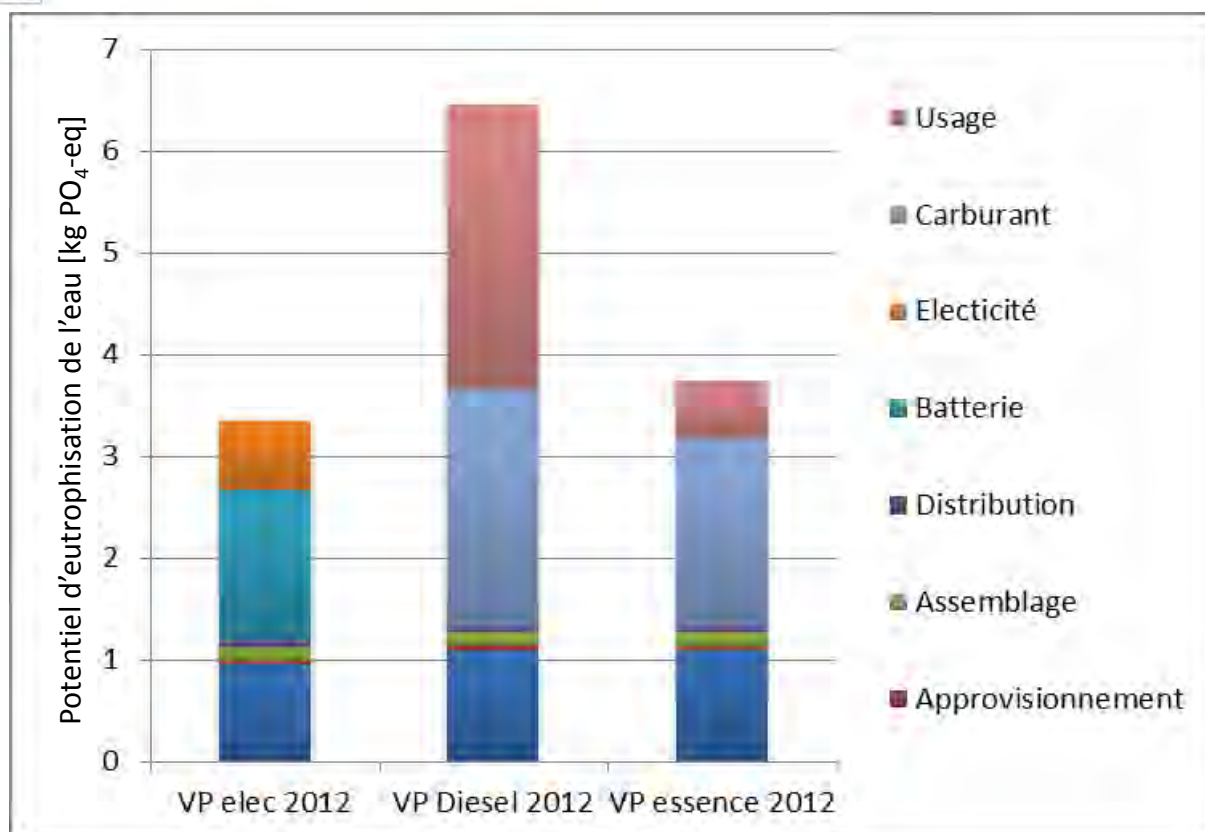


Figure 4-6 Contribution au potentiel d'eutrophisation des différentes étapes du cycle de vie des véhicules particuliers électrique, Diesel et essence à l'horizon 2012.

Le potentiel d'eutrophisation (EP) est lié en partie aux émissions de NO_x. Ainsi le véhicule Diesel présente un potentiel d'eutrophisation plus important que le véhicule essence en raison de ses émissions de NO_x plus important en phase d'usage. La batterie du VE contribue fortement au potentiel d'eutrophisation en raison des émissions de NO_x en phase d'extraction des métaux. Le bilan du VE pour cet indicateur reste cependant inférieur à ceux des VT.

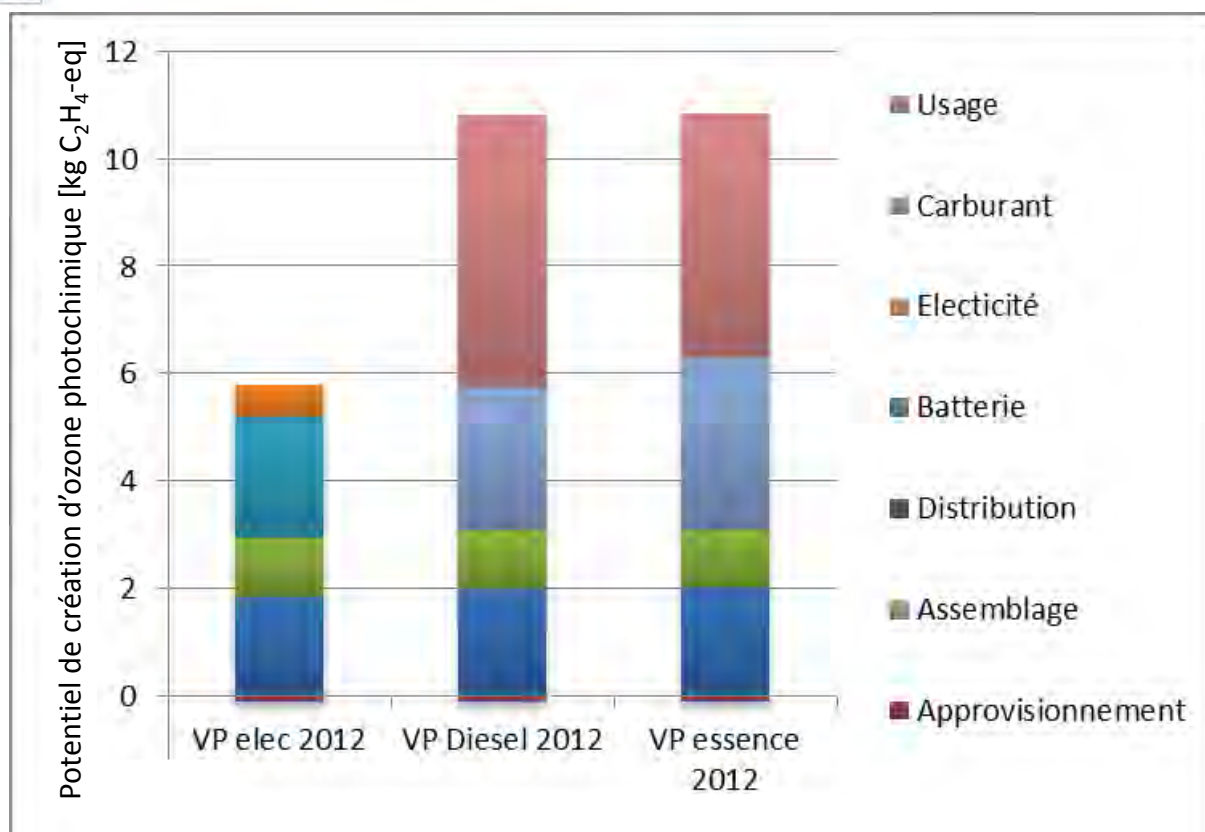


Figure 4-7 Contribution au potentiel de création d'ozone photochimique des différentes étapes du cycle de vie des véhicules particuliers électrique, Diesel et essence à l'horizon 2012.

Pour les VT, le potentiel de création d'ozone photochimique provient majoritairement des émissions de NOx et de COV en phase d'usage, d'élaboration du carburant et de fabrication des composants. Les émissions de COV sur le site d'assemblage des véhicules contribuent également au potentiel de création d'ozone photochimique. Le VE affiche un bilan inférieur aux VT sur cet indicateur.

Les graphiques suivants présentent la comparaison entre un VE et deux VT (essence et diesel) pour différents flux d'inventaire en 2012. Pour chaque flux d'inventaire, la contribution des différentes étapes du cycle de vie est affichée. Les valeurs de chaque flux d'inventaire sont présentées sur chaque colonne correspondante et sont détaillées en annexes.

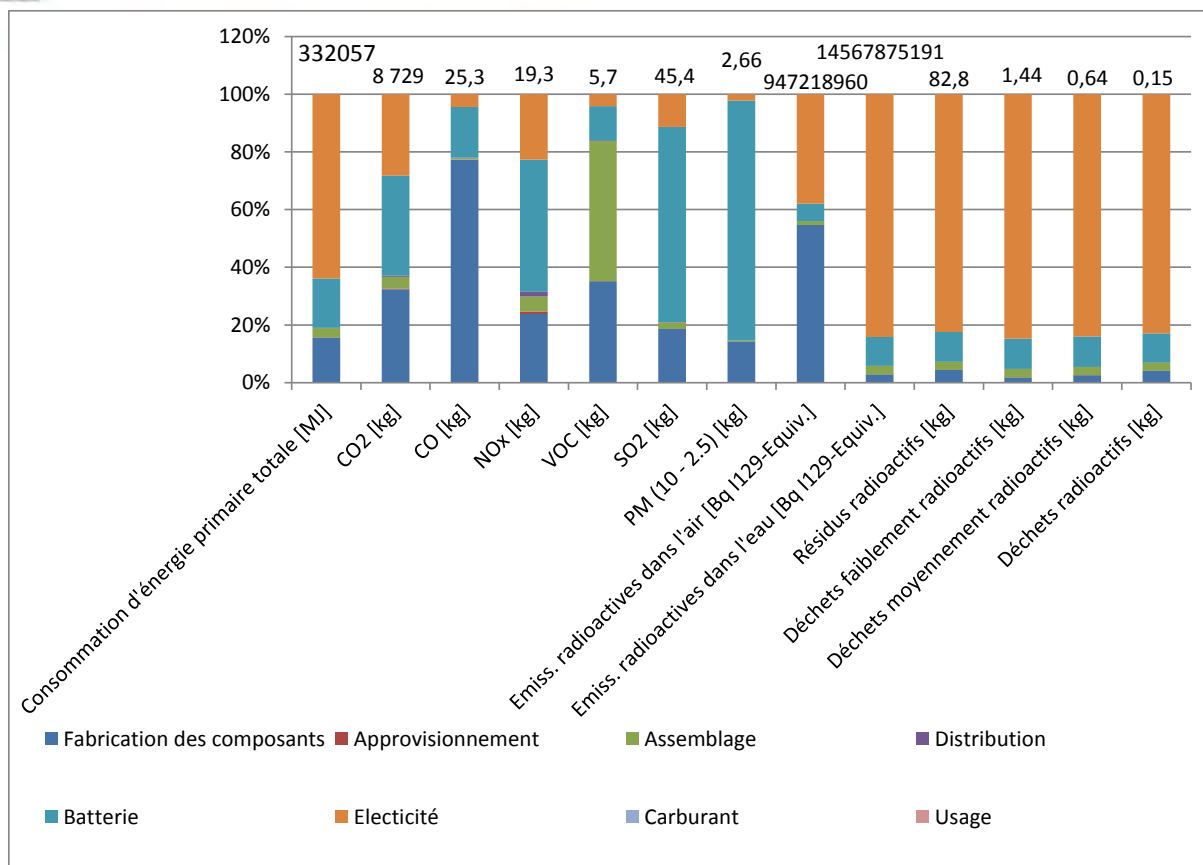


Figure 4-8 Contribution des différentes étapes du cycle de vie du véhicule particulier électrique aux différents flux d'inventaire à l'horizon 2012.

Pour le VE, les principaux polluants atmosphériques sont émis pendant les phases de fabrications des composants, de fabrication de la batterie et dans une moindre mesure d'assemblage du véhicule (émissions de COV importantes à cette étape). L'ensemble des flux radioactifs est dominé par la phase de production de l'électricité en raison de la filière nucléaire très présente dans le bouquet électrique français.

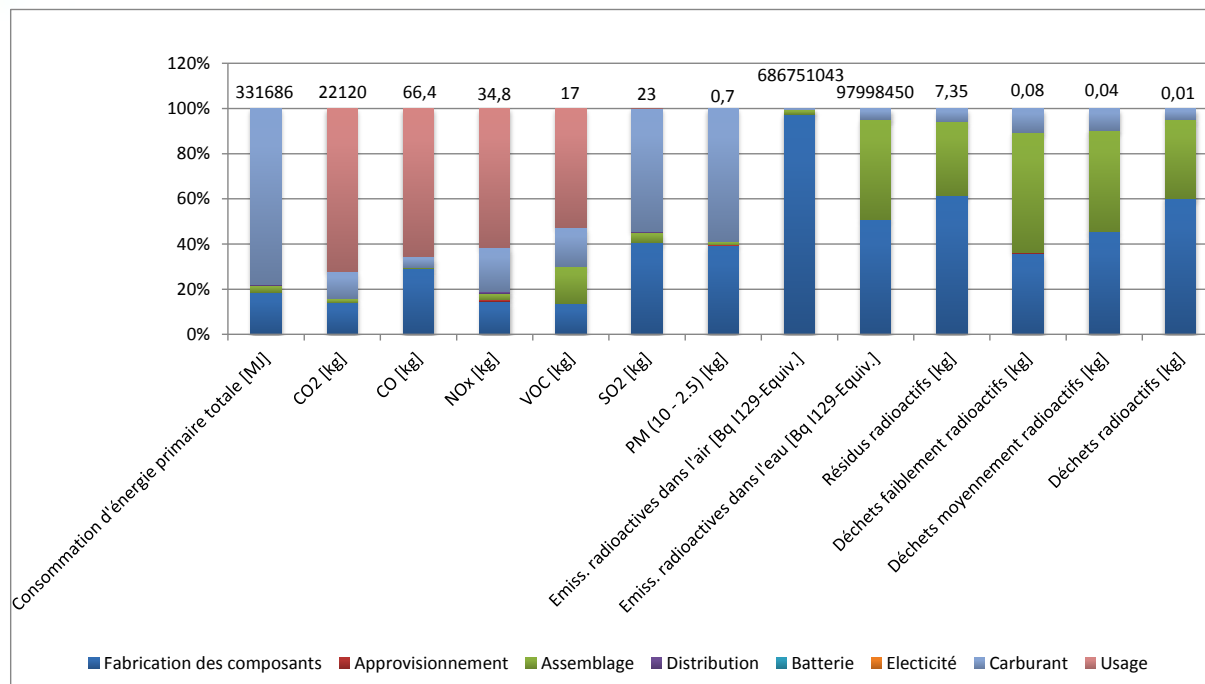


Figure 4-9 Contribution des différentes étapes du cycle de vie du véhicule particulier Diesel aux différents flux d'inventaire à l'horizon 2012.

Pour le véhicule Diesel, les principaux polluants atmosphériques sont émis pendant les phases d'usage (CO, NOx, COV) et d'élaboration du carburant (SO2, PM 10-2,5) et dans une moindre mesure d'assemblage du véhicule (émissions de COV importantes à cette étape). L'ensemble des flux radioactifs est dominé par les phases de fabrication des composants et d'assemblage du véhicule en raison de l'électricité française utilisée sur le site d'assemblage.

Les graphiques suivants présentent les flux d'inventaire sur l'ensemble du cycle de vie de chaque véhicule à l'horizon 2012. Les tableaux récapitulatifs sont disponibles en annexes.

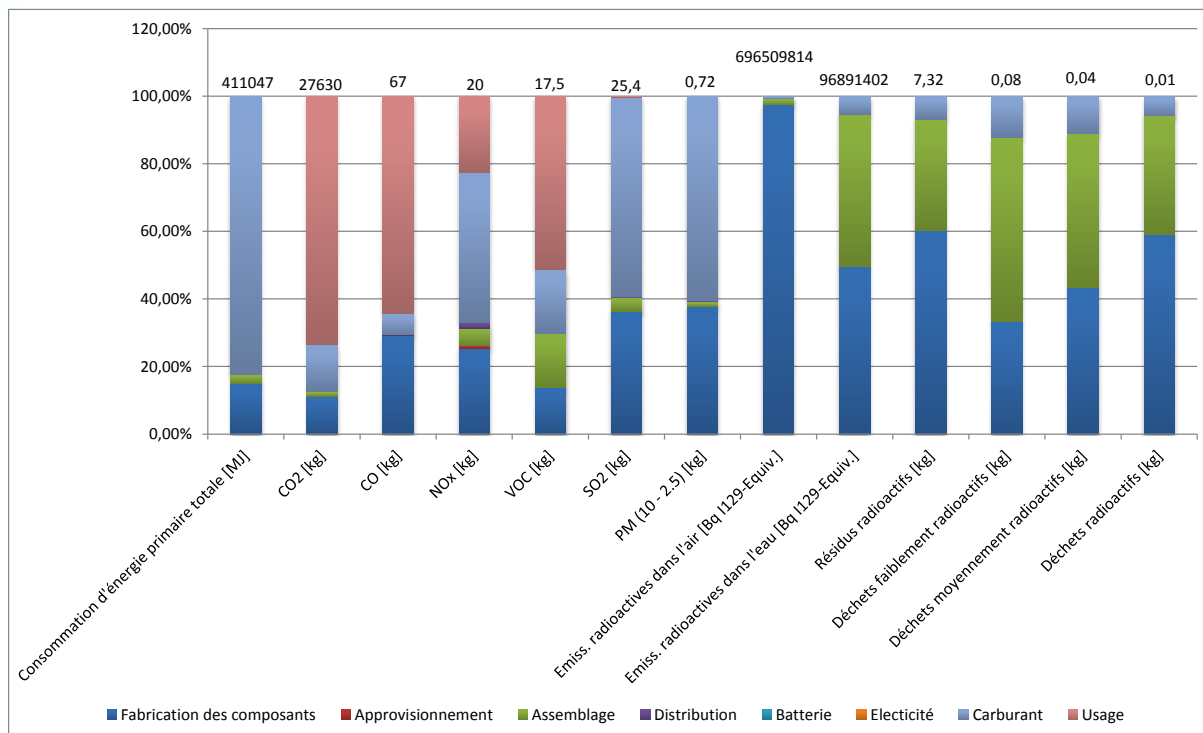


Figure 4-10 Contribution des différentes étapes du cycle de vie du véhicule particulier essence aux différents flux d'inventaire à l'horizon 2012.

L'interprétation des flux d'inventaire du véhicule essence est identique à celle du véhicule Diesel.

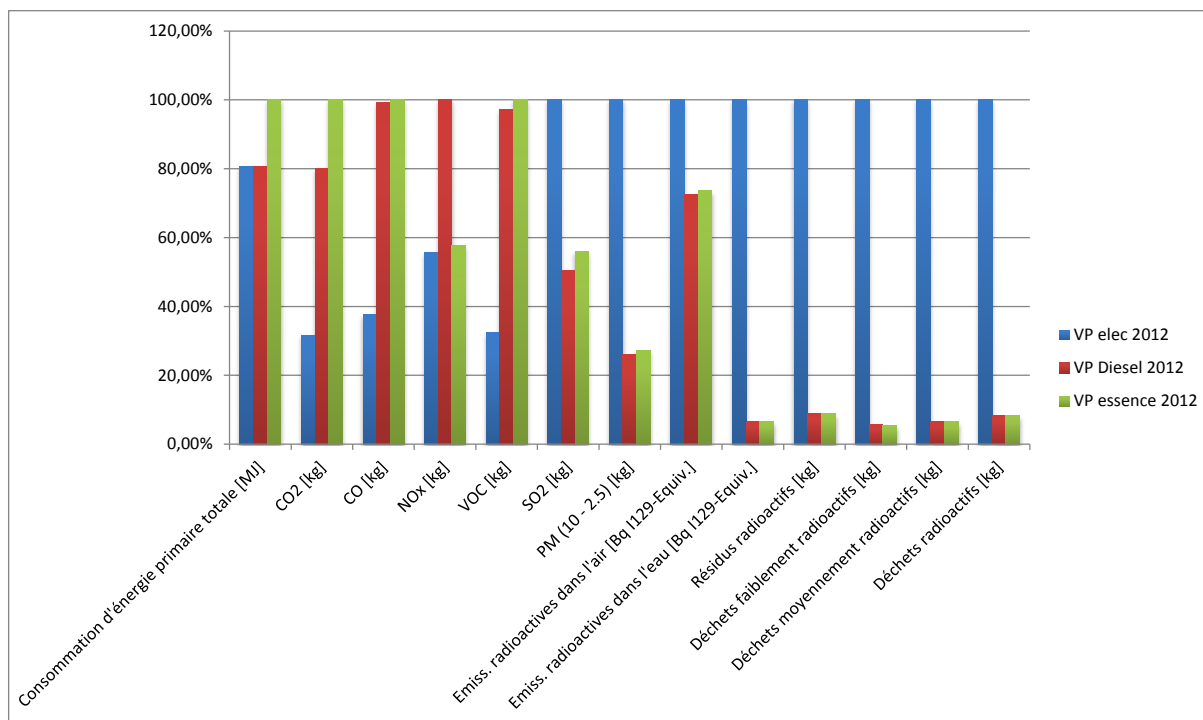


Figure 4-11 Comparaison des flux d'inventaire sur l'ensemble du cycle de vie des véhicules électrique et thermiques à l'horizon 2012.

Les VT affichent un bilan supérieur au VE pour les émissions de CO₂, CO, NO_x et COV. La consommation d'énergie primaire totale VE est équivalente au VT diesel et inférieure au VT essence. Pour les autres flux, le VE affiche un bilan supérieur en raison des émissions lors de l'extraction des métaux de la masse active de la batterie (SO₂ et PM) et de l'électricité produite en phase d'usage (ensemble des flux radioactifs).

4.1.2 VP 2020

Le scénario de référence regroupe les hypothèses suivantes :

- ✓ **Assemblage des véhicules électriques et thermiques en France (les procédés industriels n'ont pas changé par rapport à 2012),**
- ✓ **Fabrication de la batterie en France,**
- ✓ **Batterie hybride Li-Ion NMC (avec une réduction de la quantité de cobalt par rapport à la batterie 2012) et Li-FePO₄ de 24 kWh**
- ✓ **Consommations et émissions d'usage estimées sur le cycle de conduite NEDC à partir des normes Euro 6,**
- ✓ **Utilisation en France (pour le VE, un mix électrique moyen prospectif est utilisé),**
- ✓ **La durée de vie de la batterie est identique à la durée de vie du véhicule (150 000 km sur 10 ans),**
- ✓ **La méthode des stocks est utilisée pour modéliser la fin de vie (voir Chapitre 2.5.3.1).**

La plupart des interprétations faites pour le scénario de référence de 2012 sont valables pour le scénario 2020.

Les graphiques suivants présentent la comparaison entre un VE et deux VT (essence et Diesel) pour différents indicateurs d'impact potentiel en 2020. Un tableau présentant les valeurs de chaque indicateur d'impact potentiel est présenté en annexes.

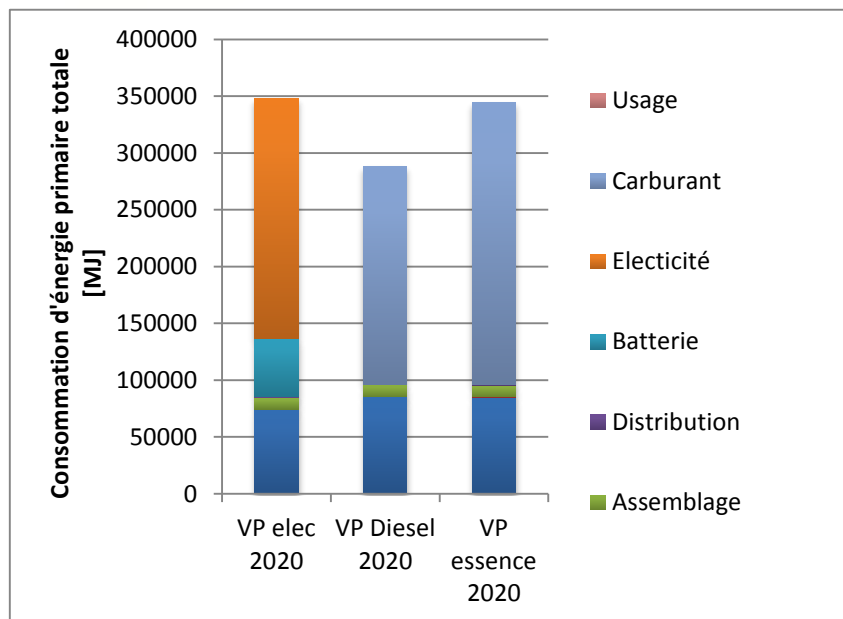


Figure 4-12 Contribution à la consommation d'énergie primaire des différentes étapes du cycle de vie des véhicules particuliers électrique, Diesel et essence à l'horizon 2020.

La diminution de la consommation des VT à l'horizon 2020 entraîne une diminution de la consommation d'énergie primaire totale. Ainsi, sur cet indicateur, le VE affiche un bilan défavorable par rapport au VT. L'origine de la consommation d'énergie primaire du VE reste majoritairement la production d'électricité en phase d'usage.

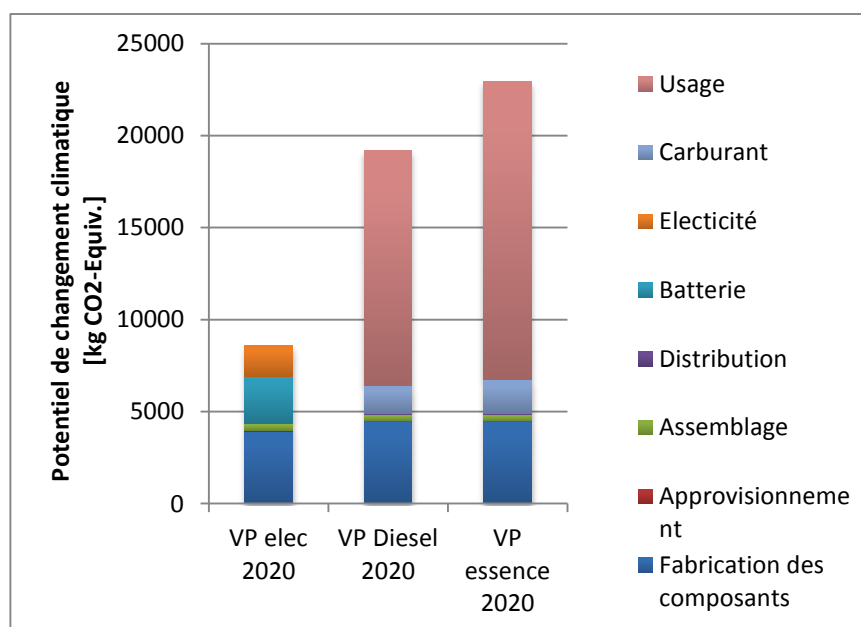


Figure 4-13 Contribution au potentiel de changement climatique des différentes étapes du cycle de vie des véhicules particuliers électrique, Diesel et essence à l'horizon 2020

Par rapport à 2012, le potentiel de changement climatique pour le véhicule électrique est quasi-équivalent. Le scénario de référence 2020 reflétant les changements à

venir des mix électriques nationaux est calculé à partir des informations issues de l'étude « des scénarios prospectifs Energie-Climat-Air à l'horizon 2030 » de la DGEC. Le mix électrique Français étant déjà faiblement carboné en 2012, son potentiel d'amélioration à l'horizon 2020 impacte peu le potentiel de changement climatique du VE. En revanche, les VT affichent une amélioration importante de cet indicateur due à la mise en place des réglementations Européennes.

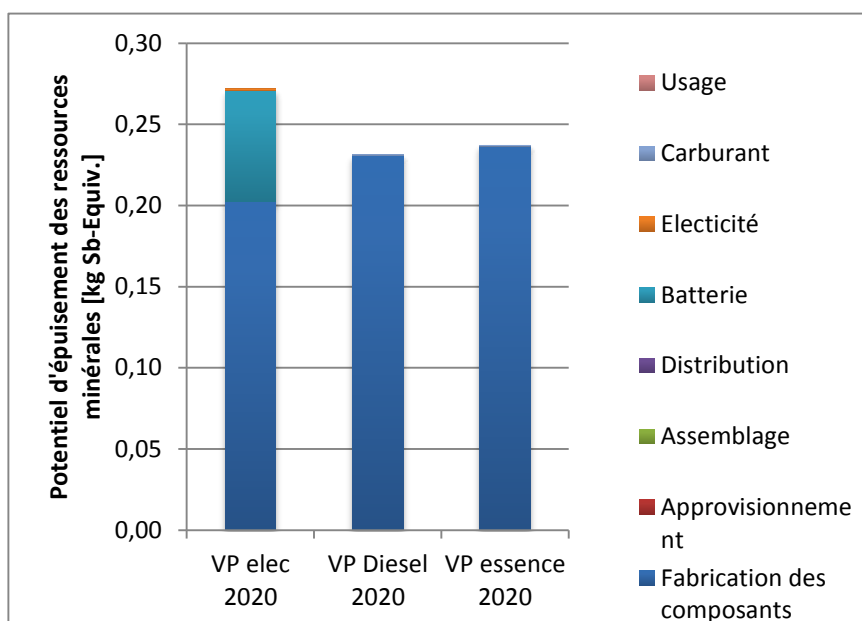


Figure 4-14 Contribution au potentiel d'épuisement des ressources minérales des différentes étapes du cycle de vie des véhicules particuliers électrique, Diesel à l'horizon 2020.

Le potentiel d'épuisement des ressources minérales pour les VT en 2020 sont équivalents à l'horizon 2012. En revanche, cet indicateur s'améliore pour le VE. Le potentiel d'épuisement des ressources minérales provient principalement de la fabrication de la batterie pour le VE. L'utilisation en 2020 d'une batterie Li-ion ayant une plus faible quantité de Cobalt couplé à l'utilisation d'une batterie Li-FePO4 améliore significativement cet indicateur.

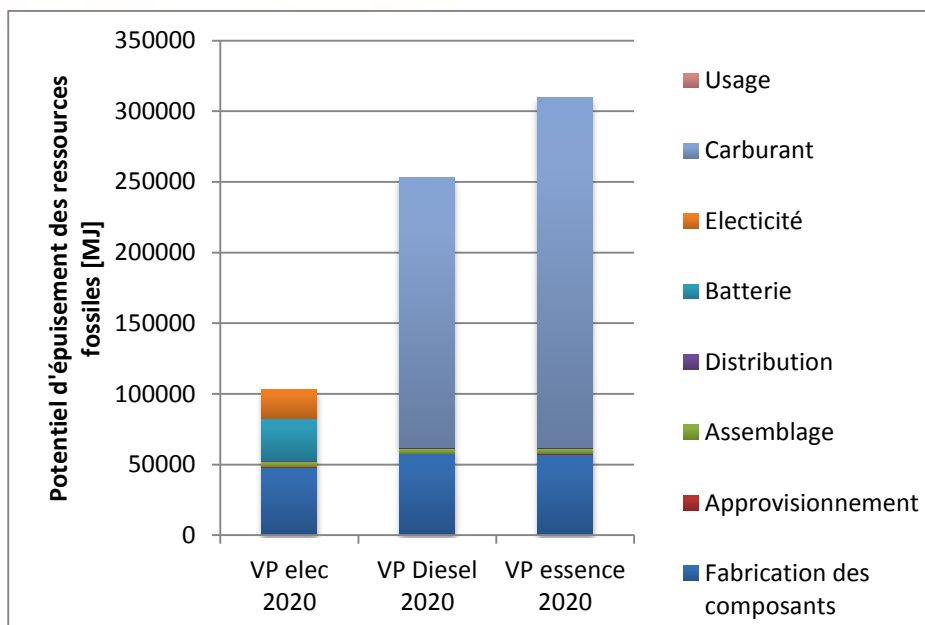


Figure 4-15 Contribution au potentiel d'épuisement des ressources fossiles des différentes étapes du cycle de vie des véhicules particuliers électrique, Diesel et essence à l'horizon 2020.

Une amélioration importante du potentiel d'épuisement des ressources fossiles par rapport à 2012 est à noter pour les VT, même si cet indicateur reste beaucoup plus important que celui du VE. Les avancées attendues dans l'extraction du brut nécessaire à l'élaboration du carburant expliquent cette réduction. L'origine de l'électricité utilisée (principalement nucléaire en France) permet pour le VE d'obtenir un faible potentiel d'épuisement des ressources fossiles, aussi bien en 2012 qu'en 2020.

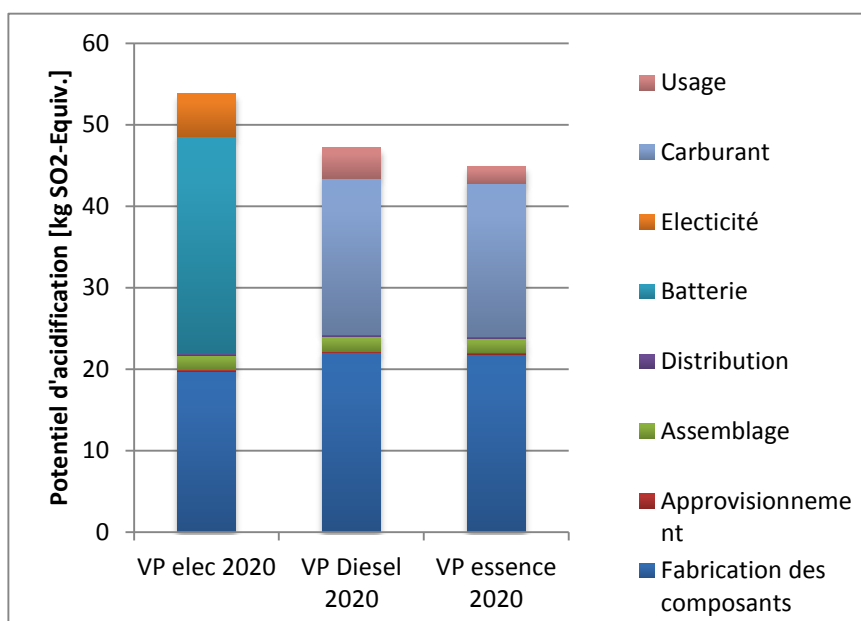


Figure 4-16 Contribution au potentiel d'acidification des différentes étapes du cycle de vie des véhicules particuliers électrique, Diesel et essence à l'horizon 2020

Le potentiel d'acidification du VE est plus important que celui des VT en raison de la production de la batterie et de la fabrication des composants. Pour les VT, le potentiel d'acidification vient principalement des émissions de raffinerie (SO₂ et NO_x) et des émissions de NO_x en phase d'usage. Les véhicules Diesel émettent plus de NO_x que les véhicules essence ce qui explique la différence entre les 2 scénarios. Par rapport au scénario 2012, la réduction des émissions de NO_x en phase d'usage des VT (selon la norme Euro 6) entraîne la réduction du potentiel d'acidification. De plus, l'écart entre le VE et les VT est réduit en raison de la nouvelle batterie utilisée dans le scénario 2020 comportant moins de cobalt, métaux impactant à l'extraction.

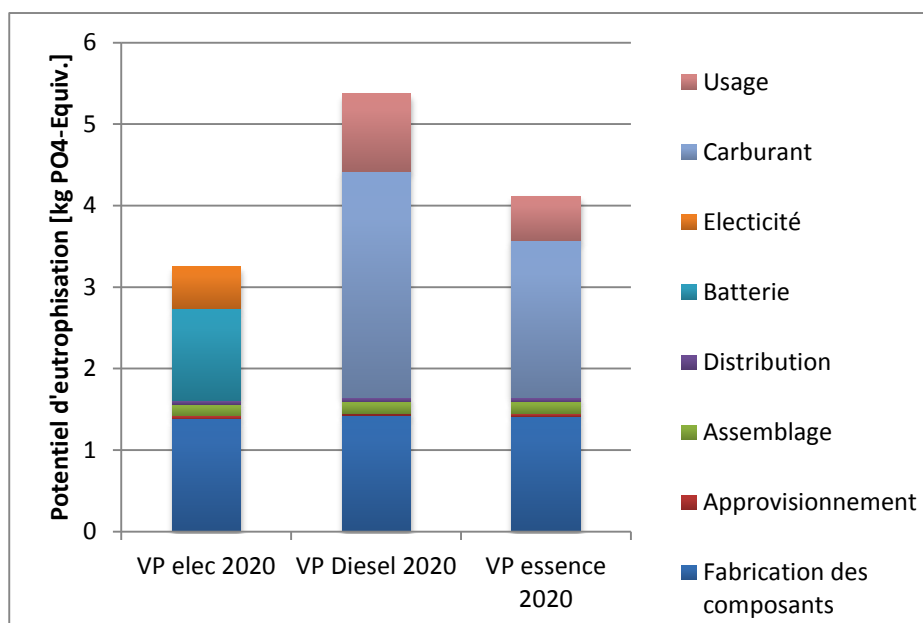


Figure 4-17 Contribution au potentiel d'eutrophisation des différentes étapes du cycle de vie des véhicules particuliers électrique, Diesel et essence à l'horizon 2020.

Les VT dominent toujours le VE sur cet indicateur par rapport au scénario 2012. Cependant, la réduction des émissions de NO_x à l'horizon 2020 réduit l'écart entre VE et VT. Le changement de technologie de batterie entraîne une réduction du bilan du VE sur cet indicateur mais moins significatif que celui du potentiel d'acidification.

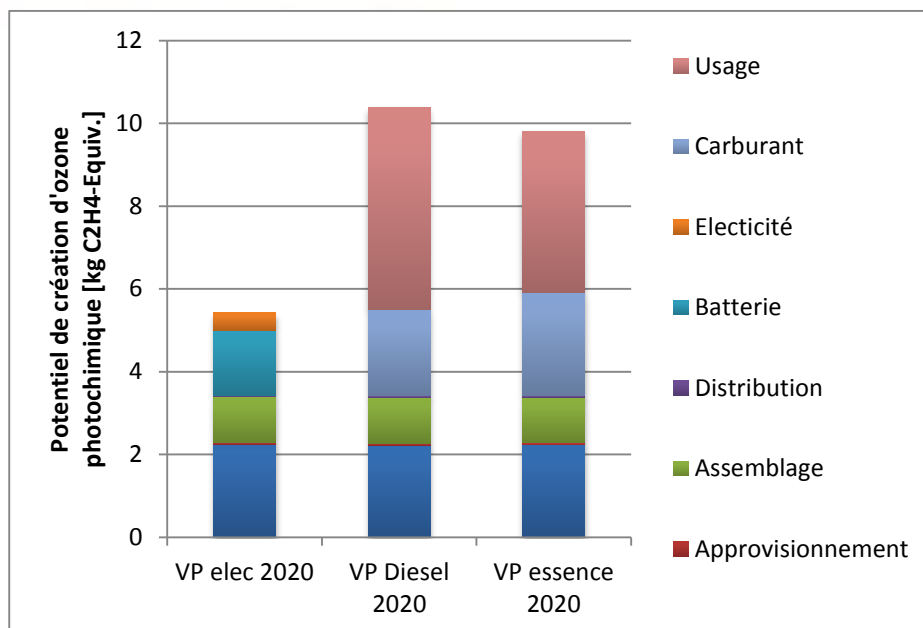


Figure 4-18 Contribution au potentiel de création d'ozone photochimique des différentes étapes du cycle de vie des véhicules particuliers électrique, Diesel et essence à l'horizon 2020.

Le potentiel de création d'ozone photochimique s'améliore entre 2012 et 2020 pour les VT et les VE. Pour les VT, le potentiel de création d'ozone photochimique provient majoritairement des émissions de NOx et de COV en phase d'usage, d'élaboration du carburant et de fabrication des composants. Les émissions de COV sur le site d'assemblage des véhicules contribuent également au potentiel de création d'ozone photochimique.

Les graphiques suivants présentent les flux d'inventaire sur l'ensemble du cycle de vie de chaque véhicule à l'horizon 2020. Les tableaux récapitulatifs sont disponibles en annexes.

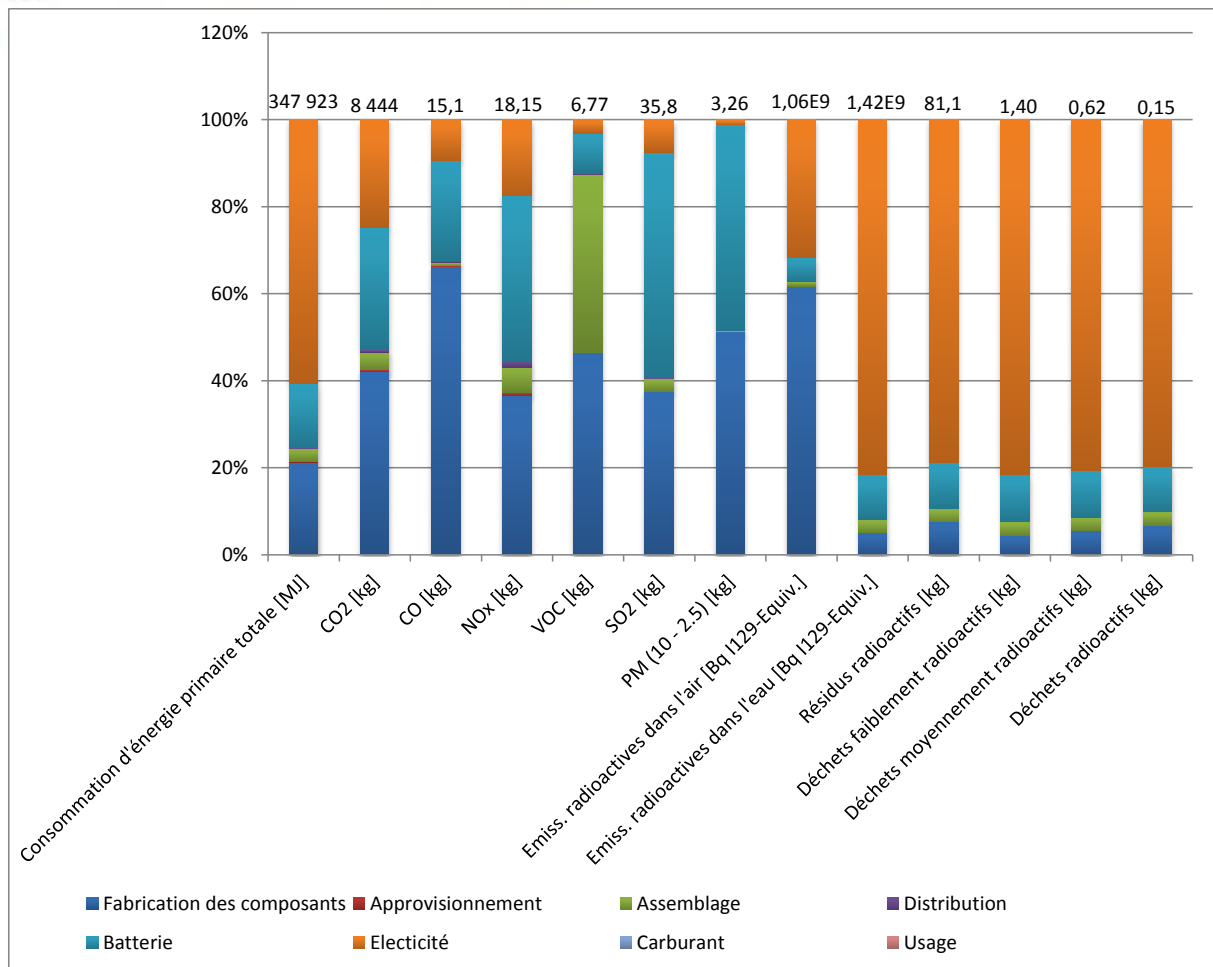


Figure 4-19 Contribution des différentes étapes du cycle de vie du véhicule particulier électrique aux différents flux d'inventaire à l'horizon 2020.

On observe que, par rapport au scénario 2012, les émissions de CO de NOx et de SO₂ sont plus faibles pour le scénario 2020 en raison de la technologie de batterie utilisée à cet horizon nécessitant moins de matériaux impactants (cobalt, nickel). Pour les autres flux d'inventaires, les valeurs sont soit équivalentes soit supérieures au scénario 2012 car les émissions gagnées sur les batteries sont équilibrées par la phase de fabrication des composants, plus impactants en raison de l'aluminium primaire nécessaire à l'allègement du VE à l'horizon 2020.

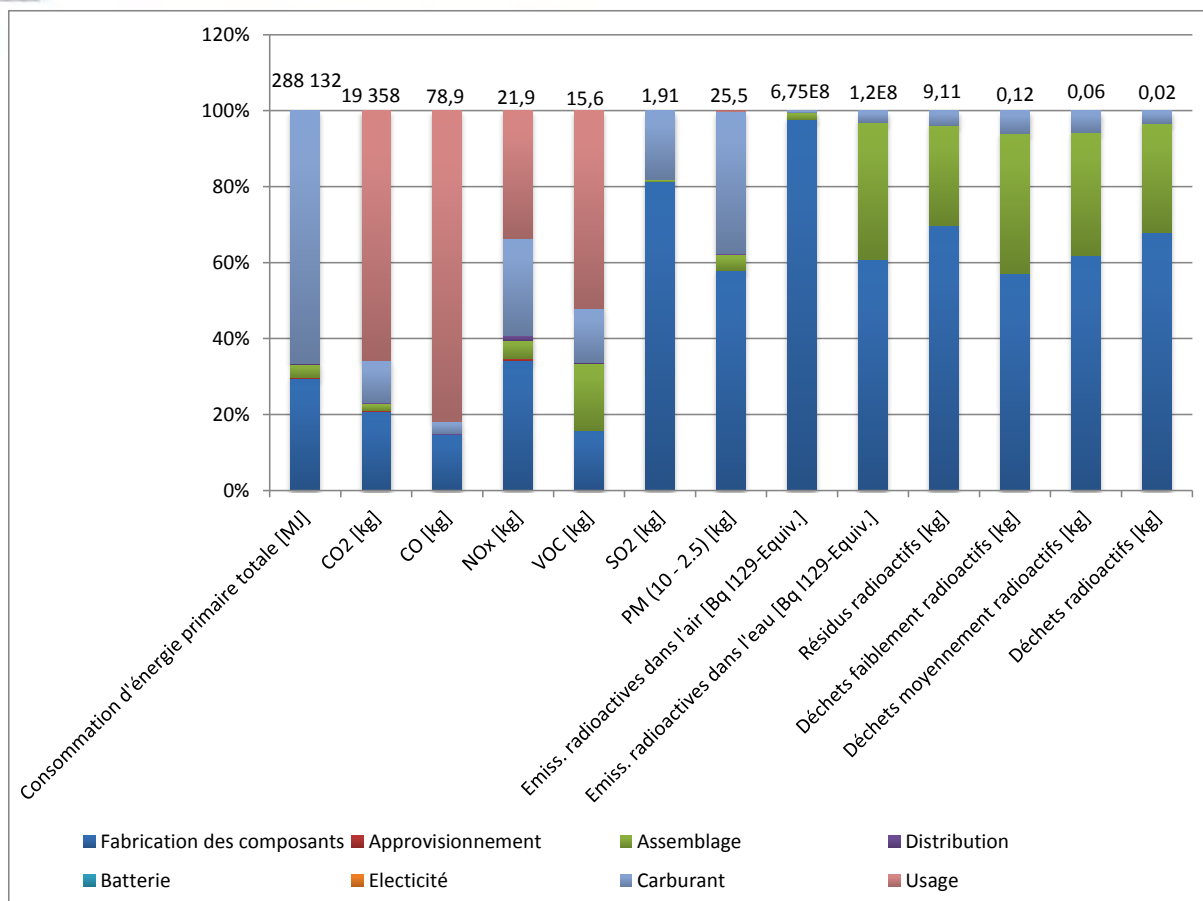


Figure 4-20 Contribution des différentes étapes du cycle de vie du véhicule particulier Diesel aux différents flux d'inventaire à l'horizon 2020.

A l'exception des émissions de NOx qui diminuent en raison de la norme Euro 6, les valeurs des autres flux d'inventaires du scénario Diesel 2020 sont supérieures à celles de 2012. Les émissions pendant la fabrication des composants sont plus importantes en raison de l'aluminium primaire nécessaire à l'allègement. Par ailleurs, les émissions de CO sont plus importantes en raison des technologies utilisées en phase d'usage pour réduire les émissions de NOx.

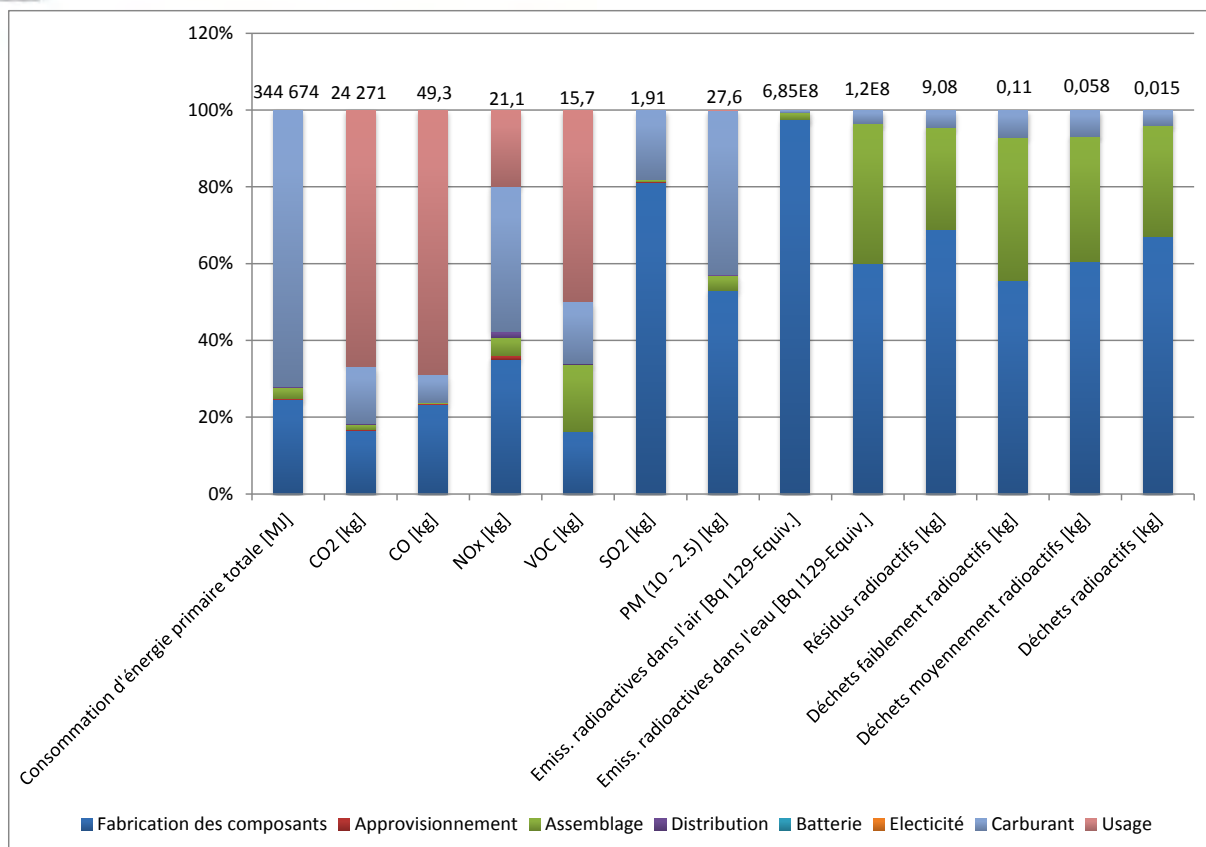


Figure 4-21 Contribution des différentes étapes du cycle de vie du véhicule particulier essence aux différents flux d'inventaire à l'horizon 2020.

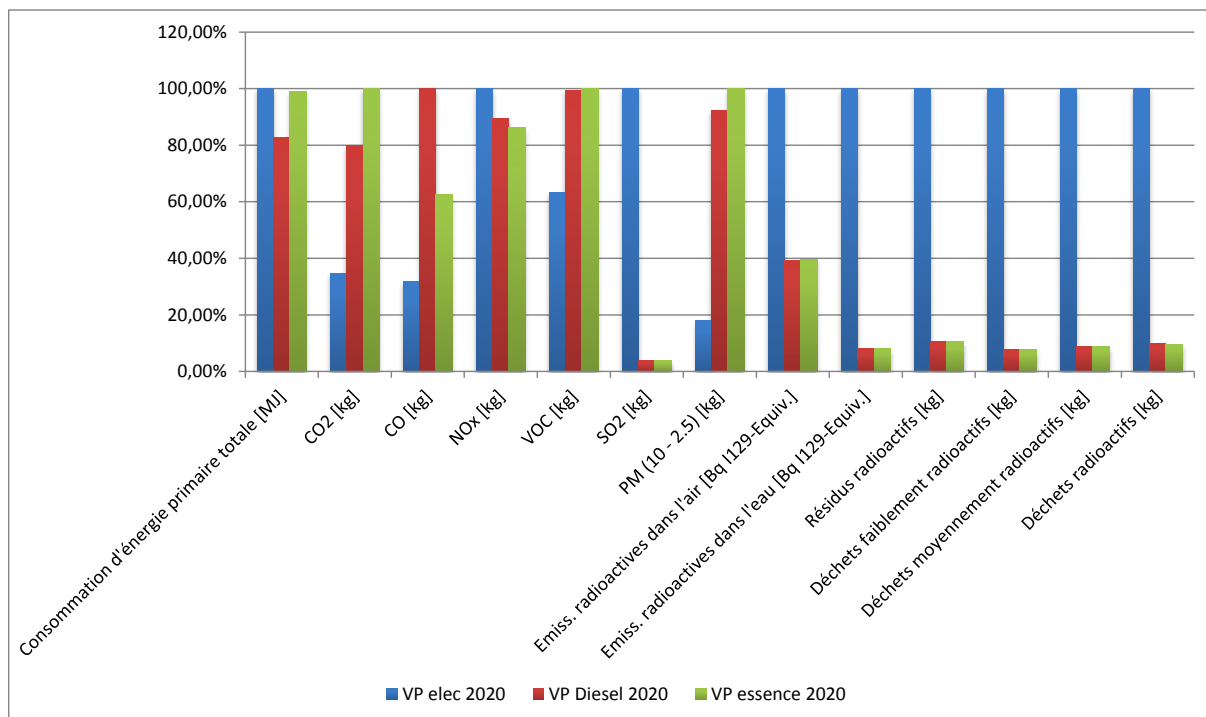


Figure 4-22 Comparaison des flux d'inventaire sur l'ensemble du cycle de vie des véhicules électrique et thermiques à l'horizon 2020.

4.1.3 VUL 2012

Les conclusions pour le VUL sont sensiblement identiques à celles du VP, ainsi seules les contributions des étapes du cycle de vie aux potentiels d'acidification et de changement climatique et la consommation d'énergie primaire totale sont présentées. Les figures des autres indicateurs d'impact potentiels sont disponibles en annexes.

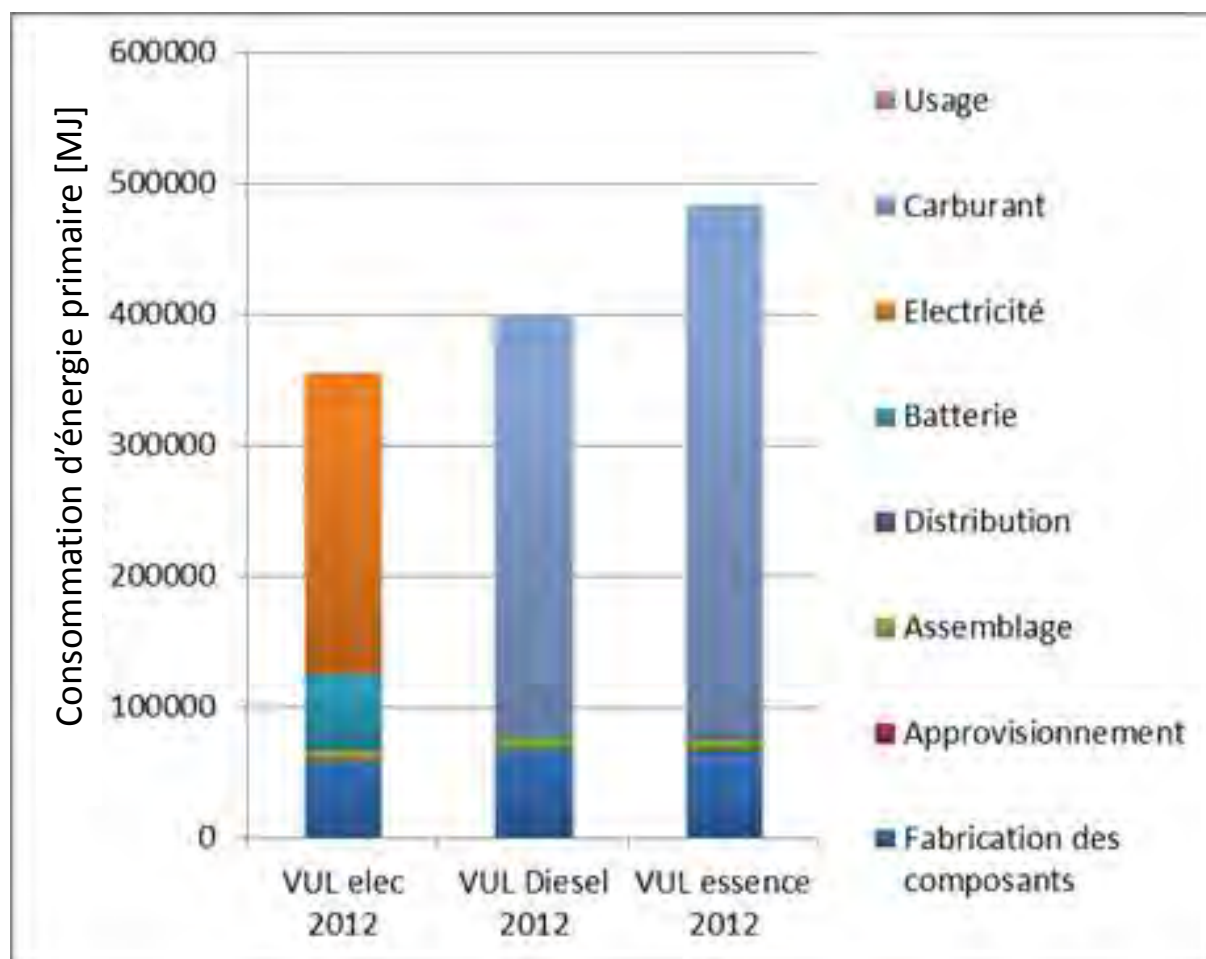


Figure 4-23 Contribution à la consommation d'énergie primaire des différentes étapes du cycle de vie des VUL à l'horizon 2012.

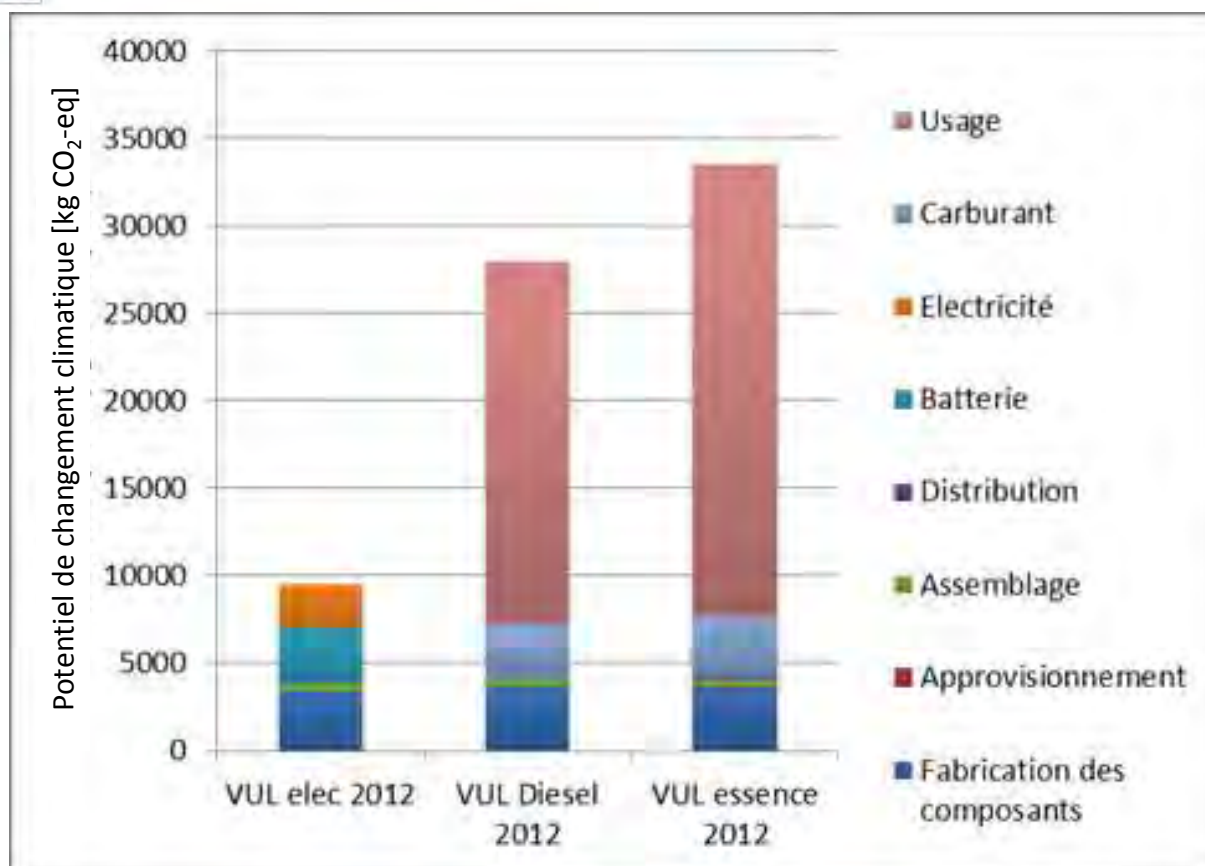


Figure 4-24 Contribution au potentiel de changement climatique des différentes étapes du cycle de vie des VUL à l'horizon 2020

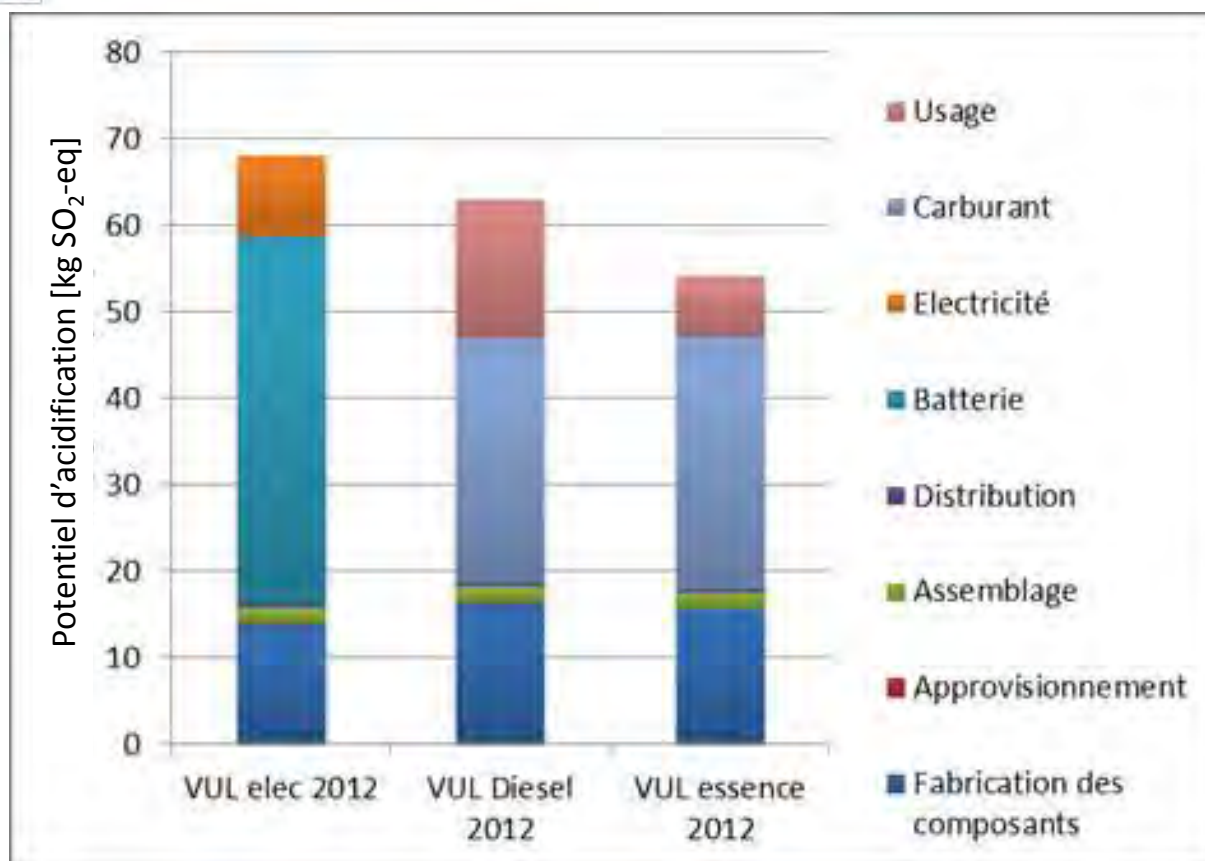


Figure 4-25 Contribution au potentiel d'acidification des différentes étapes du cycle de vie des VUL à l'horizon 2020

4.1.4 VUL 2020

Les conclusions pour le VUL sont sensiblement identiques à celles du VP, ainsi seules les contributions des étapes du cycle de vie aux potentiels d'acidification et de changement climatique et la consommation d'énergie primaire totale sont présentées. Les figures des autres indicateurs d'impact potentiels sont disponibles en annexes.

4.2 Détail des phases du cycle de vie

4.2.1 Production 2012

La fabrication de la batterie du VE est incluse dans les résultats présentés de ce chapitre. Cependant étant donnée l'importance de cette étape dans l'impact environnemental du VE (voir Chapitre 4.1.1), un focus « batterie » est présenté aux horizons 2012 et 2020.

4.2.1.1 Véhicule particulier 2012

Le graphique suivant présente la répartition des impacts environnementaux potentiels des véhicules particuliers évalués pour 2012 pendant la phase de production. Cette phase de production comprend : la production des composants (et de la batterie dans le cas du VE), l'approvisionnement, l'assemblage et la distribution.

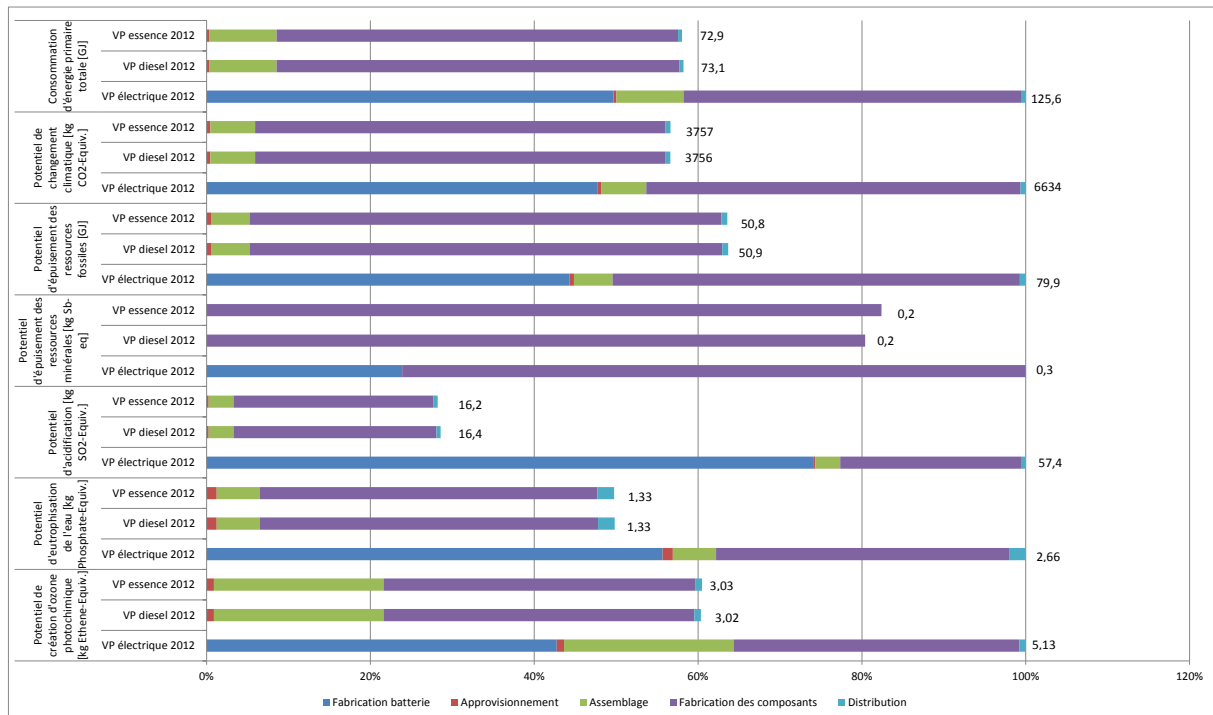


Figure 4-26 Contributions en phase de production des véhicules électrique, Diesel et essence à l'horizon 2012

Les résultats montrent que la production d'un véhicule électrique conduit à des impacts environnementaux potentiels sensiblement plus importants que pour la production des véhicules Diesel et essence, tout particulièrement pour les impacts tels que le potentiel d'épuisement des ressources (fossiles et minérales), le potentiel d'acidification, d'eutrophisation, de changement climatique, et de création d'oxydant photochimique.

Pour l'indicateur d'épuisement des ressources minérales (ADP element) la phase de fabrication des composants (toutes les parties et matériaux d'un véhicule) est la plus importante (pour les 3 motorisations). La batterie présente également une contribution importante pour le véhicule électrique. Pour ces matériaux, les résultats pour l'indicateur d'épuisement des ressources minérales sont dominés par l'extraction de l'argent, le cuivre, le plomb et l'or. Le plomb est typiquement utilisé dans les batteries de démarrage 12V. Les trois autres sont utilisés dans l'électronique du véhicule. Les métaux sont généralement exploités dans des minerais mixtes, c'est à dire que selon les gisements, plusieurs métaux différents sont exploités simultanément, cela conduit à des allocations. Dans les bases de données GaBi, les inventaires individuels sont calculés sur la base d'une allocation économique. Les résultats de l'indicateur d'épuisement des ressources minérales

peuvent varier considérablement selon le mode de production et la combinaison de minerais utilisés. Les résultats présentés n'ont donc qu'une robustesse modérée.

Pour l'indicateur d'épuisement des ressources fossiles (ADP fossile) la phase de fabrication des composants est également la plus impactante, suivie de la production des batteries, puis par la production du véhicule dans l'usine finale. Les transports sont négligeables. Pour les matériaux, les valeurs de l'indicateur d'épuisement des ressources fossiles sont dues à parts presque équivalentes à la consommation de houille, du pétrole brut et du gaz naturel. La production de la batterie présente un impact équivalent au reste du véhicule, qui est dû à 40% par la houille, à 20% par le pétrole brut, et environ 30% par le gaz naturel. Le reste est dû au lignite.

Pour l'indicateur d'acidification (AP), l'impact du véhicule électrique est environ trois fois plus élevé que celui d'un véhicule essence et Diesel. Le potentiel d'acidification est dans une large mesure causé par les émissions de dioxyde de soufre (75-90) lors de l'extraction et de la mise en forme des matériaux « fabrication des composants » (principalement l'acier et l'aluminium). Le reste est principalement dû aux émissions de NOx et de certains contributeurs mineurs comme les émissions du site d'assemblage et la distribution. Dans la batterie, la source principale de SO2 vient de la production du cobalt et du nickel utilisés dans la masse active de la batterie. Les catégories « Fabrication des composants » et « Assemblage » sont équivalentes pour les trois véhicules. La logistique interne est à nouveau négligeable.

Le potentiel d'eutrophisation (EP) est principalement causé par l'émission de NOx, et par des contributions mineures d'ammoniac et de protoxydes d'azote. Le potentiel d'eutrophisation du véhicule électrique apparaît comme environ deux fois plus élevé que celui des véhicules Diesel et essence. Cela est dû en partie à la production de la batterie du véhicule électrique. Pour la fabrication des composants, il n'y a pas de sources d'impact majeures pour l'eutrophisation. L'acier a une contribution importante car il est majoritaire dans le bilan massique.

Pour l'indicateur du changement climatique (GWP) Le véhicule électrique montre un impact presque deux fois supérieurs à ceux des véhicules essence et Diesel en raison de la fabrication de la batterie. Pour cet impact, les émissions de CO2 sont les principales contributions. Toutes les autres émissions ne contribuent que faiblement au à l'impact potentiel du changement climatique.

Pour l'indicateur de création d'ozone photochimique (POCP), la contribution du véhicule électrique est d'environ 65% plus élevée que celle d'un véhicule essence ou Diesel. La production de la batterie est principalement la cause des émissions de dioxyde de soufre, oxydes d'azote, et COVs. Les émissions de monoxyde de carbone sont également importantes lors de la production du véhicule.

Pour la consommation d'énergie primaire, la contribution du VE est 2 fois plus élevée que celle des véhicules essence et Diesel. La fabrication de la batterie est à l'origine de cette surconsommation. Pour les VT, la fabrication des composants représente 85% de la consommation d'énergie primaire de la phase de production. L'assemblage des véhicules est également représentatif (plus de 15% pour les VT et 8% pour le VE).

Pour résumer les conclusions concernant la phase de production, on observe que la production de la batterie entraîne des répercussions importantes à tous niveaux : la production de cobalt, de nickel et parfois celle du graphite entraîne des impacts environnementaux importants pour toutes les catégories d'impacts, d'où la nécessité d'étudier en détail la fabrication de la batterie et son recyclage (paragraphe 4.3.3 Scénario de fin de vie).

Flux d'inventaire

Les résultats des flux d'inventaire pour les trois motorisations étudiées sont disponibles en annexes. L'analyse précédente des indicateurs d'impact reflète la majorité des résultats d'inventaire.

Les résidus radioactifs, les déchets radioactifs et faiblement radioactifs tout comme les émissions radioactives dans l'eau sont principalement dus à la production d'électricité nucléaire.

Ainsi, les résultats élevés pour un véhicule électrique sont liés à la consommation d'électricité lors de la production des batteries plus importantes que pour les VT.

Pour les émissions radioactives dans l'air, la contribution des matériaux et pièces des fournisseurs est due aux données des bouquets électriques obsolètes qui sont pris en compte lors de la production de pièces en polypropylène.

4.2.1.2 Batteries 2012

Le Tableau 4-1 montre les impacts environnementaux potentiels et les flux d'inventaire de la batterie modélisée pour les scénarios 2012 et de ses composants.

Tableau 4-1 : Indicateurs d'impact potentiel et flux d'inventaire pour la batterie 2012

Batterie 2012	Modules	Câbles	Aluminium	Electricité	Electronique	Total
Potentiel d'épuisement des ressources minérales [kg Sb-Equiv.]	1,22E-02	5,64E-02	5,87E-05	9,43E-04	6,66E-04	7,03E-02
Potentiel d'épuisement des ressources fossiles [MJ]	3,26E+04	6,80E+02	1,59E+03	4,39E+02	5,79E+01	3,54E+04
Potentiel d'acidification [kg SO ₂ -Equiv.]	4,14E+01	2,16E-01	8,50E-01	1,31E-01	3,23E-02	4,26E+01
Potentiel d'entrophisation [kg Phosphate-Equiv.]	1,42E+00	1,47E-02	3,90E-02	1,04E-02	2,04E-03	1,48E+00
Potentiel de changement climatique [kg CO ₂ -Equiv.]	2,92E+03	4,95E+01	1,57E+02	3,39E+01	4,70E+00	3,17E+03
Potentiel de création d'ozone photochimique [kg Ethene-Equiv.]	2,18E+00	1,90E-02	4,68E-02	1,54E-02	1,97E-03	2,27E+00
Consommation d'énergie primaire totale [MJ]	5,81E+04	8,63E+02	2,57E+03	7,63E+02	7,45E+01	6,24E+04
CO [kg]	4,06E+00	3,79E-02	6,45E-02	2,75E-01	3,05E-03	4,44E+00
CO ₂ [kg]	2,79E+03	4,98E+01	1,42E+02	3,32E+01	4,50E+00	3,02E+03
NO _x [kg]	8,41E+00	8,64E-02	2,79E-01	7,20E-02	1,44E-02	8,87E+00
COV [kg]	6,43E-01	1,40E-02	1,25E-02	3,29E-03	5,37E-04	6,74E-01
PM (10 - 2.5) [kg]	2,09E+00	9,96E-03	1,12E-01	5,74E-03	7,69E-04	2,21E+00
SO ₂ [kg]	2,99E+01	1,40E-01	5,47E-01	7,75E-02	2,02E-02	3,07E+01
Emiss. radioactives dans l'air [Bq I129-Equiv.]	5,51E+07	3,24E+05	1,49E+06	7,94E+05	2,04E+05	5,79E+07
Emiss. radioactives dans l'eau [Bq I129-Equiv.]	1,42E+08	2,31E+05	1,60E+06	2,02E+06	6,02E+04	1,46E+08
Résidus radioactifs [kg]	8,17E+00	3,54E-02	1,41E-01	1,15E-01	4,98E-03	8,47E+00
Déchets radioactifs [kg]	1,49E-02	4,55E-05	2,13E-04	2,10E-04	7,28E-06	1,54E-02
Déchets faiblement radioactifs [kg]	1,46E-01	7,26E-04	2,73E-03	2,07E-03	1,03E-04	1,51E-01
Déchets moyennement radioactifs [kg]	6,47E-02	3,66E-04	1,30E-03	9,20E-04	5,11E-05	6,73E-02

Dans la figure suivante, pour l'ensemble des indicateurs d'impacts, on remarque que les modules de la batterie sont les composants les plus impactants (plus de 90% des impacts environnementaux), à l'exception de l'indicateur d'épuisement des ressources minérales naturelles, pour lequel les câbles affichent la plus forte

contribution (80%). Cette valeur s'explique par la présence du cuivre qui a un facteur de caractérisation important pour cet indicateur.

L'électronique de la batterie représente 1% du bilan de l'indicateur d'impact d'épuisement des ressources minérales naturelles, pour les autres indicateurs, sa contribution est inférieure à 1% (aux alentours de 0,1%).

Les composants en aluminium (profilés pour le refroidissement et tôle pour le boîtier) contribuent peu à l'épuisement des ressources minérales naturelles (0,1%), en revanche leur contribution est plus importante pour les autres indicateurs d'impacts, notamment la consommation d'énergie primaire (4%, ce résultat s'explique par la quantité d'énergie importante nécessaire à l'extraction de la bauxite et l'électrolyse pour la production d'aluminium primaire), l'épuisement des ressources fossiles naturelles (4,5%) et le potentiel de changement climatique (5%).

L'électricité nécessaire à la fabrication de la batterie représente une partie infime du bilan environnemental (1,3% de l'indicateur d'épuisement des ressources minérales naturelles et environ 1% des autres indicateurs d'impact).

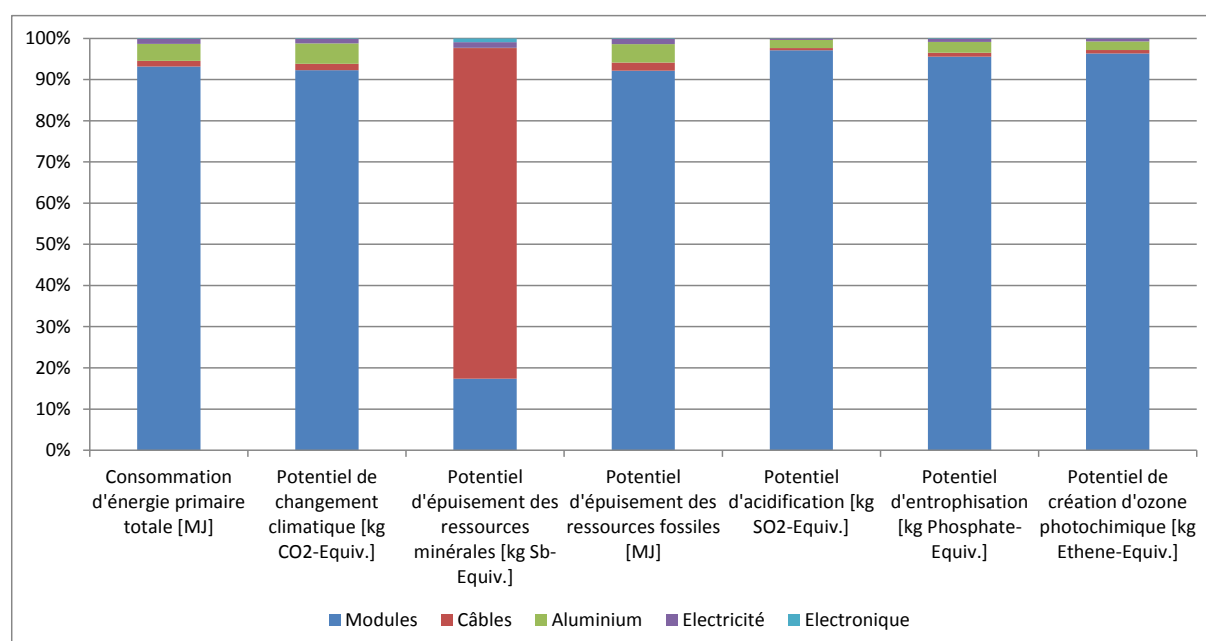


Figure 4-27 Contribution aux indicateurs d'impact pour la batterie 2012

Dans la mesure où les modules, c'est à dire l'ensemble des cellules électrochimiques de la batterie, représentent une contribution importante sur l'ensemble des indicateurs d'impact, leur analyse a été approfondie.

A l'exception de l'indicateur d'épuisement des ressources minérales naturelles, les cellules électrochimiques de la batterie représentent entre 87% et 96% des impacts de la batterie.

La figure suivante montre la répartition des contributions des composants des cellules électrochimiques aux différents indicateurs d'impact.

On peut observer que la cathode des cellules représente la part la plus importante de l'ensemble des bilans environnementaux (de 62% à 88% par rapport aux bilans des cellules et de 13% à 86% par rapport aux bilans de l'ensemble de la batterie). Ce

résultat s'explique par l'utilisation de métaux rares (cobalt, nickel, lithium et manganèse), dont la phase d'extraction est impactante, pour la fabrication de la matière active de la cathode.

L'anode (entre 7,2% et 24,3%), l'électricité nécessaire à la fabrication des cellules (entre 0,7% et 7,7%), l'électrolyte (entre 0,7% et 7,6%) et les composants passifs (entre 1,4% et 3,6%) sont les autres composants dont la contribution aux impacts environnementaux peut être significative en fonction des indicateurs.

Le séparateur représente moins de 1% des bilans environnementaux des cellules sur l'ensemble des indicateurs d'impact.

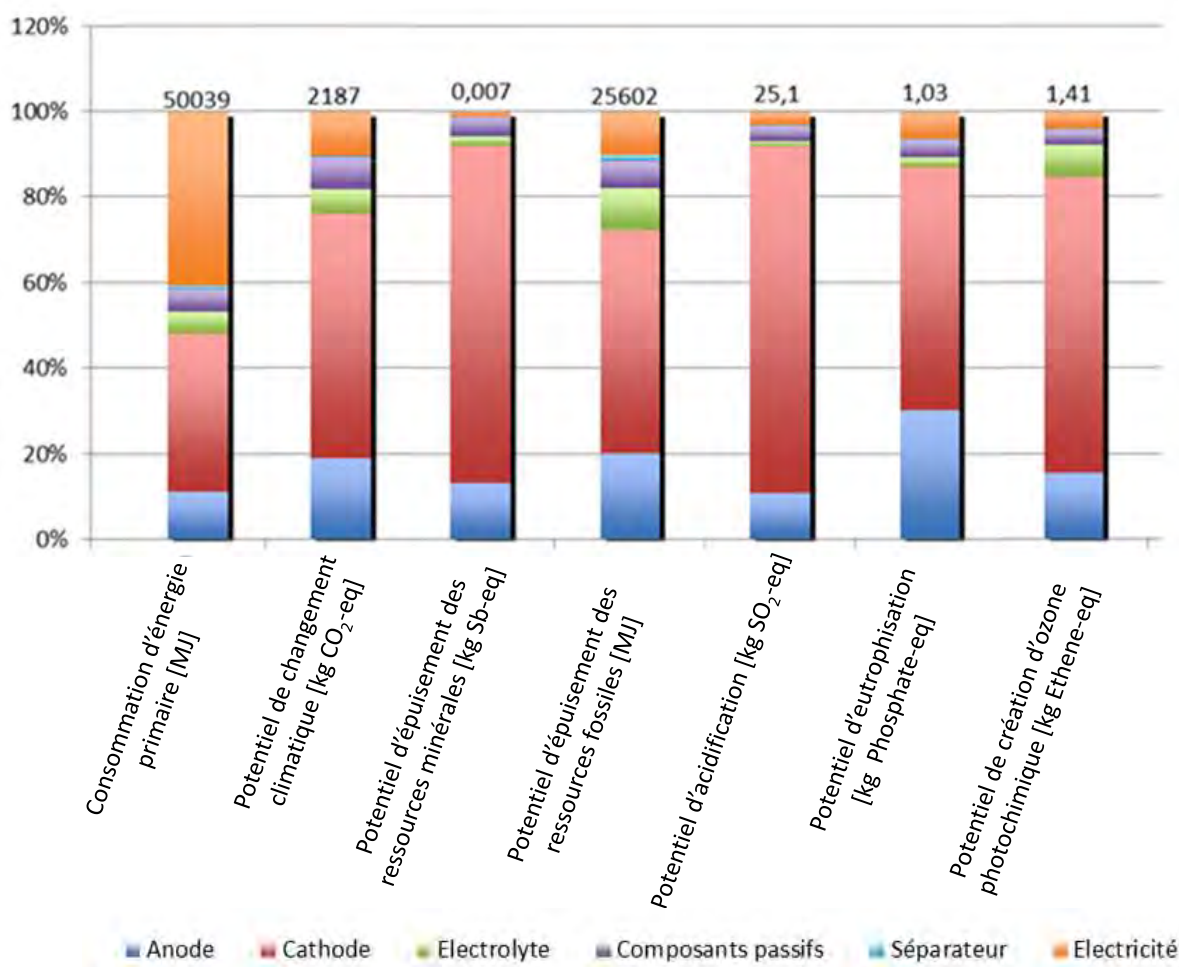


Figure 4-28 Analyse des contributions aux indicateurs d'impact pour les cellules de la batterie 2012

Extraction des données d'inventaire

Des représentations graphiques de la répartition des flux d'inventaire sont disponibles en annexes (contributions de la batterie et contributions des cellules de la batterie).

A l'instar des indicateurs d'impact potentiels, les modules de la batterie sont responsables de la majorité des émissions et consommations des flux sélectionnés (entre 87% et 97%).

Les cellules de la batterie sont responsables de la quasi-totalité des émissions et consommations des flux étudiés (de 96% à 99%), exception faite des COV émis lors de la fabrication des boîtiers en fibres de verre renforcées, qui représentent 23% des émissions totales des modules.

Les éléments les plus impactants au niveau de l'inventaire sont :

- ✓ La cathode des cellules représente une partie importante des émissions et consommations des flux extraits de l'inventaire, notamment pour les émissions de CO (78%), de CO₂ (69%), de NO_x (61%), de particules fines (88%) et de SO₂ (92%),
- ✓ L'électricité nécessaire à la fabrication des cellules est également significative, surtout pour les émissions radioactives (62% pour les émissions dans l'air et 83% pour les émissions dans l'eau) et les déchets radioactifs (entre 79% et 82%). La fabrication des batteries est réalisée en France. L'utilisation de l'électricité française avec une part élevée de nucléaire, explique ces résultats,
- ✓ L'anode affiche également une contribution significative (entre 4,5% et 15%) surtout pour les émissions de NO_x (30%). Les composés chimiques utilisés pour la fabrication de l'électrolyte représentent 37% des émissions de COV des cellules, et 6,3% des émissions de CO,
- ✓ Les composants passifs contribuent à la consommation d'énergie primaire (de 3% à 7%) et des émissions radioactives dans l'air (6%), leurs contributions sont moins significatives pour le reste des émissions et consommations (entre 1% et 3%), tout comme les émissions et consommations du séparateur (de 0,03% à 1%).

4.2.2 Production 2020

4.2.2.1 Véhicule particulier à l'horizon 2020

Indicateurs d'impact potentiels

Le graphique suivant présente la répartition des impacts environnementaux potentiels des véhicules particuliers évalués pour 2020 pendant la phase de production. Cette phase de production comprend : la production des composants (et de la batterie dans le cas du VE), l'approvisionnement, l'assemblage et la distribution.

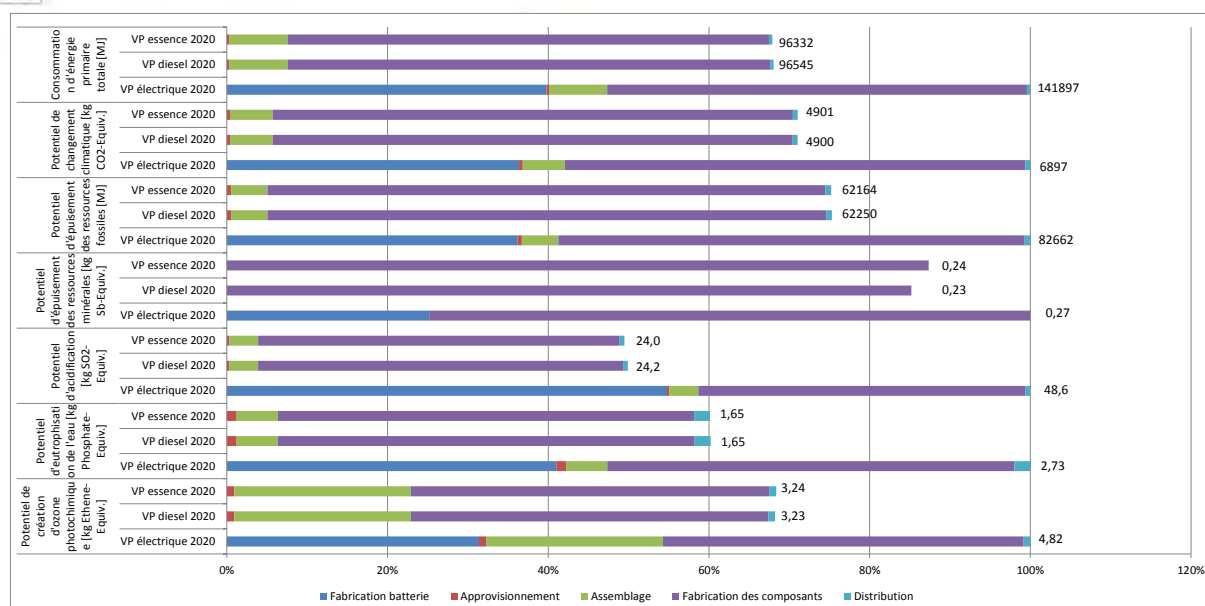


Figure 4-29 Contributions en phase de production des véhicules électrique, Diesel et essence à l'horizon 2020

Comparé à la production de véhicules à l'horizon 2012, il y a deux différences majeures :

- ✓ La composition matière contient significativement plus d'aluminium et à l'inverse, beaucoup moins d'acier que dans les scénarios 2012 (ce qui explique que les scénarios 2020 affichent des résultats plus élevés dans l'absolu que les scénarios 2012).
- ✓ La technologie de la batterie est partiellement modifiée avec la présence de phosphate de fer qui entraîne résultats significativement plus faibles pour la batterie du véhicule à l'horizon 2020.

Il en résulte que l'écart se resserre entre les résultats pour les véhicules thermiques et électriques. L'interprétation des résultats à l'horizon 2020 est identique à celle de 2012.

Extraction des données d'inventaire

Les résultats des flux d'inventaire pour les trois motorisations étudiées sont disponibles en annexes.

4.2.2.2 Véhicule Utilitaire Léger 2020

Les résultats d'impacts environnementaux potentiels et les données d'inventaire des VUL à l'horizon 2020 sont présentés dans les tableaux en annexes. Les interprétations faites dans les chapitres précédents sont également valables pour les VUL à l'horizon 2020.

4.2.2.3 Batteries 2020

A l'instar du scénario 2012, la batterie du VE représente une part importante de l'impact environnemental potentiel de la fabrication. Les indicateurs d'impact potentiel et les flux d'inventaire de cycle de vie sont présentés pour les différents composants de la batterie dans cette partie.

Tableau 4-2 Indicateurs d'impact et flux d'inventaire de la batterie à l'horizon 2020

Batterie 2020	Modules	Câbles	Aluminium	Electricité	Electronique	Total
Potentiel d'épuisement des ressources minérales [kg Sb-Equiv.]	8,44E-03	5,83E-02	5,97E-05	9,54E-04	6,66E-04	6,84E-02
Potentiel d'épuisement des ressources fossiles [MJ]	2,71E+04	7,02E+02	1,62E+03	4,40E+02	5,79E+01	2,99E+04
Potentiel d'acidification [kg SO ₂ -Equiv.]	2,53E+01	2,24E-01	8,66E-01	1,31E-01	3,23E-02	2,66E+01
Potentiel d'entrophisation [kg Phosphate-Equiv.]	1,05E+00	1,52E-02	3,98E-02	1,05E-02	2,04E-03	1,12E+00
Potentiel de changement climatique [kg CO ₂ -Equiv.]	2,26E+03	5,12E+01	1,60E+02	3,40E+01	4,70E+00	2,51E+03
Potentiel de création d'ozone photochimique [kg Ethene-Equiv.]	1,48E+00	1,97E-02	4,76E-02	1,54E-02	1,97E-03	1,57E+00
Consommation d'énergie primaire totale [MJ]	5,21E+04	8,92E+02	2,62E+03	7,64E+02	7,45E+01	5,64E+04
CO [kg]	3,10E+00	3,92E-02	6,57E-02	2,75E-01	3,05E-03	3,48E+00
NO _x [kg]	6,39E+00	8,92E-02	2,85E-01	7,22E-02	1,44E-02	6,85E+00
COV [kg]	5,95E-01	1,45E-02	1,27E-02	3,30E-03	5,37E-04	6,26E-01
SO ₂ [kg]	1,77E+01	1,45E-01	5,58E-01	7,79E-02	2,02E-02	1,85E+01
PM (10 - 2.5) [kg]	1,41E+00	1,03E-02	1,14E-01	5,75E-03	7,69E-04	1,54E+00
Emiss. radioactives dans l'air [Bq I129-Equiv.]	5,41E+07	3,35E+05	1,51E+06	7,98E+05	2,04E+05	5,69E+07
Emiss. radioactives dans l'eau [Bq I129-Equiv.]	1,44E+08	2,38E+05	1,62E+06	2,02E+06	6,02E+04	1,48E+08
Résidus radioactifs [kg]	8,25E+00	3,65E-02	1,43E-01	1,15E-01	4,98E-03	8,55E+00
Déchets radioactifs [kg]	1,51E-02	4,70E-05	2,16E-04	2,11E-04	7,28E-06	1,56E-02
Déchets faiblement radioactifs [kg]	1,47E-01	7,51E-04	2,77E-03	2,07E-03	1,03E-04	1,53E-01
Déchets moyennement radioactifs [kg]	6,54E-02	3,78E-04	1,32E-03	9,21E-04	5,11E-05	6,81E-02

La figure suivante compare les indicateurs d'impact potentiels de la batterie à l'horizon 2012 avec la batterie à l'horizon 2020. Au regard de l'incertitude des données de la batterie à l'horizon 2020, les écarts inférieurs à 20% ne sont pas significatifs.

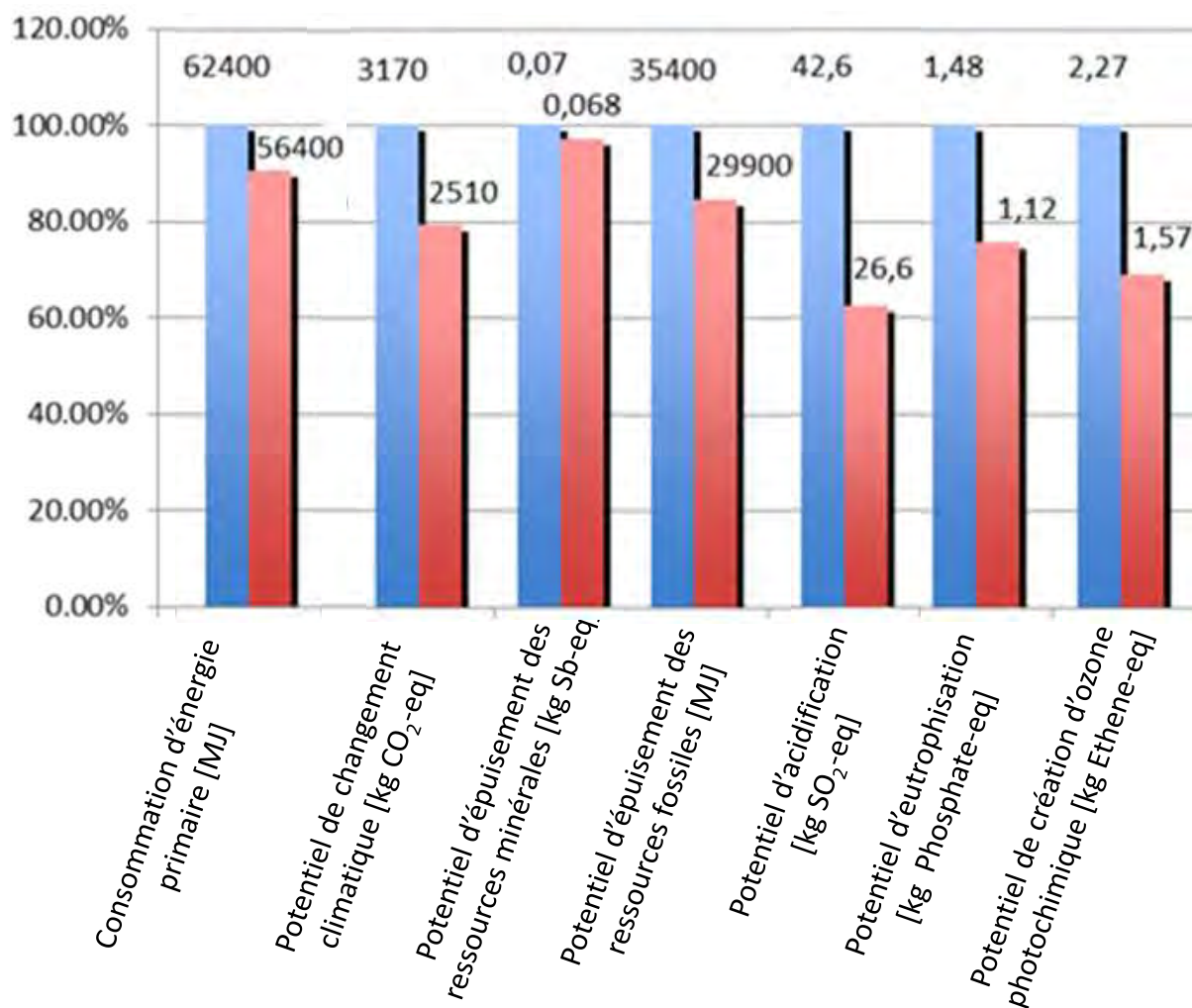


Figure 4-30 Comparaison des indicateurs d'impact des batteries 2012 et 2020

On remarque que la batterie 2020 est moins impactante que la batterie 2012, en raison de la moindre quantité du cobalt dans la matière active de la cathode mais surtout par l'intégration de la technologie Fer-phosphate développée à l'horizon 2020, qui présente des impacts environnementaux moindres comparés à ceux de la technologie NMC.

Sur les deux figures suivantes, on observe que les contributions des composants de la batterie à l'horizon 2020 sont identiques à celles de la batterie à l'horizon 2012 pour les indicateurs d'impact potentiels. La cathode des cellules de la batterie reste le composant le plus impactant à l'horizon 2020 même si sa contribution relative a légèrement baissée.

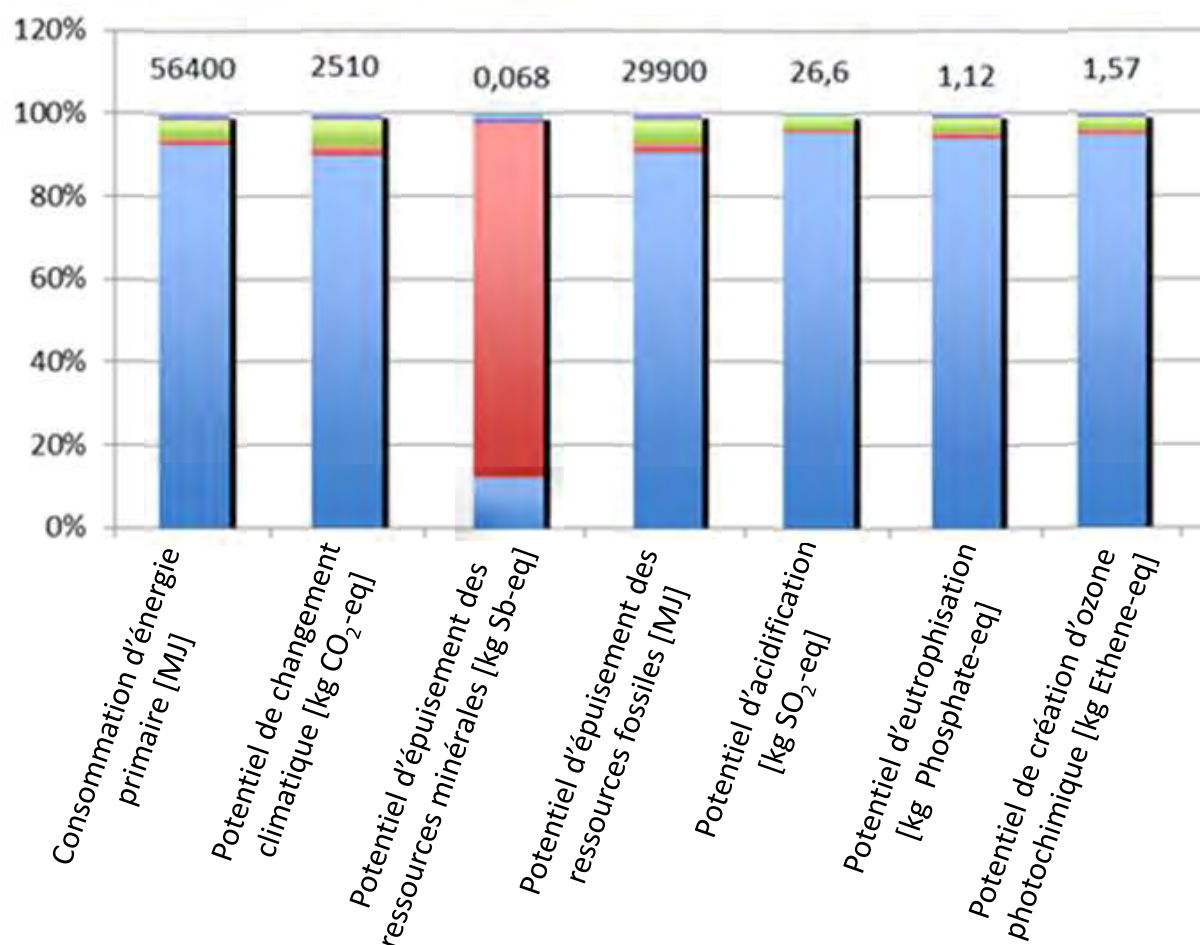


Figure 4-31 Répartition des indicateurs d'impacts de la batterie à l'horizon 2020

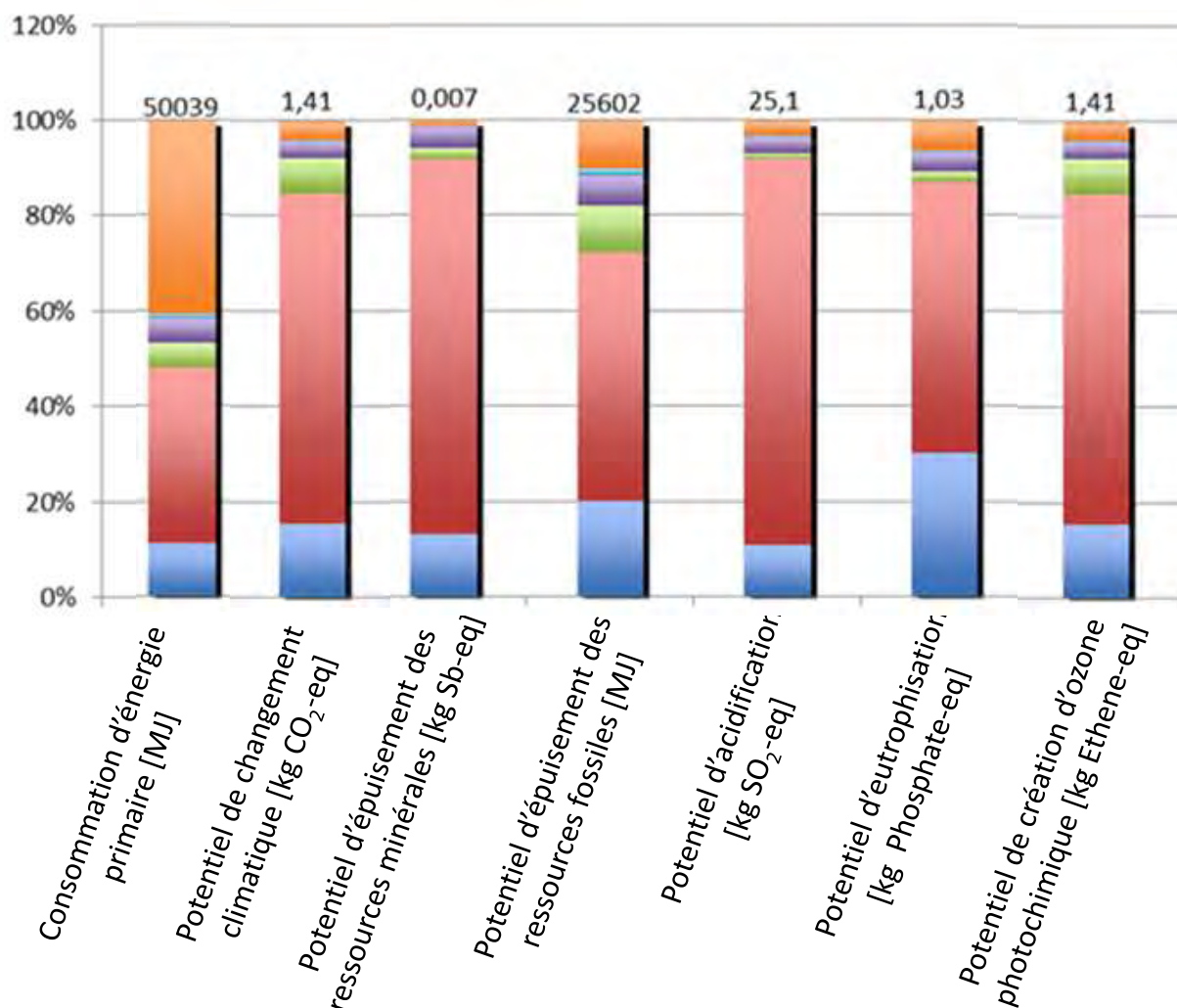


Figure 4-32 Répartition des indicateurs d'impact des cellules de la batterie à l'horizon 2020

Des représentations graphiques des flux d'inventaire des composants de la batterie à l'horizon 2020 sont disponibles en annexes. Les résultats affichés sont globalement identiques à ceux de la batterie à l'horizon 2012 pour les flux d'inventaire de cycle de vie. La contribution des modules est plus faible que celle de 2012, au profit de l'aluminium du boîtier et de l'électricité nécessaire à assembler la batterie.

L'électricité nécessaire à la fabrication de la batterie contribue fortement aux émissions radioactives dans l'eau et dans l'air et à la génération de déchets radioactifs en raison de l'énergie nucléaire utilisée en France. Les contributions de la cathode ont légèrement baissées par rapport au scénario 2012 au profit de l'anode et des composants passifs.

4.2.3 Utilisation 2012

L'utilisation comporte 2 phases :

- ✓ L'élaboration du carburant (essence ou Diesel pour le VT et électricité pour le VE) aussi appelée Well-to-Tank (du puit au réservoir),
- ✓ L'usage du véhicule, c'est à dire les émissions d'échappement du VT (il est considéré que le VE n'émet aucun polluant lorsqu'il roule). Cette étape est appelée Tank-to-Wheel (du réservoir à la roue).

Le scénario de référence a été élaboré à partir des émissions NEDC, fournies par les constructeurs pour les VT et les VE (voir chapitre 3).

Le tableau ci-dessous montre les valeurs des indicateurs d'impact potentiel Well-to-Tank et Tank-to-Wheel des différentes motorisations en 2012.

Tableau 4-3 indicateurs d'impact des VP en phase d'usage à l'horizon 2012

	VP elec 2012		VP Diesel 2012		VP essence 2012	
	Tank-to-Wheel	Well-to-Tank	Tank-to-Wheel	Well-to-Tank	Tank-to-Wheel	Well-to-Tank
Potentiel d'épuisement des ressources minérales [kg Sb-Equiv.]	0	0,0008	0	0,00072	0,00000	0,00075
Potentiel d'épuisement des ressources fossiles [MJ]	0	26941	0	247750	0	318722
Potentiel d'acidification [kg SO2-Equiv.]	0	8,60	10,79	21,78	2,33	22,99
Potentiel d'eutrophisation [kg Phosphate-Equiv.]	0	0,68	2,79	2,34	0,59	1,84
Potentiel de changement climatique [kg CO2-Equiv.]	0	2347	15975	2440	20325	2856
Potentiel de création d'ozone photochimique [kg Ethene-Equiv.]	0	0,59	5,05	2,66	4,57	3,17
Consommation d'énergie primaire totale [MJ]	0	212320	0	258573	0	338147

A l'horizon 2012, dans la phase d'utilisation, un véhicule Diesel et un véhicule essence présentent des similitudes dans leurs impacts environnementaux.

Pour chacun, le potentiel de changement climatique est fortement lié à l'usage et non à la production du carburant. Il en est de même pour le potentiel de création d'oxydant photochimique et le potentiel d'eutrophisation.

A l'inverse, les potentiels d'épuisement des ressources naturelles fossiles et minérales et d'acidification atmosphérique viennent majoritairement de la production du carburant.

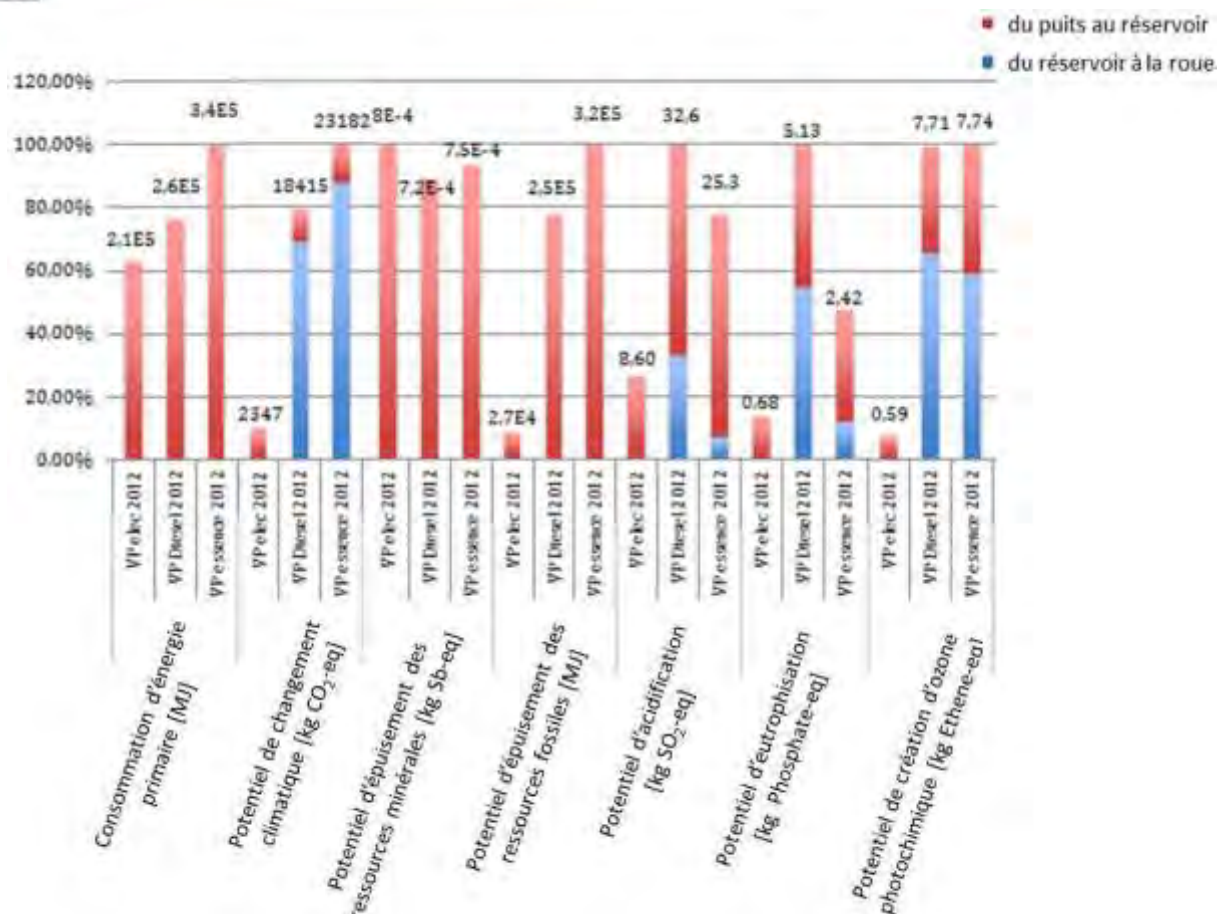


Figure 4-33 Comparaison des indicateurs d'impact de la phase d'usage des VP à l'horizon 2012

De cette figure, il ressort que les véhicules conventionnels sont plus impactants que le véhicule électrique sur la phase d'usage sur l'ensemble des impacts potentiels calculés.

Les valeurs des flux d'inventaire en phase d'usage sont disponibles en annexes.

Pour les flux d'inventaire, les émissions de CO, de CO₂ et de COV sont principalement générées lors de l'utilisation du véhicule. A l'inverse, la plupart des autres flux sont liés à la production du carburant.

Seul le flux de NO_x présente des différences selon que le véhicule est essence ou Diesel. Dans le cas d'un véhicule Diesel, les NO_x sont essentiellement générés pendant la phase d'utilisation, alors que la production de l'essence est responsable des émissions de NO_x pour le véhicule essence. Cela s'explique par le fait qu'un moteur Essence est aujourd'hui doté d'un régulateur électronique de la richesse pour fonctionner le plus possible en combustion complète et génère ainsi peu de NO_x, alors que cela est inapplicable sur des moteurs Diesel, où le taux d'oxygène résiduel entraîne un taux de NO_x élevé, même après l'utilisation de post-traitements.

Le véhicule électrique dans un scénario français se remarque par les différents flux radioactifs (émissions, déchets) qui surpassent largement les flux radioactifs engendrés par les véhicules conventionnels.

A l'inverse, les véhicules thermiques sont très nettement responsables des émissions de CO₂, CO, PM, NO_x, COVs et de la consommation en énergie primaire.

Les indicateurs d'impact potentiel et les flux d'inventaire Well-to-Tank et Tank-to-Wheel des VUL en phase d'usage sont disponibles en annexes. Les conclusions sont identiques à celles du VP.

4.2.4 Utilisation 2020

Pour les scénarios d'usage, les contributions de l'élaboration du carburant et de la conduite pour les VT sont dans l'ensemble semblables à celles détaillées dans les scénarios d'utilisation à l'horizon 2012. En effet, l'élaboration du carburant est la même aux horizons 2012 et 2020 et les différences entre les normes d'émissions Euro 5 et Euro 6 sont très faibles (seules les émissions de NO_x pour les véhicules Diesel sont réduites). Cependant, la diminution de la consommation des VT entraîne une réduction des écarts. Les comparaisons des indicateurs d'impact et des flux de l'inventaire pour les véhicules Diesel et essence sont disponibles en annexe.

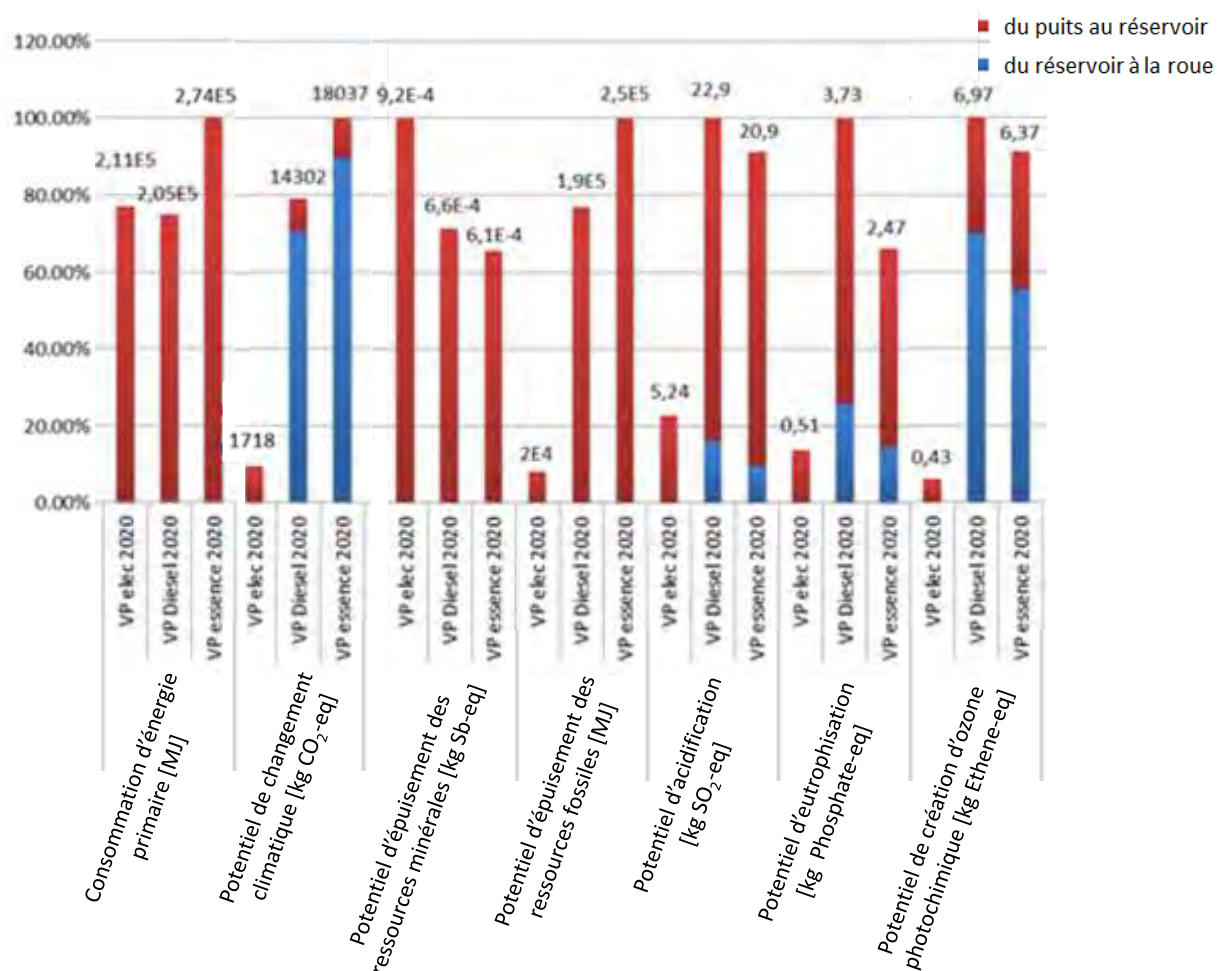


Figure 4-34 Comparaison du réservoir à la roue et du puit au réservoir pour un VP à l'horizon 2020

Contrairement au scénario 2012, le VT possède un potentiel d'épuisement des ressources minérales moins important que les VE comme le montre la figure précédente.

L'extraction des matières premières nécessaires à la production électrique (uranium pour la France) et la diminution de la consommation des VT expliquent cet écart. Ce constat est conforté par la génération importante de déchets radioactifs et d'émissions radioactives dans l'air et dans l'eau pour les scénarios des véhicules électriques (voir le tableau des flux d'inventaire en annexes).

En revanche, la production des carburants (Diesel et essence) des VT induit un potentiel d'épuisement des ressources fossiles (extraction du pétrole) plus important que celui du VE.

Pour les potentiels de changement climatique, d'eutrophisation et de création d'ozone photochimique les VT affichent des bilans supérieurs au VE. En effet, les émissions de CO₂, de NO_x, de particules fines et de COV sont importantes pour les VT, tout comme les émissions de CO.

En raison de la diminution de la consommation des VT, la consommation totale d'énergie primaire du VE en phase d'usage dépasse celle du véhicule Diesel (mais pas celle du véhicule essence).

Les indicateurs d'impact potentiel et les flux d'inventaire Well-to-Tank et Tank-to-Wheel des VUL en phase d'usage sont disponibles en annexes. Les conclusions sont identiques à celles du VP.

4.2.5 Fin de vie

Pour les scénarios de base 2012 et 2020 la méthode des stocks est utilisée pour modéliser la fin de vie (voir Chapitre 2.5.3.1).

Ainsi, on ne considère aucun impact (ni positif, ni négatif) lorsque de la matière récupérée est envoyée vers le stock ou lorsque de la matière récupérée est prélevée du stock. Cela signifie que :

- ✓ Les impacts liés à la production de matière vierge sont portés par le produit qui utilise cette matière vierge,
- ✓ Les impacts liés à la collecte et au procédé de recyclage (transformation de la matière récupérée en matière première secondaire utilisable) sont portés par le produit qui utilise la matière recyclée,
- ✓ Aucun impact n'est porté par la matière récupérée issue du stock et utilisée pour produire le matériau recyclé via le procédé de recyclage,
- ✓ Aucun crédit n'est attribué à la matière envoyée vers le stock.

De ce fait, les impacts (positifs et négatifs) potentiels de la fin de vie n'ont pas été calculés dans les scénarios de base 2012 et 2020. Cependant, un scénario utilisant la méthode des impacts évités (voir Chapitre 2.5.3.2) a été calculé (Chapitre 4.3.3).

4.3 Etude des sources d'incertitudes

L'objectif de ce chapitre est d'assurer la complétude, la cohérence et la robustesse des résultats. Pour cela, plusieurs étapes ont été réalisées.

Une analyse de sensibilité a été effectuée pour identifier les paramètres du scénario de référence les plus influents sur les résultats finaux.

Une analyse d'incertitude a ensuite été menée en utilisant les valeurs minimales et maximales des paramètres influents afin de calculer les effets cumulés sur les résultats finaux. Nous avons considéré des lois de distribution uniformes des paramètres d'entrée et un modèle de cycle de vie linéaire.

Seuls les résultats pour le véhicule particulier à l'horizon 2012 sont présentés et explicités dans ce chapitre car ils sont également représentatifs des autres scénarios. Les résultats des autres scénarios sont présentés en annexe et résumés dans ce chapitre.

4.3.1 Analyse de sensibilité aux bouquets électriques

4.3.1.1 Electricité en 2012

Le bouquet électrique n'impactant que la phase d'usage, nous présentons dans le tableau suivant les indicateurs d'impact potentiel et les flux d'inventaire des différents scénarios électriques considérés uniquement pour la phase d'usage. Les VT essence et diesel ont été ajoutés pour considérer l'influence du bouquet électrique dans la comparaison VE / VT.

Tableau 4-4 Indicateurs d'impact potentiel et flux d'inventaire en phase d'usage des différents scénarios électriques à l'horizon 2012

	VP elec 2012 FRA	VP elec 2012 UE27	VP elec 2012 ALL	VP elec 2012 GB	VP elec 2012 ESP	VP elec 2012 ITA	VP elec 2012 Green Mix	VP diesel 2012	VP essence 2012	max
Consommation d'énergie primaire totale [MJ]	212320,3915	209050,9883	219444,9846	205040,9927	202381,92	200086,7956	155146,4868	258572,6074	338147,3796	338147,3796
Potentiel de changement climatique [kg CO2-Equiv.]	2347,360471	10445,952	13324,86599	12516,25166	9532,583088	11767,0679	2986,395392	18414,52219	23181,45698	23181,45698
Potentiel d'épuisement des ressources minérales [kg Sb-Equiv.]	0,000803842	0,000856555	0,00109334	0,000176512	0,000699086	0,001134955	0,001998962	0,00071564	0,000751033	0,001998962
Potentiel d'épuisement des ressources fossiles [MJ]	26941,01673	119035,2813	133610,2571	158742,623	121158,7377	154353,8866	27978,66563	247749,9111	318721,5065	318721,5065
Potentiel d'acidification [kg SO2-Equiv.]	8,602156323	44,51882701	22,10632133	43,33990781	46,85957561	27,52963624	21,38587958	32,56463401	25,31603177	46,85957561
Potentiel d'entrophisation [kg Phosphate-Equiv.]	0,682635056	2,389906763	2,120232729	3,752612582	2,460422707	1,813011997	1,433547298	5,129477095	2,420617535	5,129477095
Potentiel de création d'ozone photochimique [kg Ethene-Equiv.]	0,586787739	2,708161032	1,628250756	2,400313603	3,38555255	2,291806917	1,21840423	7,706935532	7,740662016	7,740662016
CO [kg]	1,126517383	5,990255979	6,282888285	5,0422768	4,35952448	5,033801482	6,859607219	46,72214938	47,25250389	47,25250389
CO2 [kg]	2464,644947	10843,38679	14482,73493	12643,55262	9193,373998	11673,60643	6749,551284	18609,12444	24123,98	24123,98
NOx [kg]	4,380527552	16,90359567	13,70604901	27,173319	17,94125746	12,95702199	9,446481863	28,15244079	13,44222666	28,15244079
COV [kg]	0,237391777	0,557440837	0,338737372	0,426607034	1,621806094	0,872667832	0,217395681	11,89352237	12,29418031	12,29418031
SO2 [kg]	5,180238163	28,68956177	11,31612517	21,39394868	31,18849588	14,57806942	9,823219144	12,51117307	15,0741728	31,18849588
PM (10 - 2.5) [kg]	0,059791255	0,231739598	0,107673427	0,149068877	0,212237901	0,220717174	0,098956804	0,408534922	0,439145519	0,439145519
Emiss. radioactives dans l'air [Bq I129-Equiv.]	359221526,3	258199320,5	209479606,4	380250803,2	148182369,2	78734060,21	529031,4797	4378675,597	5051319,075	380250803,2
Emiss. radioactives dans l'eau [Bq I129-Equiv.]	1236263294	295809559,2	128581535,4	129577055,6	114830508,7	79264573,98	359286,0073	4585341,39	5222110,142	1236263294
Résidus radioactifs [kg]	68,30913294	25,31006426	21,28889364	14,70742126	17,31411033	6,057128329	0,048206941	0,432849949	0,499506779	68,30913294
Déchets faiblement radioactifs [kg]	1,217638672	0,493061271	0,448977399	0,298178708	0,35182171	0,115592604	0,000980817	0,00843664	0,009740551	1,217638672
Déchets moyennement radioactifs [kg]	0,536127979	0,236479502	0,231105472	0,15124807	0,172686902	0,053884707	0,000484961	0,004024623	0,004645599	0,536127979
Déchets radioactifs [kg]	0,127216434	0,038865528	0,027159482	0,019792458	0,022182158	0,009606297	6,36844E-05	0,00063771	0,0007321	0,127216434

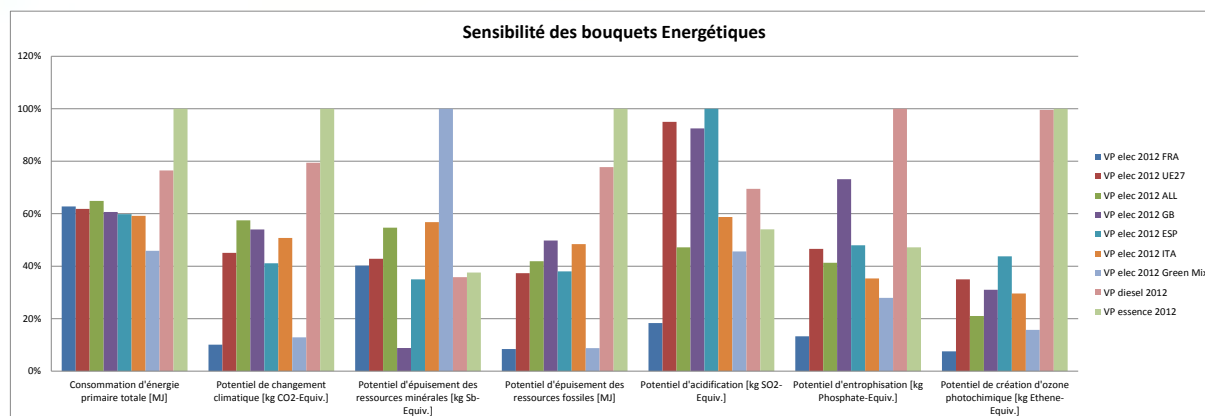


Figure 4-35 Répartition des bilans environnementaux pour un VE en phase d'usage à l'horizon 2012 pour les 5 pays étudiés et pour le bouquet moyen européen (EU27)

Cette figure permet de jauger de la sensibilité du mix électrique sur la comparaison des impacts potentiels induits par l'utilisation d'un VE par rapport au VT essence et diesel.

Nous pouvons observer que l'usage d'un véhicule électrique en France, en comparaison au maximum des différents bouquets énergétiques considérés contribue principalement au potentiel d'épuisement des ressources naturelles minérales du fait de l'extraction de l'uranium.

Dans le cas de l'usage d'un VE en Allemagne, en comparaison au maximum des différents bouquets énergétiques considérés, la phase d'utilisation contribue :

- Principalement au potentiel d'épuisement des ressources naturelles fossiles et minérales du fait de l'extraction de l'uranium, du charbon et d'autres ressources fossiles,
- Fortement au potentiel de changement climatique dû entre autres, aux émissions de CO₂ lors de la combustion du charbon,
- Au potentiel d'acidification atmosphérique, au potentiel d'eutrophisation, à la création d'oxydant photochimique.

On observe également que dans le cas du scénario du Green Mix, les potentiels d'impact sont presque tous inférieurs à ceux pour les autres mix électriques. Seul le potentiel d'épuisement des ressources naturelles se distingue en étant le plus élevé. Cela peut s'expliquer par l'utilisation de ressources minérales pour certaines énergies renouvelables comme le silicium pour les panneaux photovoltaïques.

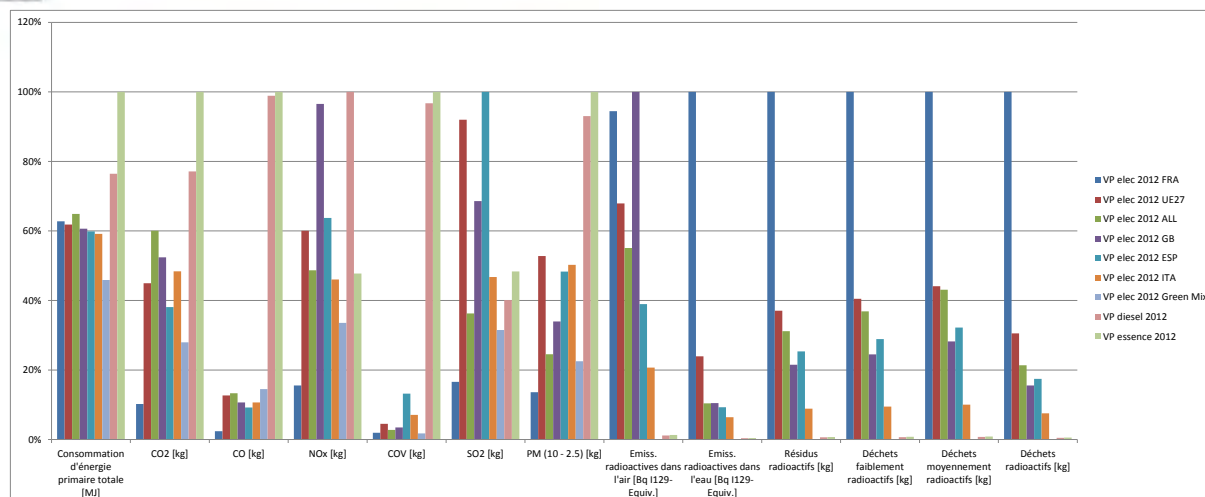


Figure 4-36 Répartition des flux d'inventaire pour un VE en phase d'usage à l'horizon 2012 pour les 5 pays étudiés et pour le bouquet moyen européen (EU27)

On observe sur cette figure que l'utilisation du véhicule électrique en France, en comparaison au maximum des différents bouquets énergétiques considérés contribue dans une moindre mesure aux émissions de CO₂, de CO, de NO_x, de PM, de SO₂ et de COV. En revanche, elle conduit à une importante consommation d'énergie primaire, et contribue fortement à des émissions radioactives, ainsi qu'à la génération de déchets radioactifs.

Dans le cas d'un VE en Allemagne, en comparaison au maximum des différents bouquets énergétiques considérés, la phase d'utilisation contribue dans une moindre mesure aux émissions radioactives, à la génération de déchets radioactifs, aux émissions de particules fines. En revanche, elle conduit à une importante consommation d'énergie primaire, et à d'importantes émissions de CO₂ (100%), et de CO (100%).

L'analyse de sensibilité sur les bouquets électriques permet ainsi d'isoler les mix les plus intéressants pour l'analyse d'incertitude. Nous retiendrons en effet les bouquets électriques 'Green Mix', Français et Allemand pour étudier le cumul des effets induits par les variabilités des paramètres d'entrée.

4.3.1.2 Electricité en 2020

Tableau 4-5 Indicateurs d'impact potentiel et flux d'inventaire en phase d'usage des différents scénarios électriques à l'horizon 2020

	VP elec 2020 FRA	VP elec 2020 FRA (pré-grenelle)	VP elec 2020 FRA (AM)	VP elec 2020 UE27	VP diesel 2020	VP essence 2020
Consommation d'énergie primaire totale [MJ]	211186,3738	214087,8866	210573,3664	208846,5704	205395,3907	274456,2246
Potentiel de changement climatique [kg CO2-Equiv.]	1717,627737	2870,718846	974,1014158	9307,386984	14301,95206	18037,11583
Potentiel d'épuisement des ressources minérales [kg Sb-Equiv.]	0,000921328	0,001252613	0,001145547	0,001450385	0,000658226	0,00060587
Potentiel d'épuisement des ressources fossiles [MJ]	20427,16047	33923,4652	9816,707817	105482,9352	190690,2753	247238,387
Potentiel d'acidification [kg SO2-Equiv.]	5,240931782	11,00329336	3,651802495	40,8837301	22,94836722	20,93734875
Potentiel d'entrophisation [kg Phosphate-Equiv.]	0,513482222	0,871646243	0,371828889	2,187667935	3,732063578	2,473795711
Potentiel de création d'ozone photochimique [kg Ethene-Equiv.]	0,425536579	0,779988424	0,284665188	2,487605039	6,974087723	6,373998754
CO [kg]	1,423749167	2,397881872	1,270490708	6,527484183	67,10564242	37,5987183
CO2 [kg]	2089,071199	3487,398259	1433,107046	10165,44755	14897,26983	19814,62139
NOx [kg]	3,181588825	5,703010706	2,165268946	15,4444125	12,92250701	12,17293952
VOC [kg]	0,210370659	0,299673961	0,150576563	0,444526908	10,33741725	10,34887914
SO2 [kg]	2,684496353	6,148171713	1,76077667	26,17251332	9,614682521	11,85626783
PM (10 - 2.5) [kg]	0,03904166	0,077755116	0,03188772	0,230121336	0,345593882	0,34536372
Emiss. radioactives dans l'air [Bq I129-Equiv.]	338294371,6	321215842,6	347455752	606272839,3	3594207,162	4202336,164
Emiss. radioactives dans l'eau [Bq I129-Equiv.]	1157867214	1096201612	1188400679	153328423,3	3654442,934	4200218,596
Résidus radioactifs [kg]	63,98584983	60,59486689	65,66335	21,47454455	0,356232818	0,416515853
Déchets faiblement radioactifs [kg]	1,140621989	1,080229504	1,170497385	0,454468898	0,006983719	0,008177252
Déchets moyennement radioactifs [kg]	0,502239626	0,475669916	0,515382967	0,22991876	0,003351598	0,00392747
Déchets radioactifs [kg]	0,11915343	0,112820916	0,122286061	0,026888212	0,000519612	0,000603807

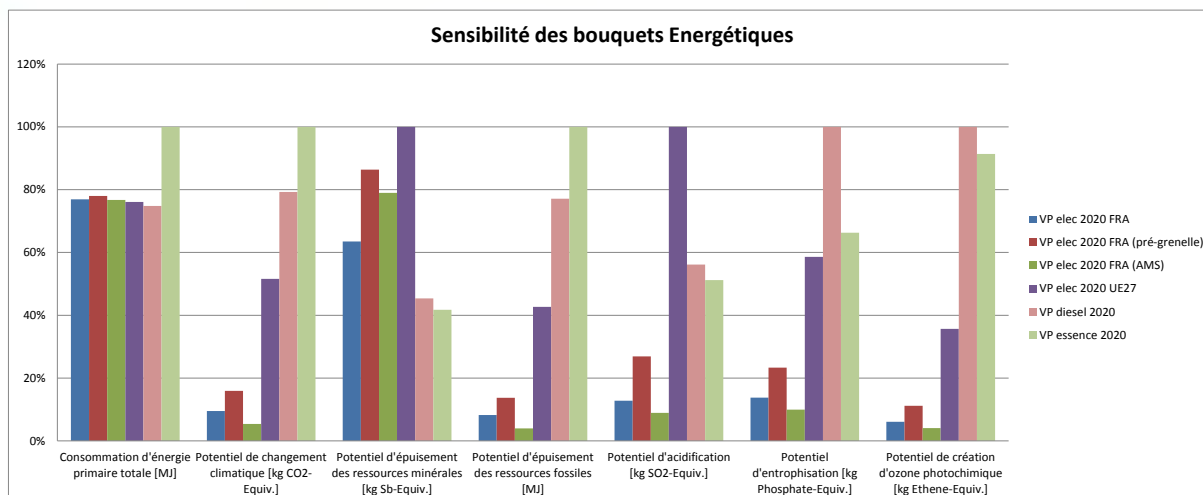


Figure 4-37 Répartition des bilans environnementaux pour un VE en phase d'usage à l'horizon 2012 pour les 5 pays étudiés et pour le bouquet moyen européen (EU27)

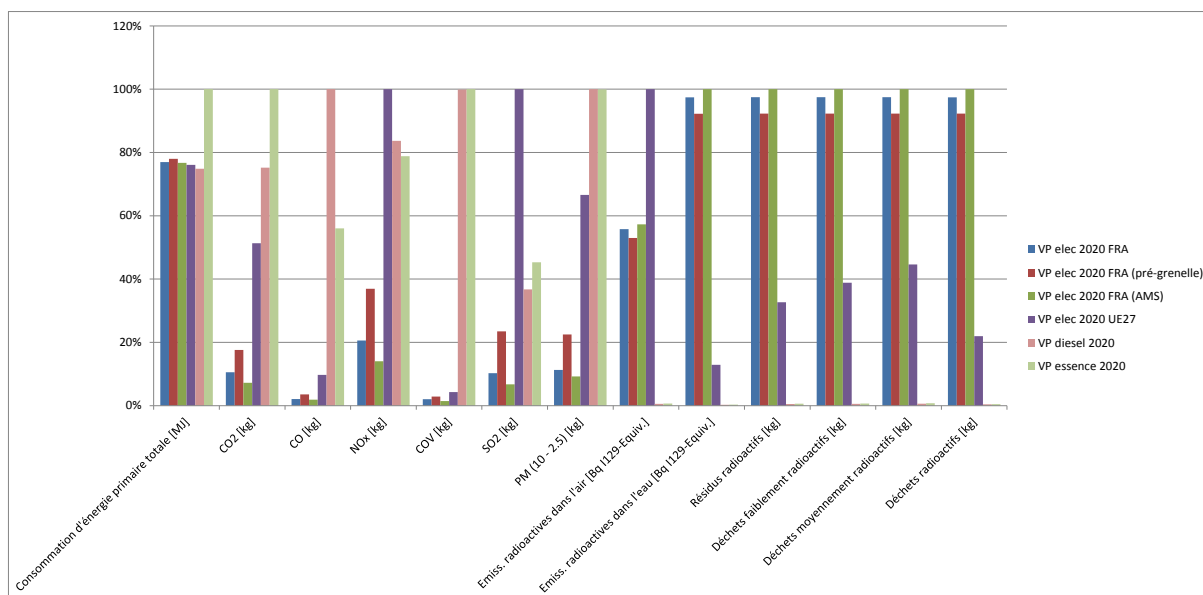


Figure 4-38 Répartition des flux d'inventaire pour un VE en phase d'usage à l'horizon 2020

Les résultats obtenus à l'aide des scénarios électriques seront intégrés dans le cycle de vie complet du véhicule dans le Chapitre 4.3.4.

4.3.1.1 Comportements d'usage et Smart Grids

Pour le cas de base, nous considérons que le véhicule électrique est chargé en mode lent ce qui revient environ à 6h de recharge (8 heures maximum pour une charge complète) à tout moment de la journée. C'est pourquoi un mix moyen électrique est utilisé dans cette étude.

Si le chargement rapide se développe ou si le nombre de véhicules devient important, alors dans une logique de management du réseau électrique et dans une logique environnementale, il sera nécessaire d'éviter les chargements des véhicules en période de pic de consommation, par exemple, en début de soirée lors des journées les plus froides. Cela sera possible avec le développement des « réseaux intelligents » ou smart grids⁵⁴.

Le tableau suivant montre le mix électrique moyen en France ainsi que le scénario de base et le cas d'un pic de consommation. Ces données sont basées sur les valeurs publiées par RTE pour la consommation d'électricité en France sur la période du 1^{er} Mai 2011 au 30 Avril 2012.

Tableau 4-6 Mix électrique Français 2011-2012 : moyenne, scénario de base et pic de consommation

	Pétrole (plus pic de consomma- tion)	Charbon	Gaz	Nucléaire	Eolien	Hydro	Autre
Moyenne	0,3%	2,7%	2,7%	78,6%	2,3%	7,7%	5,8%
Scénario de base	0,1%	1,8%	2,1%	83,2%	2,3%	6,1%	4,5%
Pic (en plus du cas de base)	9,3%	9,3%	6,4%	39,7%	3,6%	22,0%	9,5%

Source : RTE, Mai 2011 à April 2012

Même si l'énergie nucléaire et l'énergie hydraulique atteignent régulièrement des pics de consommations, la teneur en carbone à cette période particulière de l'année est bien plus grande que d'habitude, typiquement multipliée par un facteur 3.

C'est pourquoi les résultats présents pour le cas de base sont très sensibles aux hypothèses prises pour le temps moyen de recharge par jour.

Le développement du véhicule électrique devra ainsi être accompagné par le développement des réseaux intelligents, bien que cela ne fasse pas partie de la présente étude.

4.3.2 Analyse de sensibilité aux cycles de conduite

Dans ce chapitre, les scénarios ont été élaborés à partir des émissions issues de l'outil HBEFA 3.1 (voir chapitre 3).

Des émissions ont été calculées pour les véhicules Diesel et essence. En revanche, aucun calcul n'était disponible pour les véhicules électriques. Ainsi les bilans des scénarios HBEFA des VT ne seront pas comparés aux bilans des scénarios de

⁵⁴ A smart grid is a digitally enabled [electrical grid](#) that gathers, distributes, and acts on information about the behavior of all participants (suppliers and consumers) in order to improve the efficiency, importance, reliability, economics, and sustainability of electricity services (wikipedia).

référence pour le VE, pouvant induire des écarts important en faveur du VE. Il existe peu de retour sur la consommation électrique (et donc l'autonomie) des VE sur des cycles de conduite autre que NEDC. Une étude ADEME⁵⁵ actuellement en cours et réalisée par l'IFPEN a pour objectif d'identifier les variations de consommation sur différents cycles de conduite, plus représentatifs du comportement du conducteur. Ces données ne sont cependant pas encore communicables. Les bilans des indicateurs d'impact entre les scénarios NEDC et HBEFA sont dans les mêmes ordres de grandeur (voir ci-dessous). Ainsi, l'interprétation des scénarios HBEFA comparés aux VE ne serait pas différente de celle réalisée plus haut (VT NEDC comparé aux VE).

⁵⁵ CONSOVEX

4.3.2.1 Véhicule Diesel

Le tableau suivant présente les indicateurs d'impact et les flux d'inventaire des VP Diesel pour le cycle de conduite moyen issu de l'outil HBEFA 3.1 et le cycle NEDC (utilisé dans le scénario de référence).

Tableau 4-7 Indicateurs d'impact et flux d'inventaire de la phase d'usage des véhicules Diesel (cycle HBEFA et NEDC) à l'horizon 2012

	VP Diesel 2012 HBEFA		VP Diesel 2012 NEDC	
	Tank-to-Wheel	Well-to-Tank	Tank-to-Wheel	Well-to-Tank
Potentiel d'épuisement des ressources minérales [kg Sb-Equiv.]	0,0000	0,0007	0,0000	0,0007
Potentiel d'épuisement des ressources fossiles [MJ]	0	249793	0	247750
Potentiel d'acidification [kg SO ₂ -Equiv.]	39,66	21,96	10,79	21,78
Potentiel d'entrophisation [kg Phosphate-Equiv.]	10,30	2,36	2,79	2,34
Potentiel de changement climatique [kg CO ₂ -Equiv.]	17700	2460	15975	2440
Potentiel de création d'ozone photochimique [kg Ethene-Equiv.]	2,85	2,68	5,05	2,66
Consommation d'énergie primaire totale [MJ]	0	260705	0	258573
Consommation d'énergie primaire renouvelable [MJ]	0	9815	0	9734
Consommation d'énergie primaire non renouvelable [MJ]	0	250890	0	248838
CO [kg]	3,00	3,32	43,43	3,30
CO ₂ [kg]	17700	2656	15975	2634
NO _x [kg]	79,20	6,76	21,45	6,70
COV [kg]	1,50	2,92	9,00	2,89
SO ₂ [kg]	0,05	12,56	0,05	12,46
PM (10 - 2.5) [kg]	0,00	0,41	0,00	0,41
Emiss. radioactives dans l'air [Bq I129-Equiv.]	0	4414780	0	4378676
Emiss. radioactives dans l'eau [Bq I129-Equiv.]	0	4623150	0	4585341
Résidus radioactifs [kg]	0,00	0,44	0,00	0,43
Déchets faiblement radioactifs [kg]	0,00	0,01	0,00	0,01
Déchets moyennement radioactifs [kg]	0,00	0,00	0,00	0,00
Déchets radioactifs [kg]	0,00	0,00	0,00	0,00

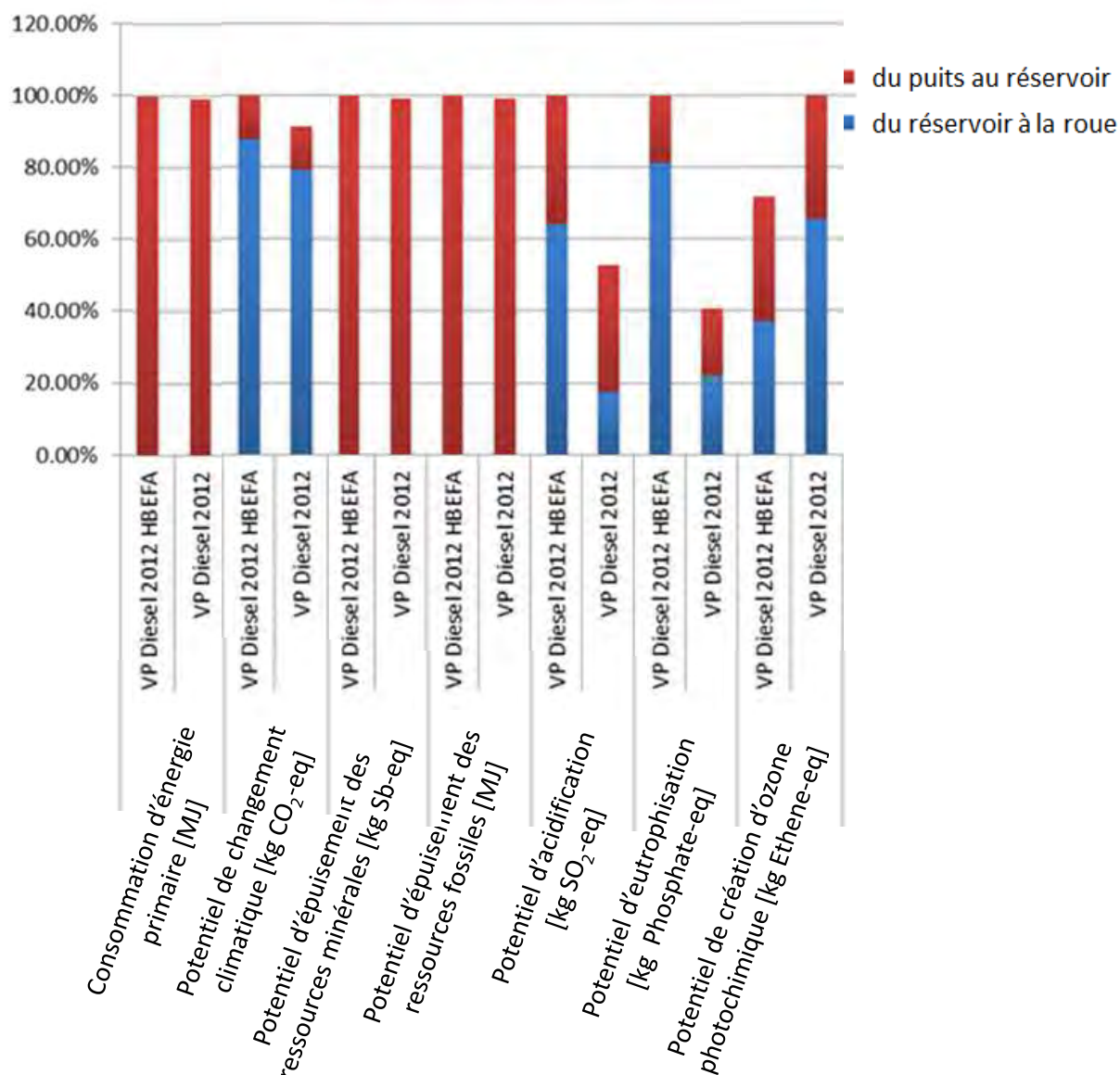


Figure 4-39 Comparaison des indicateurs d'impact des VP Diesel des scénarios NEDC et HBEFA à l'horizon 2012

Le VP Diesel sur cycle de conduite HBEFA affiche des potentiels d'acidification et d'eutrophisation supérieurs au VP Diesel sur cycle NEDC en raison des émissions plus importantes de NO_x (86 kg de NO_x émis sur cycle HBEFA contre 28kg pour le cycle NEDC). Les émissions de CO₂ du cycle HBEFA sont supérieures à celles du cycle NEDC (20,3t contre 18,6t) ce qui explique l'écart au niveau du potentiel de changement climatique. En revanche, les faibles émissions de COV du cycle HBEFA justifient la valeur modérée du potentiel de création d'ozone photochimique par rapport au cycle NEDC.

On observe dans le tableau ci-dessus que les émissions de CO du cycle HBEFA sont très faibles par rapport à celles du cycle NEDC.

Les tendances des indicateurs d'impact et de flux d'inventaire des 2 scénarios d'usage pour le VUL Diesel sont identiques à celles présentées plus haut pour les VP Diesel.

Les indicateurs d'impact et flux d'inventaire des VUL Diesel en phase d'usage (cycles HBEFA et NEDC) sont disponibles en annexes.

4.3.2.2 Véhicule essence

Le Tableau suivant présente les indicateurs d'impact et les flux d'inventaire des VP essence pour le cycle de conduite moyen issu de l'outil HBEFA 3.1 et le cycle NEDC (utilisé dans le scénario de référence).

Tableau 4-8 Indicateurs d'impact et flux d'inventaire de la phase d'usage des véhicules essence (cycle HBEFA) à l'horizon 2012

	VP essence 2012 HBEFA		VP essence 2012 NEDC	
	Tank-to-Wheel	Well-to-Tank	Tank-to-Wheel	Well-to-Tank
Potentiel d'épuisement des ressources minérales [kg Sb-Equiv.]	0,0000	0,0007	0,0000	0,0008
Potentiel d'épuisement des ressources fossiles [MJ]	0	317385	0	318722
Potentiel d'acidification [kg SO ₂ -Equiv.]	4,28	22,89	2,33	22,99
Potentiel d'entrophisation [kg Phosphate-Equiv.]	1,09	1,83	0,59	1,84
Potentiel de changement climatique [kg CO ₂ -Equiv.]	20325	2844	20325	2856
Potentiel de création d'ozone photochimique [kg Ethene-Equiv.]	2,90	3,16	4,57	3,17
Consommation d'énergie primaire totale [MJ]	0	336730	0	338147
Consommation d'énergie primaire renouvelable [MJ]	0	18056	0	18132
Consommation d'énergie primaire non renouvelable [MJ]	0	318674	0	320016
CO [kg]	84,30	4,18	43,05	4,20
CO ₂ [kg]	20325	3783	20325	3799
NO _x [kg]	8,40	8,90	4,50	8,94
COV [kg]	1,05	3,28	9,00	3,29
SO ₂ [kg]	0,07	14,94	0,07	15,01
PM (10 - 2.5) [kg]	0,00	0,44	0,00	0,44
Emiss. radioactives dans l'air [Bq I129-Equiv.]	0	5030140	0	5051319
Emiss. radioactives dans l'eau [Bq I129-Equiv.]	0	5200215	0	5222110
Résidus radioactifs [kg]	0,00	0,50	0,00	0,50
Déchets faiblement radioactifs [kg]	0,00	0,01	0,00	0,01
Déchets moyennement radioactifs [kg]	0,00	0,00	0,00	0,00
Déchets radioactifs [kg]	0,00	0,00	0,00	0,00

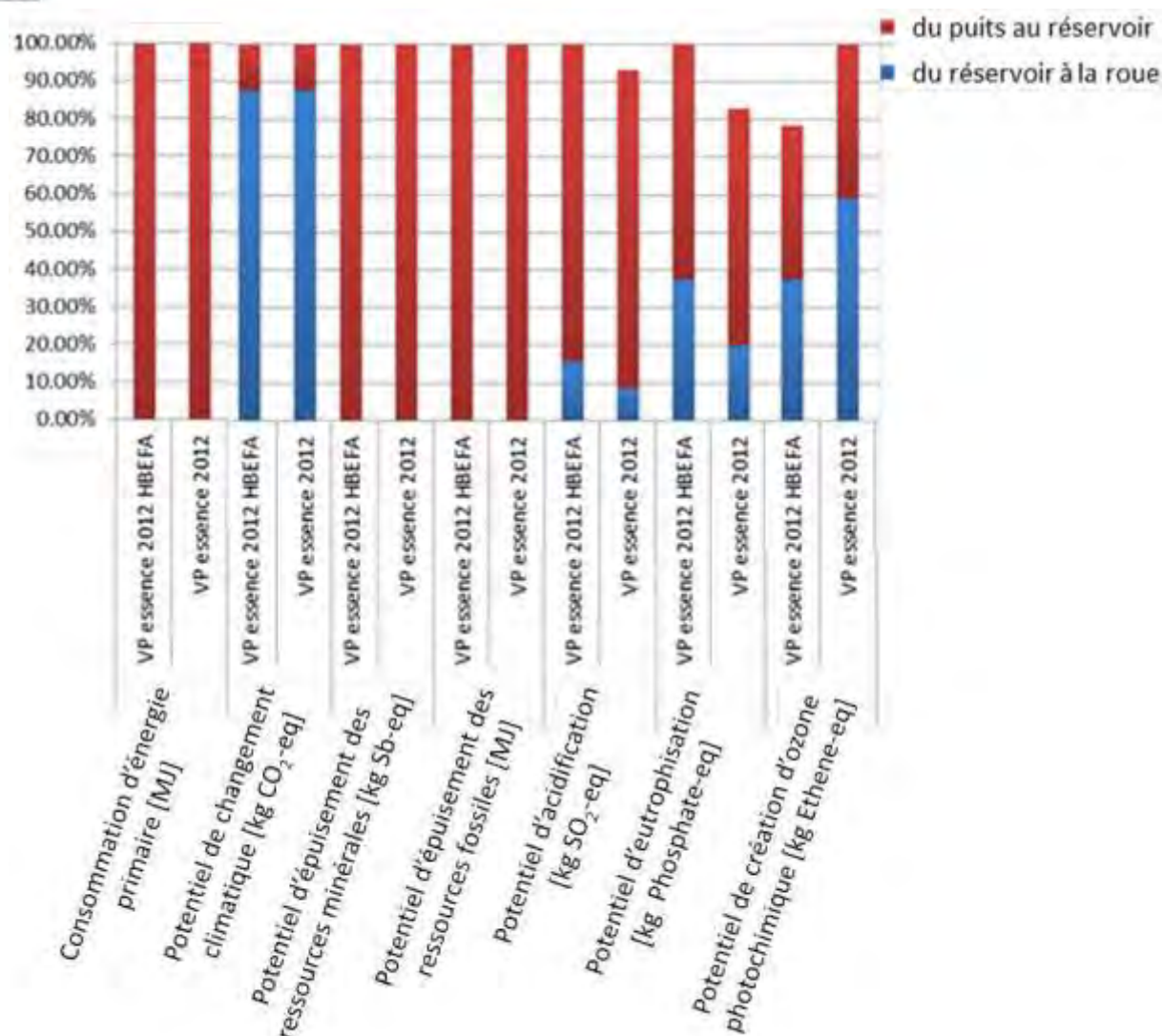


Figure 4-40 Comparaison des indicateurs d'impact des VP essence des scénarios NEDC et HBEFA à l'horizon 2012

Le VP essence sur cycle de conduite HBEFA affiche des potentiels d'acidification et d'eutrophisation supérieurs au VP essence cycle NEDC en raison des émissions plus importantes de NOx (17,3 kg de NOx émis avec un cycle HBEFA contre 13,4kg pour le cycle NEDC).

En revanche, les faibles émissions de COV du cycle HBEFA expliquent les valeurs modérées du potentiel de création d'ozone photochimique par rapport au cycle NEDC.

Contrairement aux véhicules Diesel, on observe que les émissions de CO du cycle HBEFA sont très significatives en comparaison à celles sur cycle NEDC.

Les tendances des indicateurs d'impact et des flux d'inventaire des 2 scénarios d'usage pour le VUL essence sont identiques à celles présentées plus haut pour les VP essence. Les indicateurs d'impact et flux d'inventaire des VUL Diesel en phase d'usage (cycles HBEFA et NEDC) sont disponibles en annexes.

L'analyse de sensibilité sur les cycles de conduite met en évidence les variations sur les potentiels d'impact et sur les valeurs des flux d'inventaire. Nous constatons que les valeurs de consommation issues des essais d'homologation sur cycle NEDC correspondent aux valeurs les plus basses. Pour l'analyse d'incertitude, nous considérons le cycle NEDC comme le scénario minimum. Pour définir des scénarios maximum, différentes fonctionnalités pour le VE et le VT sont prises en compte afin de se rapprocher d'un usage réel.

4.3.3 Analyse de sensibilité des scénarios de fin de vie

4.3.3.1 Scénario 2012

Le scénario de référence utilise la méthode des stocks pour modéliser la fin de vie des véhicules. Les tableaux ci-dessous présentent les indicateurs d'impact potentiel et les flux d'inventaire du scénario de fin de vie alternatif utilisant la méthode des « Impacts évités » des véhicules particuliers thermiques et électriques.

Les mêmes tableaux pour les VUL sont disponibles en annexes.

Tableau 4-9 indicateurs d'impact potentiel et flux d'inventaire du scénario de fin de vie "Impacts évités" pour les VP thermique à l'horizon 2012.

VP VT 2012	Impacts évités	Recyclage	Total
Potentiel d'épuisement des ressources minérales [kg Sb-Equiv.]	-0,077	0,002	-0,075
Potentiel d'épuisement des ressources fossiles [MJ]	-28874	3921	-24953
Potentiel d'acidification [kg SO ₂ -Equiv.]	-7,86	1,09	-6,77
Potentiel d'eutrophisation [kg Phosphate-Equiv.]	-0,45	0,19	-0,26
Potentiel de changement climatique [kg CO ₂ -Equiv.]	-2098	619	-1479
Potentiel de création d'ozone photochimique [kg Ethene-Equiv.]	-1,04	0,05	-0,99
Consommation d'énergie primaire totale [MJ]	-32708	5394	-27314
Consommation d'énergie primaire non renouvelable [MJ]	-31483	4909	-26574
Consommation d'énergie primaire renouvelable [MJ]	-1225	485	-740
CO [kg]	-18,48	0,78	-17,70
CO ₂ [kg]	-1960	594	-1366
NO _x [kg]	-3,17	0,59	-2,58
COV [kg]	-0,36	0,05	-0,31
SO ₂ [kg]	-5,01	0,55	-4,46
PM (10 - 2.5) [kg]	-0,57	0,06	-0,50
Emiss. radioactives dans l'air [Bq I129-Equiv.]	-67068902	4784377	-62284524

Emiss. radioactives dans l'eau [Bq I129-Equiv.]	-14289046	3415578	-10873468
Résidus radioactifs [kg]	-0,98	0,39	-0,59
Déchets faiblement radioactifs [kg]	-0,01	0,01	0,00
Déchets moyennement radioactifs [kg]	-0,01	0,00	0,00
Déchets radioactifs [kg]	-0,002	0,001	-0,001

Tableau 4-10 indicateurs d'impact potentiel et flux d'inventaire du scénario de fin de vie "Impacts évités" pour les VP électriques à l'horizon 2012.

VP VE 2012	Impacts évités	Recyclage	Impacts évités batterie	Recyclage batterie	Total
Potentiel d'épuisement des ressources minérales [kg Sb-Equiv.]					
Potentiel d'épuisement des ressources fossiles [MJ]					
Potentiel d'acidification [kg SO2-Equiv.]					
Potentiel d'entrophisation [kg Phosphate-Equiv.]					
Potentiel de changement climatique [kg CO2-Equiv.]					
Potentiel de création d'ozone photochimique [kg Ethene-Equiv.]					
Consommation d'énergie primaire totale [MJ]					
Consommation d'énergie primaire non renouvelable [MJ]					
Consommation d'énergie primaire renouvelable [MJ]					
CO [kg]					
CO2 [kg]					
NOx [kg]					
COV [kg]					
SO2 [kg]					
PM (10 - 2.5) [kg]					
Emiss. radioactives dans l'air [Bq I129-Equiv.]					
Emiss. radioactives dans l'eau [Bq I129-Equiv.]					
Résidus radioactifs [kg]					
Déchets faiblement radioactifs [kg]					
Déchets moyennement radioactifs [kg]					
Déchets radioactifs [kg]					
Potentiel d'épuisement des ressources minérales [kg Sb-Equiv.]	-0,077	0,002	-0,007	0,002	-0,075
Potentiel d'épuisement des ressources fossiles [MJ]	-28874	3921	-15884	5295	-24953
Potentiel d'acidification [kg SO2-Equiv.]	-7,86	1,09	-40,83	13,61	-6,77

Potentiel d'entrophisation [kg Phosphate-Equiv.]	-0,45	0,19	-0,71	0,24	-0,26
Potentiel de changement climatique [kg CO2-Equiv.]	-2098	619	-1612	537	-1479
Potentiel de création d'ozone photochimique [kg Ethene-Equiv.]	-1,04	0,05	-1,79	0,60	-0,99
Consommation d'énergie primaire totale [MJ]	-32708	5394	-18953	6318	-27314
Consommation d'énergie primaire non renouvelable [MJ]	-31483	4909	-16512	5504	-26574
Consommation d'énergie primaire renouvelable [MJ]	-1225	485	-2441	814	-740
CO [kg]	-18,48	0,78	-1,57	0,52	-17,70
CO2 [kg]	-1960	594	-1562	521	-1366
NOx [kg]	-3,17	0,59	-4,48	1,49	-2,58
COV [kg]	-0,36	0,05	-0,16	0,05	-0,31
SO2 [kg]	-5,01	0,55	-31,55	10,52	-4,46
PM (10 - 2.5) [kg]	-0,57	0,06	-1,81	0,60	-0,50
Emiss. radioactives dans l'air [Bq I129-Equiv.]	-67068902	4784377	-2841030	947010	-62284524
Emiss. radioactives dans l'eau [Bq I129-Equiv.]	-14289046	3415578	-1710059	570020	-10873468
Résidus radioactifs [kg]	-0,98	0,39	-0,25	0,08	-0,59
Déchets faiblement radioactifs [kg]	-0,01	0,01	0,00	0,00	0,00
Déchets moyennement radioactifs [kg]	-0,006	0,004	-0,002	0,001	-0,002
Déchets radioactifs [kg]	-0,002	0,001	0,000	0,000	-0,001

Les figures suivantes présentent une comparaison des impacts environnementaux potentiels (potentiel de changement climatique, potentiel d'épuisement des ressources minérales, potentiel d'acidification, les autres indicateurs sont en annexes) des matières recyclées et des crédits accordés lors de la fin de vie d'un véhicule particulier essence à l'horizon 2012. Pour tous les indicateurs, les crédits sont 3 à 4 fois supérieurs à l'impact du recyclage. D'une manière générale, le verre est mis en décharge, le plastique incinéré, le cuivre et l'acier sont recyclés, et l'aluminium est en partie recyclé.

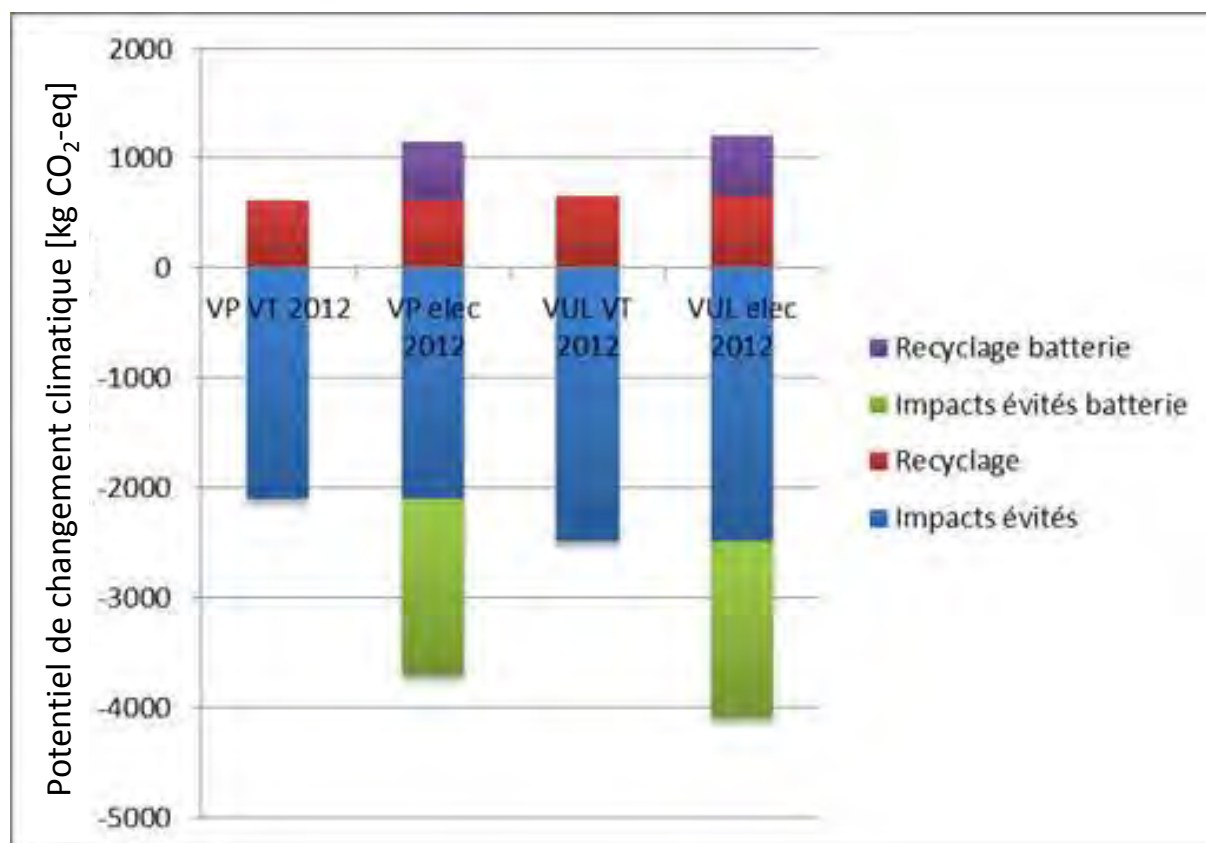


Figure 4-41 Contribution des impacts évités et du recyclage au potentiel de changement climatique pour les VP et VUL, thermiques et électriques à l'horizon 2012

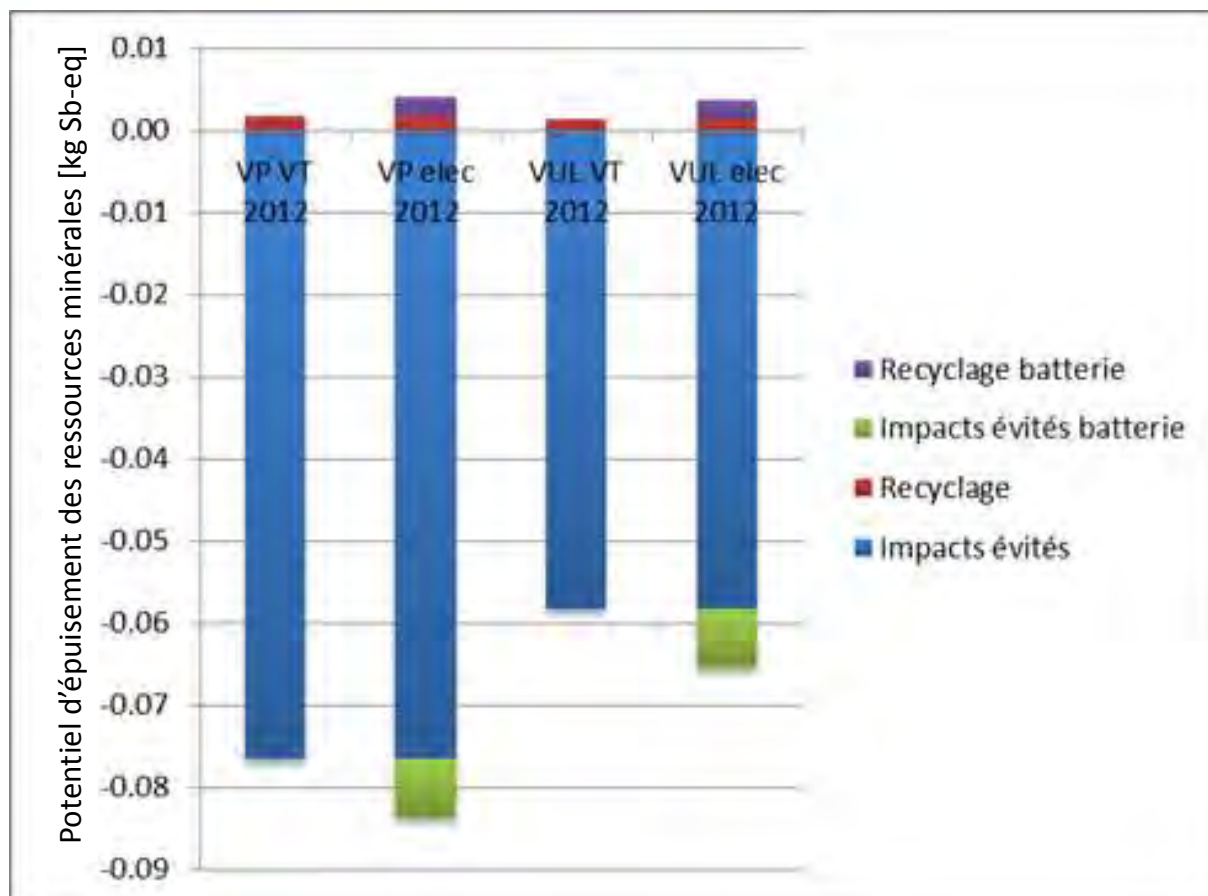


Figure 4-42 Contribution des impacts évités et du recyclage au potentiel d'épuisement des ressources minérales pour les VP et VUL, thermiques et électriques à l'horizon 2012

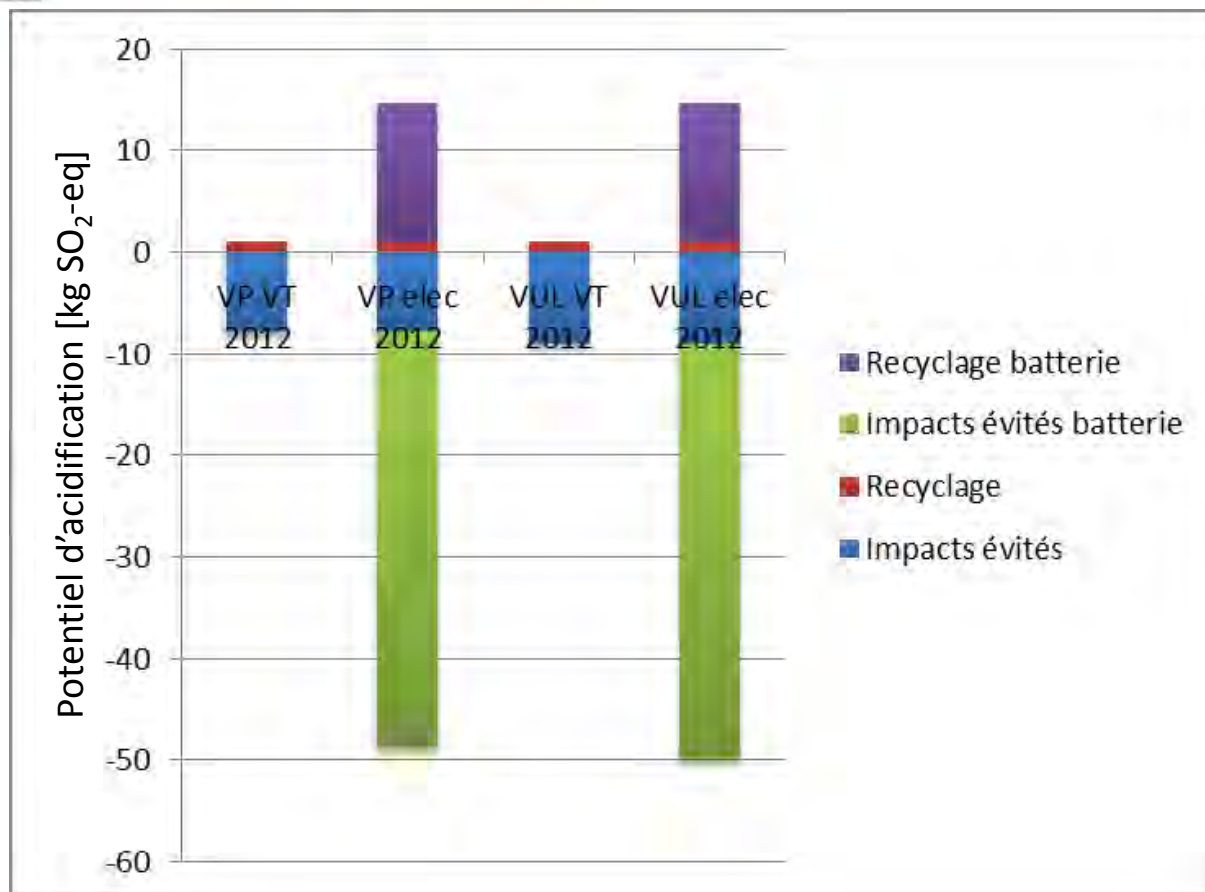


Figure 4-43 Contribution des impacts évités et du recyclage au potentiel d'acidification pour les VP et VUL, thermiques et électriques à l'horizon 2012

Les crédits d'énergie accordés lors de l'incinération du plastique par exemple, sont visibles au niveau de la demande en énergie primaire totale, mais également dans les émissions de CO₂ et flux radioactifs (émissions, déchets).

Le pic de crédits pour le CO vient du fait que la production d'acier primaire en haut fourneau génère des émissions considérables de CO en comparaison à la production d'acier secondaire en four électrique.

Le recyclage de la batterie joue un rôle majeur, notamment pour l'indicateur d'acidification et de changement climatique. Ainsi, le recyclage des métaux de la masse active (cobalt et nickel) entraîne un gain environnemental significatif.

On remarque que les tendances des VUL sont identiques à celles des VP. Les VUL étant plus lourd, on observe néanmoins des impacts évités et des impacts au recyclage plus élevés.

4.3.3.2 Scénario 2020

Les résultats de fin de vie pour les véhicules particuliers et utilitaires légers, pour des motorisations thermiques ou électriques pour l'horizon 2020, sont présentés en annexe. Les résultats sont très similaires à ceux présentés à l'horizon 2012.

On remarque cependant une plus grande part de crédits accordés pour le recyclage. Par exemple, pour le scénario 2020, le modèle comprend 188 kg d'aluminium primaire, auxquels un crédit d'aluminium est accordé.

L'exercice de modélisation à horizon 2020 touche ici ses limites : si l'allègement du véhicule en 2020 était réalisé non pas par l'ajout d'aluminium mais par l'emploi massif de matériaux composites, alors l'impact de fin de vie serait radicalement différent.

Cela dit, par rapport à l'ensemble du cycle de vie, l'impact environnemental de cette étape reste mineur. Les technologies de recyclage peuvent cependant évoluer grandement d'ici à 2035, date de fin de vie des véhicules 2020.

4.3.4 Analyse de sensibilité à la durée de vie du véhicule

L'objectif de ce paragraphe est d'étudier l'évolution de chaque impact potentiel tout au long de la vie du véhicule. Pour une durée de vie du véhicule spécifique, indiquée en termes de kilomètre parcourus, nous pouvons ainsi quantifier chaque impact potentiel. Le scénario de référence est utilisé, excepté pour la modélisation de la fin de vie où la méthode des impacts évités a été préférée à la méthode des stocks pour visualiser globalement les conséquences de ce choix méthodologique (son analyse de sensibilité ayant été détaillée au paragraphe précédent). Ainsi, il est important de rappeler les hypothèses prises en compte dans ce paragraphe :

- ✓ Assemblage des véhicules électriques et thermiques en France,
- ✓ Fabrication de la batterie en France,
- ✓ Batterie Li-Ion NMC de 24 kWh
- ✓ Consommations et émissions d'usage mesurées sur les cycles de conduite NEDC et HBEFA
- ✓ Utilisation en France (pour le VE, un mix électrique moyen est utilisé), et autres mix électriques (Mix Européen EU27, Allemand, Italien, Espagnol et Britannique).
- ✓ La durée de vie de la batterie est identique à la durée de vie du véhicule (150 000 km sur 10 ans),
- ✓ **La méthode des impacts évités est utilisée pour modéliser la fin de vie.**

4.3.4.1 Scénario 2012

Véhicules particuliers

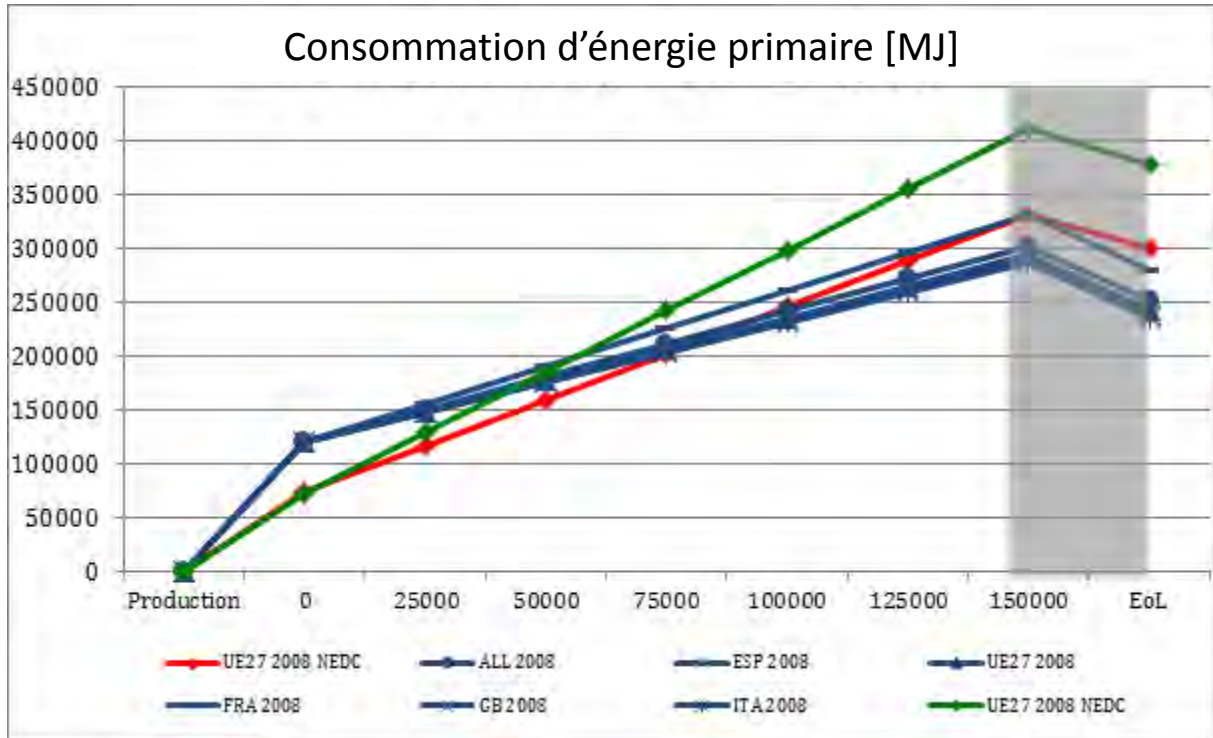


Figure 4-44 Consommation d'énergie primaire totale pour le cycle de vie d'un VP à l'horizon 2012

Sur ce graphe, on observe que la production des VE est plus demandeuse en énergie primaire en comparaison aux véhicules thermiques. Cela est essentiellement dû à la production de la batterie elle-même. Cette tendance s'inverse en fin de parcours après 150 000 km, puisque les véhicules thermiques, aussi bien Diesel qu'essence sont alors plus demandeurs d'énergie primaire.

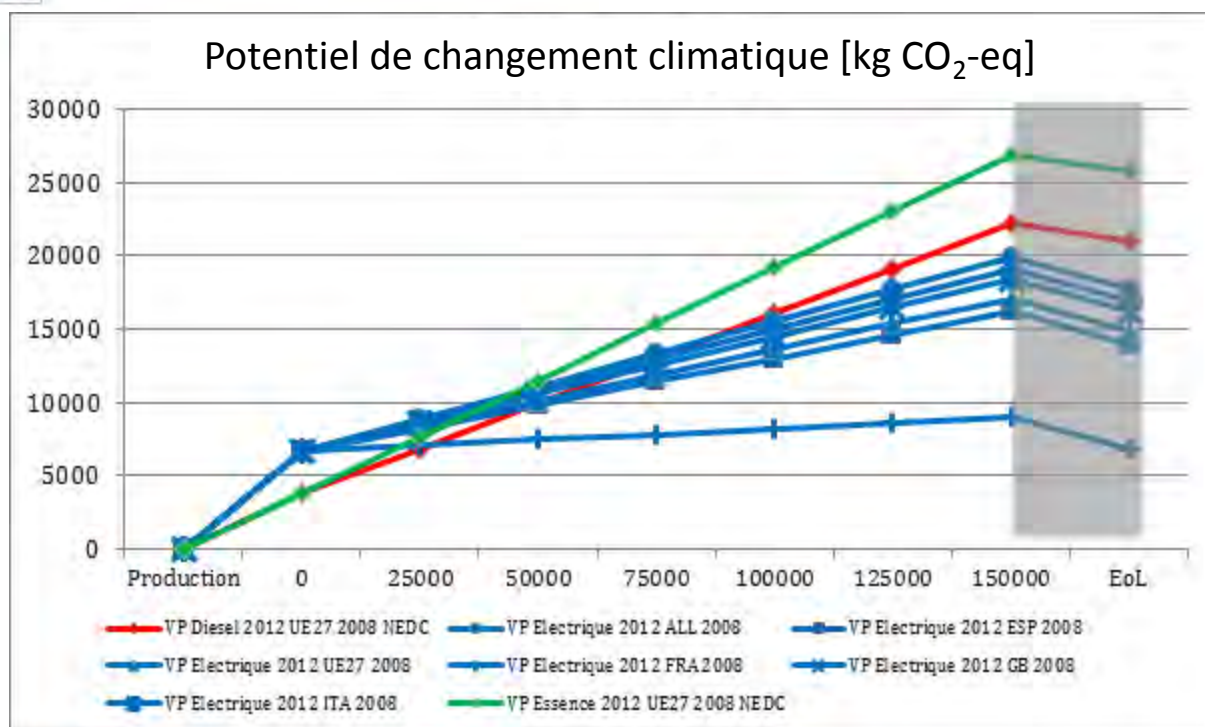


Figure 4-45 : Potentiel de changement climatique pour le cycle de vie d'un VP à l'horizon 2012

Les résultats du potentiel de réchauffement climatique montrent une nette tendance en faveur du véhicule électrique, pour tous les bouquets énergétiques en comparaison aux véhicules conventionnels, dès lors que la durée de vie dépasse 50 000 km.

Le potentiel de changement climatique du véhicule essence est le plus impactant sur le cycle NEDC.

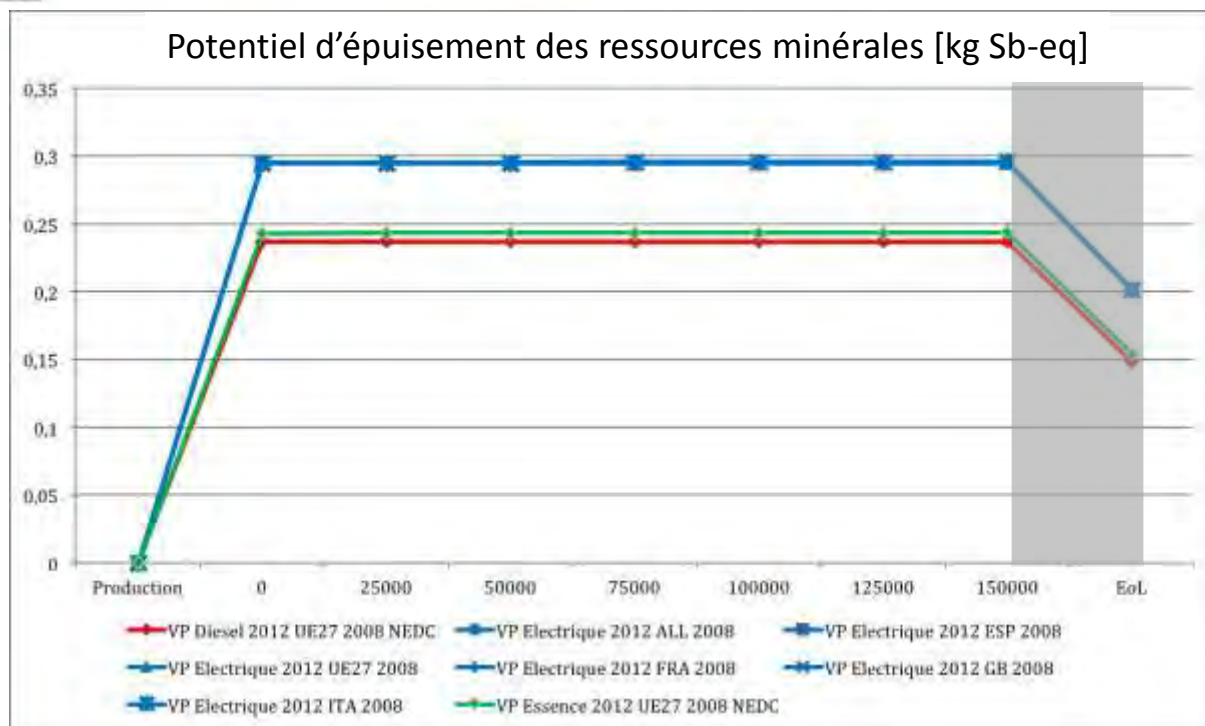


Figure 4-46 Potentiel d'épuisement des ressources minérales pour le cycle de vie VP à l'horizon 2012

Cette figure présente les résultats du scénario de base pour le potentiel d'épuisement des ressources minérales.

Lors de la phase de production, le véhicule électrique demande beaucoup de ressources minérales pour la production de la batterie, ce qui explique les valeurs élevées pour cet indicateur au km 0.

Les résultats pour la phase d'utilisation sont généralement très faibles, car des ressources énergétiques sont principalement utilisées.

Lors de la fin de vie du véhicule électrique également, les résultats pour le potentiel d'épuisement des ressources minérales restent 25% plus élevés que ceux des véhicules conventionnels. La différence entre les véhicules diesel et essence pour cet indicateur est négligeable.

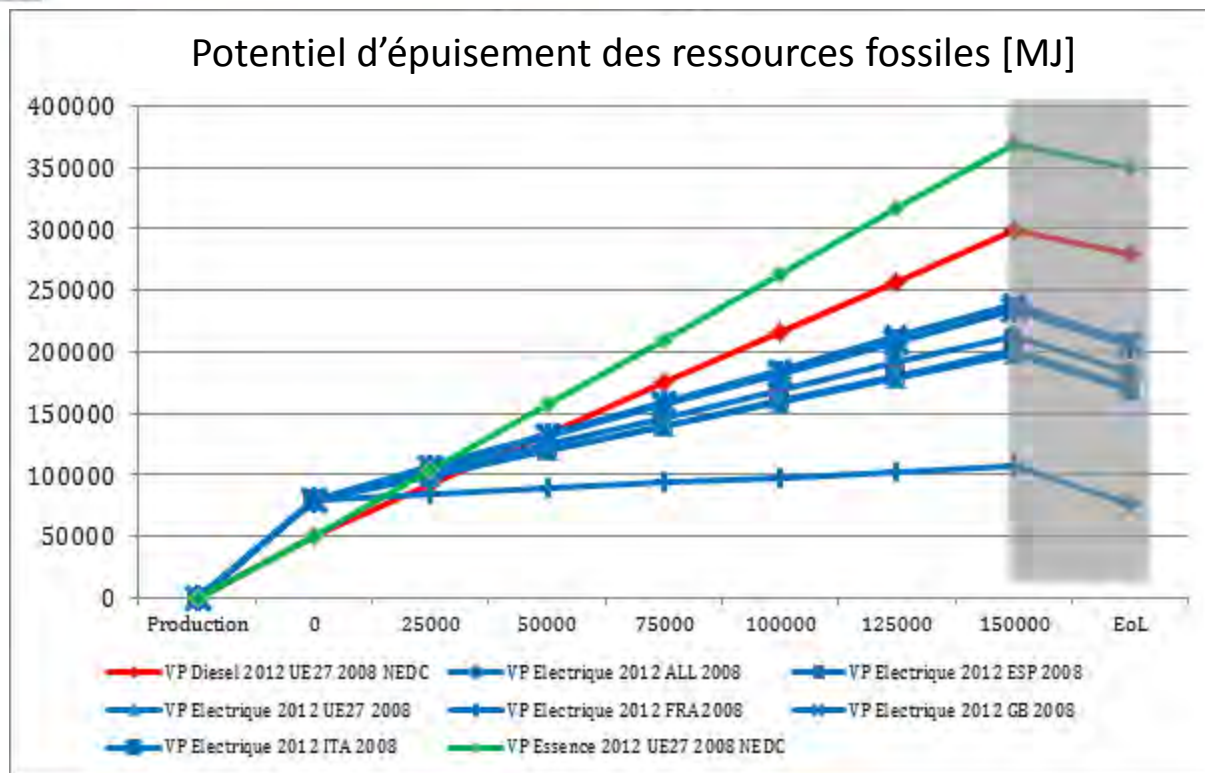


Figure 4-47 Potentiel d'épuisement des ressources fossiles pour le cycle de vie d'un VP à l'horizon 2012

La figure ci-dessus présente le potentiel d'épuisement des ressources fossiles. Pour cet indicateur, la production du VE génère des valeurs plus élevées que celles des VT. Pour le véhicule électrique en France, la pente en phase d'utilisation est très faible, car l'uranium consommé pour produire l'électricité Française, n'est pas représenté par le potentiel d'épuisement des ressources fossiles mais par celui d'épuisement des ressources minérales.

En comparant les différents scénarios en phase d'utilisation pour le véhicule électrique, on observe que le bouquet énergétique a un impact très significatif sur la consommation en ressources fossiles.

Si l'on compare les scénarios en France et en Grande-Bretagne par exemple, le potentiel d'épuisement des ressources fossiles à la fin de la phase d'utilisation est plus de deux fois plus élevé. Les deux véhicules conventionnels montrent des valeurs de potentiel d'épuisement des ressources fossiles plus élevées que celles pour les VE. Selon le bouquet énergétique, le véhicule électrique présente des résultats pour cet indicateur entre 17% et 65% plus faible que le véhicule Diesel. Si on le compare au véhicule essence, les résultats du potentiel d'épuisement des ressources fossiles pour le VE sont entre 30% et 70% inférieurs.

Le potentiel d'épuisement des ressources fossiles ne représente ni la consommation d'uranium, ni celle de ressources renouvelables. Ainsi, ces chiffres ne permettent pas de donner de conclusion sur l'efficacité globale d'un véhicule électrique. Cependant, on observe qu'au long de son cycle de vie, le véhicule électrique prévient potentiellement l'épuisement d'une quantité considérable de ressources fossiles. Cette conclusion dépend toutefois du mix énergétique évalué.

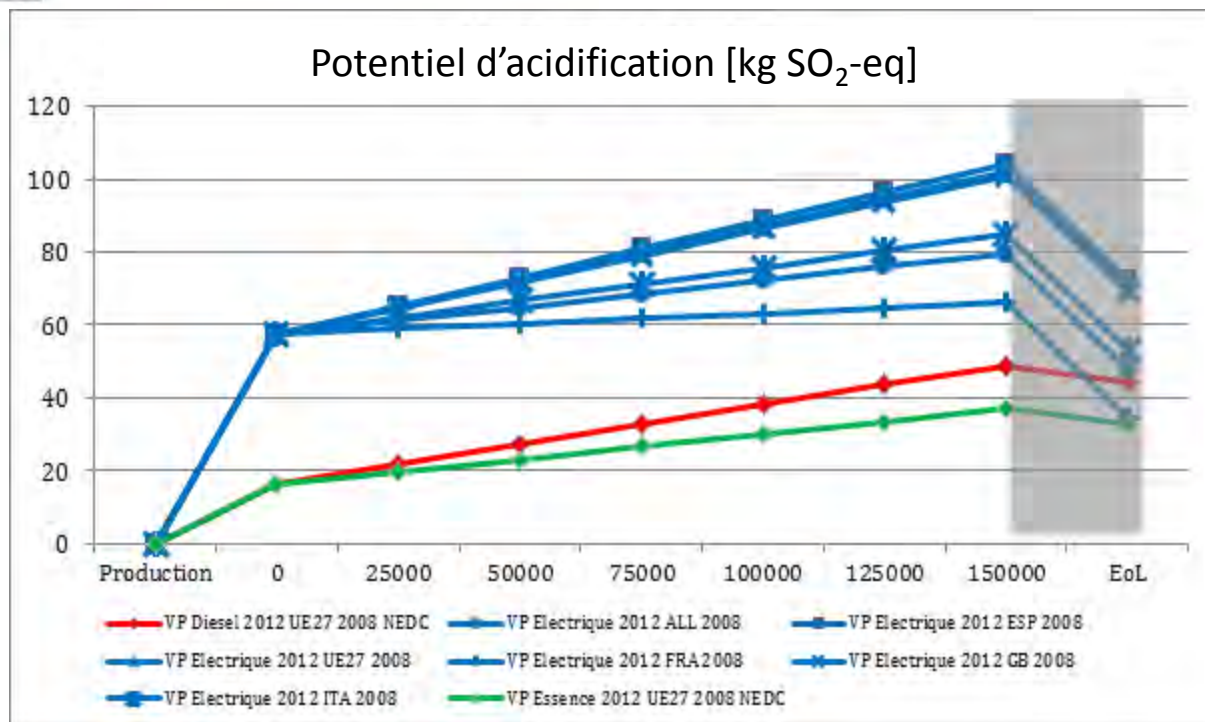


Figure 4-48 Potentiel d'acidification pour le cycle de vie d'un VP à l'horizon 2012

Comme le potentiel d'épuisement des ressources minérales, la phase de production du véhicule électrique impacte considérablement sur le potentiel d'acidification en comparaison aux véhicules conventionnels.

- ✓ Le véhicule essence présente les plus faibles contributions à cet indicateur, car peu d'émissions impactant sur le potentiel d'acidification sont générées sur un cycle NEDC,
- ✓ Les véhicules électriques présentent un écart similaire dans les résultats selon le bouquet énergétique étudié : le plus faible impact est dans le cas du mix français, le plus fort impact est dans le cas de l'Espagne.

En fin de l'utilisation (km = 150 000), le véhicule essence et le véhicule Diesel dans le scénario NEDC présentent des résultats de potentiel d'acidification nettement meilleurs que tous les scénarios évalués pour le véhicule électrique.

Le scénario du VE avec le bouquet énergétique français est nettement meilleur.

Dans le cas du bouquet énergétique de l'Italie, le potentiel d'acidification est légèrement moins bon.

Tous les bouquets énergétiques, hormis le bouquet Français, présentent des impacts d'acidification en fin de phase d'utilisation plus élevés que le scénario du véhicule Diesel.

Lorsque l'on considère les résultats de fin de vie, les écarts se resserrent :

- ✓ Un crédit pour le Cobalt est accordé en fin de vie, conduisant à des crédits d'acidification nettement plus importants en fin de vie du véhicule,
- ✓ En prenant en compte le recyclage, le scénario du VE en France se révèle être légèrement moins impactant que le véhicule Diesel sur cycle NEDC, en termes de potentiel d'acidification. Les mix allemand et italien conduisent alors à des résultats légèrement moins favorables

que le scénario du véhicule Diesel sur cycle NEDC. Tous les autres bouquets énergétiques conduisent à des résultats plus importants que le véhicule Diesel sur cycle NEDC.

En conclusion, le véhicule à essence a un impact nettement moins important que tous les autres scénarios évalués du VE, pour le potentiel d'acidification. Seul le scénario du VE en France parvient, avec l'intégration du recyclage au moins, à présenter des résultats de même ordre de grandeur que le véhicule essence.

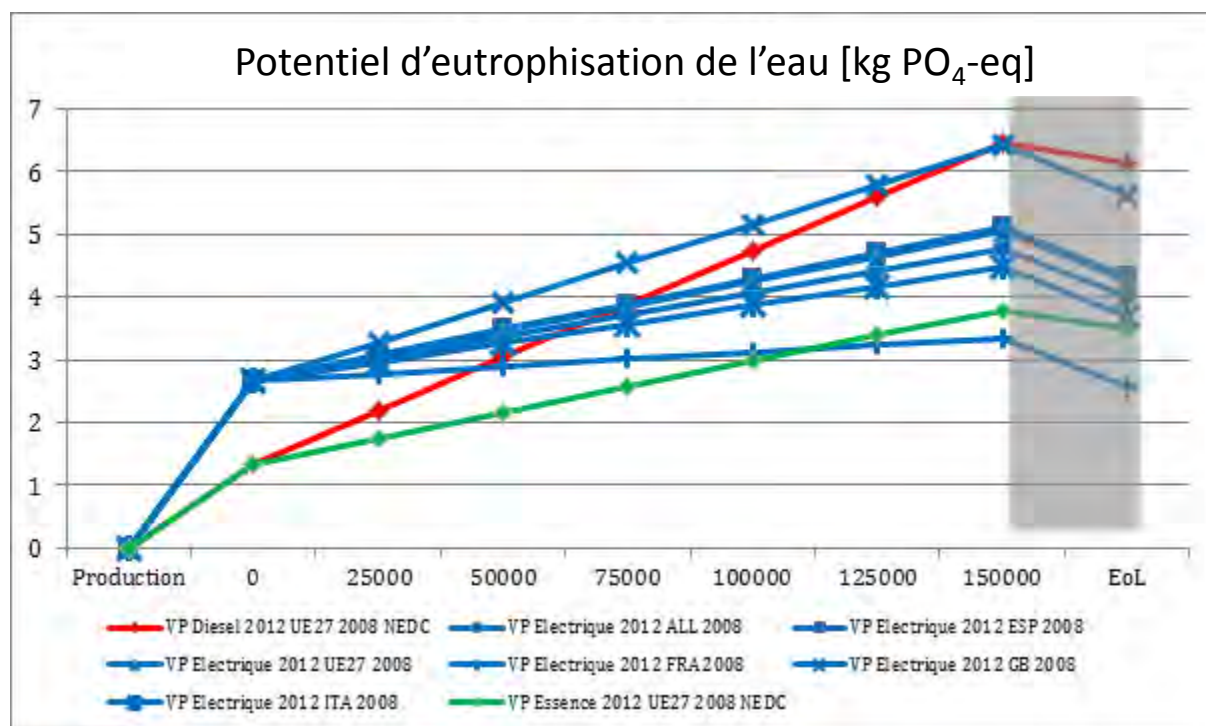


Figure 4-49 : Potentiel d'eutrophisation pour le cycle de vie d'un VP à l'horizon 2012

Comme les véhicules Diesel émettent de grandes quantités de NO_x, ils présentent généralement de fortes valeurs d'eutrophisation.

En phase d'utilisation, le véhicule Diesel parvient au même niveau que le scénario du VE en Grande-Bretagne, mais le gain du recyclage pour le VP Diesel est plus faible que pour le VE.

Les résultats d'eutrophisation du véhicule essence sont généralement les plus bas. Seul le VE en France parvient à un impact potentiel d'eutrophisation inférieur au véhicule essence, en raison de la grande part du nucléaire de son mix énergétique. Tous les scénarios des VE avec les autres bouquets énergétiques présentent des résultats compris entre le potentiel d'eutrophisation du véhicule essence et celui du véhicule Diesel.

En conclusion, les résultats montrent, qu'en termes d'eutrophisation, l'impact du VE varie entre l'impact du véhicule Diesel et du véhicule essence en termes d'émissions.

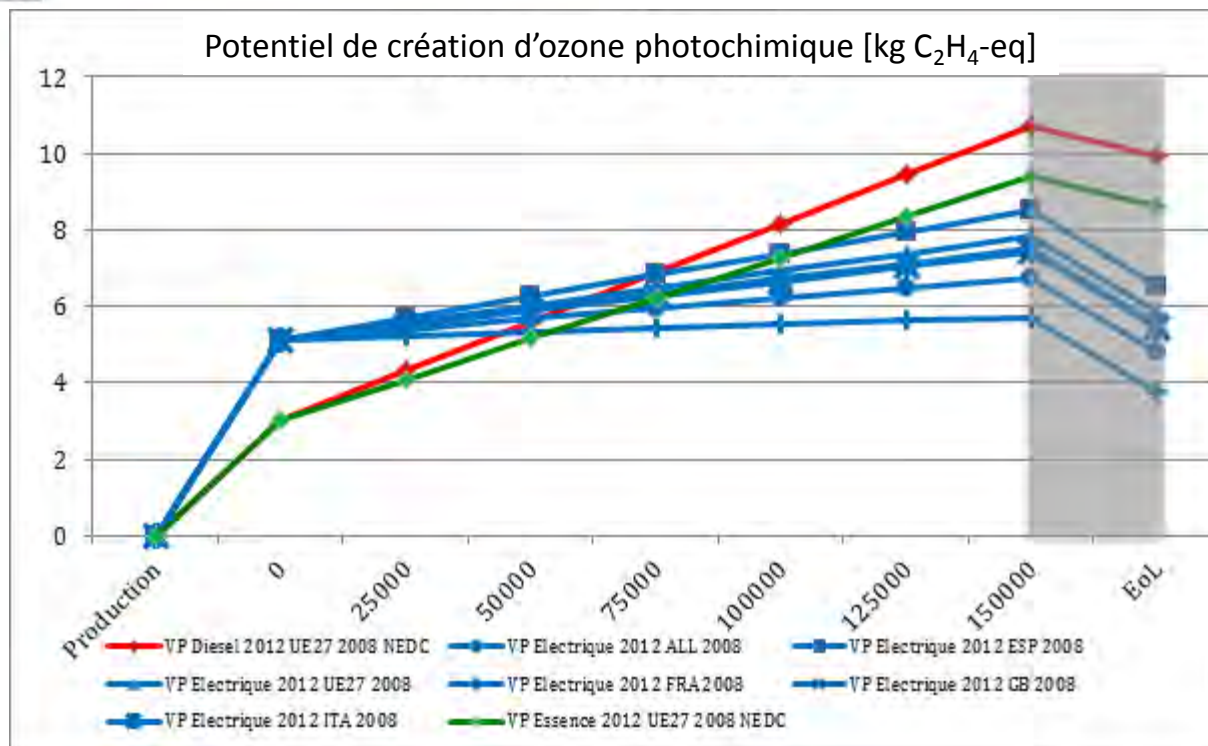


Figure 4-50 : Potentiel de création d'ozone photochimique pour le cycle de vie d'un VP à l'horizon 2012

Pour le potentiel de création d'oxydation photochimique, les véhicules Diesel et essence présentent des résultats plus élevés que ceux des véhicules électriques. Selon le scénario choisi, le véhicule Diesel est plus ou moins impactant que le véhicule essence, pour les mêmes raisons que précédemment : les émissions de NO_x sont sensiblement différentes pour les deux scénarios. Les résultats élevés du véhicule essence sont dus aux émissions de CO durant la conduite du véhicule.

Pour le VE, dans le cas de l'Espagne, à la fin de l'utilisation, les résultats sont similaires à ceux du véhicule Diesel sur cycle NEDC. En prenant en compte le recyclage, le VE devient alors nettement moins impactant. Dans tous les autres cas, le véhicule électrique est de loin moins impactant que les véhicules essence et Diesel pour le potentiel de création d'ozone photochimique.

Conclusion

En conclusion, le véhicule électrique est nettement moins impactant pour les catégories d'impact : potentiel de changement climatique, création d'ozone photochimique et épuisement des ressources fossiles. Pour le potentiel d'acidification, le VE a tendance à être plus impactant que les véhicules conventionnels, à l'exception du VE en France, où le mix énergétique émet peu d'émissions acidifiantes. Enfin, pour le potentiel d'eutrophisation, le véhicule électrique est généralement plus impactant que le véhicule essence et moins impactant que le véhicule Diesel.

Il est important de préciser que l'intégration du scénario de fin de vie des impacts évités entraîne un gain important au niveau des différents indicateurs d'impact potentiel, notamment pour la batterie (voir chapitre 4.2.5).

La figure suivante récapitule les résultats pour l'ensemble des indicateurs d'impact.

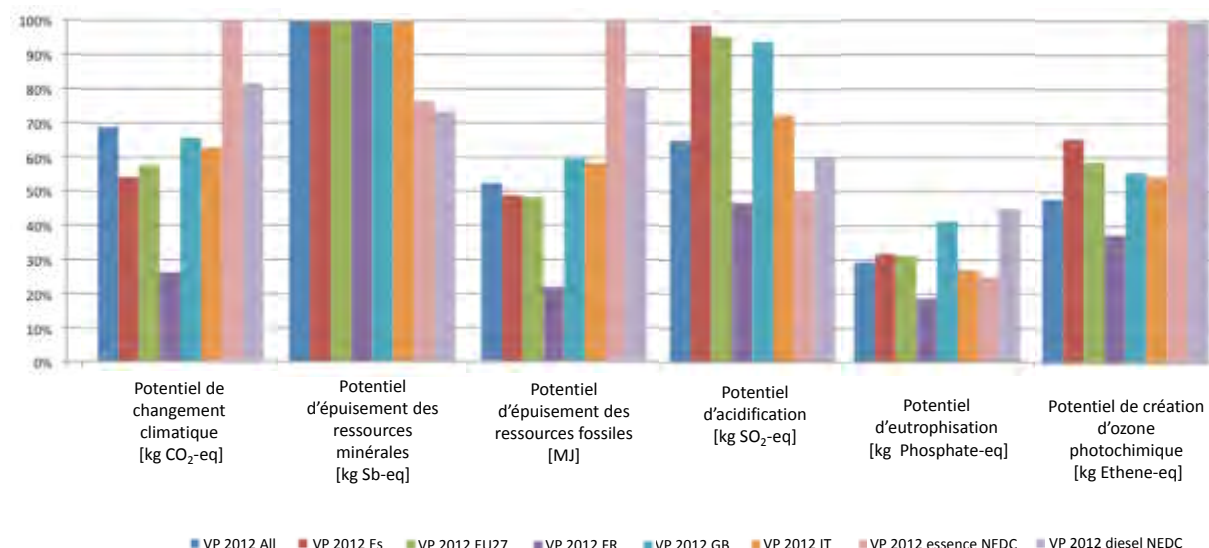


Figure 4-51 Histogramme récapitulatif des indicateurs d'impact du cycle de vie des VP 2012 (méthode des impacts évités utilisée en fin de vie)

Le VE affiche un bilan favorable pour les indicateurs de potentiel de changement climatique, de création d'ozone photochimique et d'épuisement des ressources fossiles. Pour l'indicateur d'acidification, le VE possède un bilan défavorable par rapport aux VT, à l'exception du scénario pour la France, où les émissions du bouquet électrique contribuant au potentiel d'acidification sont faibles. Pour le potentiel d'eutrophisation, le VE et les VT affichent des bilans comparables.

La figure suivante montre une sélection de flux d'inventaire pour l'ensemble des scénarios étudiés en 2012. En raison de l'utilisation massive de l'énergie nucléaire, le scénario français possède un bilan défavorable par rapport aux autres scénarios pour les flux radioactifs.

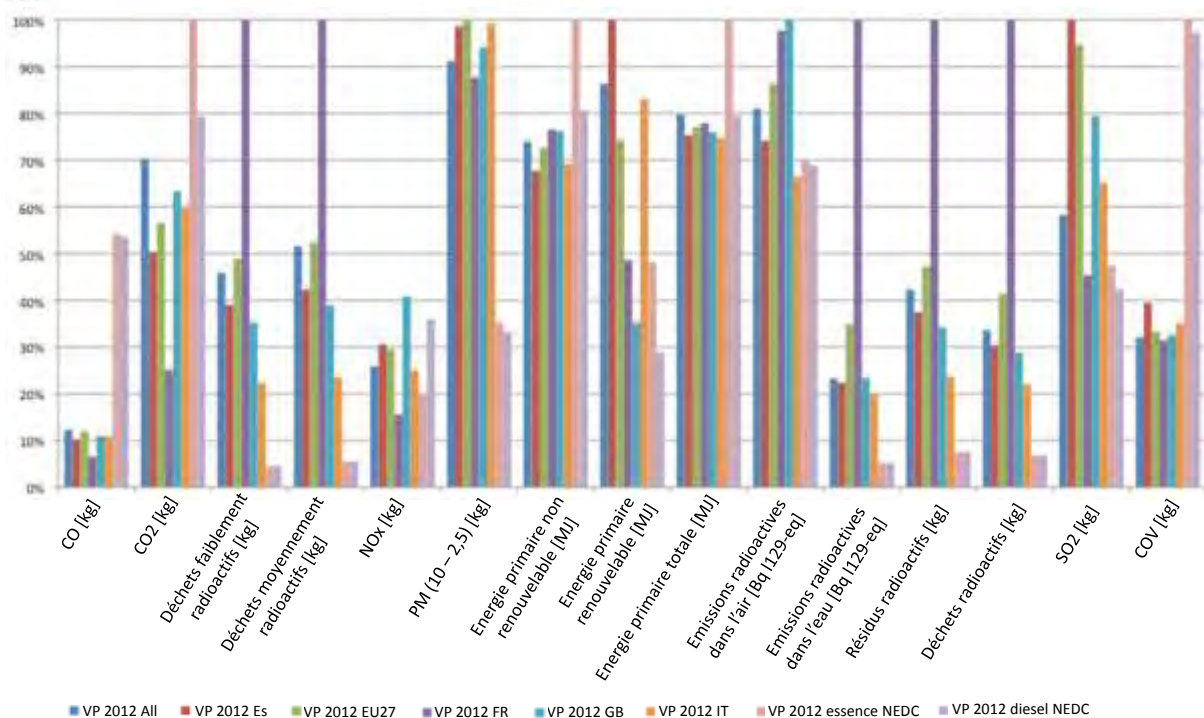


Figure 4-52 Histogramme récapitulatif des flux d'inventaire du cycle de vie des VP 2012 (méthode des impacts évités utilisée en fin de vie)

Le Tableau 4-11 suivant présente les résultats absolus pour les scénarios 2012 étudiés.

Tableau 4-11 Flux d'inventaire et indicateurs d'impact du cycle de vie des VP 2012

	VP 2012 DE	VP 2012 ES	VP 2012 EU27	VP 2012 FR	VP 2012 GB	VP 2012 IT	VP 2012 gasoline NEDC	VP 2012 Diesel NEDC
Potentiel d'épuisement des ressources minérales [kg Sb-Equiv.]	2,02E-01	2,01E-01	2,01E-01	2,01E-01	2,01E-01	2,02E-01	2,44E-01	2,38E-01
Potentiel d'épuisement des ressources fossiles [MJ]	1,83E+05	1,71E+05	1,69E+05	7,67E+04	2,09E+05	2,04E+05	3,69E+05	2,99E+05
Potentiel d'acidification [kg SO ₂ -Equiv.]	4,78E+01	7,26E+01	7,03E+01	3,43E+01	6,91E+01	5,33E+01	4,15E+01	4,90E+01
Potentiel d'eutrophisation [kg Phosphate-Equiv.]	4,00E+00	4,34E+00	4,27E+00	2,56E+00	5,63E+00	3,69E+00	3,75E+00	6,46E+00
Potentiel de changement climatique [kg CO ₂ -Equiv.]	1,78E+04	1,40E+04	1,49E+04	6,78E+03	1,70E+04	1,62E+04	2,69E+04	2,22E+04
Potentiel de création d'ozone photochimique [kg Ethene-Equiv.]	4,78E+00	6,54E+00	5,86E+00	3,74E+00	5,55E+00	5,44E+00	1,08E+01	1,07E+01
CO [kg]	1,11E+01	9,16E+00	1,08E+01	5,93E+00	9,85E+00	9,84E+00	6,69E+01	6,64E+01
CO ₂ [kg]	1,87E+04	1,34E+04	1,51E+04	6,69E+03	1,69E+04	1,59E+04	2,76E+04	2,21E+04
Déchets faiblement radioactifs [kg]	6,51E-01	5,54E-01	6,95E-01	1,42E+00	5,00E-01	3,18E-01	7,91E-02	8,03E-02
Déchets moyennement radioactifs [kg]	3,25E-01	2,67E-01	3,31E-01	6,30E-01	2,46E-01	1,48E-01	4,16E-02	4,20E-02
NO _x [kg]	2,34E+01	2,76E+01	2,66E+01	1,41E+01	3,69E+01	2,26E+01	2,00E+01	3,48E+01
PM (10 - 2.5) [kg]	1,27E+00	1,38E+00	1,40E+00	1,22E+00	1,31E+00	1,39E+00	7,25E-01	6,96E-01
Consommation d'énergie primaire non renouvelable [MJ]	2,71E+05	2,48E+05	2,66E+05	2,81E+05	2,79E+05	2,53E+05	3,89E+05	3,18E+05
Consommation d'énergie primaire renouvelable [MJ]	3,78E+04	4,38E+04	3,26E+04	2,13E+04	1,55E+04	3,64E+04	2,18E+04	1,34E+04
Consommation d'énergie primaire totale [MJ]	3,09E+05	2,92E+05	2,99E+05	3,02E+05	2,95E+05	2,90E+05	4,11E+05	3,32E+05
Emiss. radioactives dans l'air [Bq I129-Equiv.]	7,27E+08	6,66E+08	7,76E+08	8,77E+08	8,98E+08	5,96E+08	6,97E+08	6,87E+08
Emiss. radioactives dans l'eau [Bq I129-Equiv.]	3,37E+08	3,23E+08	5,04E+08	1,44E+09	3,38E+08	2,87E+08	9,69E+07	9,80E+07
Résidus radioactifs [kg]	3,45E+01	3,05E+01	3,85E+01	8,15E+01	2,79E+01	1,92E+01	7,32E+00	7,35E+00
Déchets radioactifs [kg]	5,08E-02	4,58E-02	6,25E-02	1,51E-01	4,34E-02	3,32E-02	1,27E-02	1,28E-02
SO ₂ [kg]	2,77E+01	4,76E+01	4,51E+01	2,16E+01	3,78E+01	3,10E+01	2,54E+01	2,30E+01
COV [kg]	5,58E+00	6,87E+00	5,80E+00	5,48E+00	5,67E+00	6,12E+00	1,75E+01	1,70E+01

Véhicules utilitaires légers

Les résultats des scénarios pour le VUL sont très semblables à ceux du véhicule particulier et sont disponibles en annexe.

D'une manière générale, pour le **potentiel d'épuisement des ressources minérales**, si l'on prend en compte les crédits en fin de vie, le VE reste plus impactant à hauteur de 90% en comparaison aux VUL conventionnels.

Le VE a des valeurs **d'épuisement des ressources fossiles** nettement plus élevées que pour les autres véhicules. Pour le VE en France, les valeurs d'épuisement des ressources sont particulièrement basses dues à l'électricité d'origine nucléaire. Selon le bouquet énergétique, le véhicule électrique présente des résultats d'épuisement des ressources fossiles entre 25% et 65% plus bas que le véhicule Diesel.

Pour le **potentiel d'acidification**, le VUL électrique en France a un impact nettement moins important que tous les autres scénarios évalués du VE. Le VUL essence dans les deux scénarios ainsi que le véhicule Diesel sur cycle NEDC présentent des résultats similaires quand le crédit du recyclage est pris en compte.

Les résultats montrent qu'en termes d'**eutrophisation**, les véhicules électriques utilitaires légers ont un impact similaire au véhicule essence.

Pour le **potentiel de réchauffement climatique**, les résultats montrent une nette tendance en faveur du véhicule électrique, pour tous les bouquets énergétiques en comparaison aux véhicules conventionnels. Le véhicule essence est le plus impactant en termes de potentiel de changement climatique.

Pour le **potentiel de création d'ozone photochimique**, les véhicules Diesel et essence présentent des résultats plus élevés que ceux des véhicules électriques.

Conclusion pour les VUL

En conclusion pour le VUL, le véhicule électrique est nettement moins impactant pour les catégories d'impact potentiel de changement climatique, création d'ozone photochimique et épuisement des ressources fossiles. Pour l'acidification, le véhicule électrique a tendance à être plus impactant que les véhicules conventionnels, à l'exception du VE en France, où le mix énergétique émet peu d'émissions acidifiantes. Enfin, pour le potentiel d'eutrophisation, le véhicule électrique est généralement aussi impactant que le véhicule thermique.

D'une manière générale, les résultats pour les VUL sont plus favorables aux véhicules électriques que ceux des véhicules particuliers, en raison des émissions provenant de la production de carburant. La consommation de carburant des VUL est de 30% supérieure à celle des VP, et que la consommation énergétique des VE est seulement supérieure d'environ 8%. Non seulement les résultats des catégories d'impact d'épuisement des ressources et de réchauffement climatique sont meilleurs pour le VUL électrique comparé au VP, mais les autres catégories d'impact sont également améliorées.

4.3.4.2 Scénario 2020

Les résultats des scénarios pour le VP à l'horizon 2020 sont très semblables à ceux du véhicule particulier en 2012 et sont disponibles en annexe.

Pour le **potentiel d'épuisement des ressources minérales**, en comparaison au scénario 2012 pour le VE, les impacts sont moins importants à l'horizon 2020 car les technologies de batteries utilisées sont différentes de celles de 2012 (elles utilisent moins de métaux rares). A l'inverse, les résultats des véhicules essence et diesel ont augmenté du fait de l'allègement des véhicules. En effet, l'aluminium primaire utilisé pour l'allègement est consommateur de ressource minérale.

Pour le **potentiel d'épuisement des ressources fossiles**, la tendance et les résultats sont similaires à ceux à l'horizon 2012.

Pour le **potentiel d'acidification**, les résultats montrent que la production à l'horizon 2020 est moins impactante qu'en 2012 mais les résultats en fin de vie sont tout de même de même ordre de grandeur que ceux à l'horizon 2012.

Pour le **potentiel d'eutrophisation**, au stade de la production, les résultats sont très similaires. En revanche, on note que le véhicule Diesel sur cycle HBEFA en 2020 (environ 8 kg PO₄ Eq) est nettement moins impactant qu'en 2012 (environ 14 kg PO₄ Eq) à la fin d'utilisation. En général, les résultats montrent qu'en termes d'eutrophisation, l'impact du VE varie entre l'impact du véhicule Diesel et du véhicule essence.

Pour le **potentiel de changement climatique**, les résultats sont légèrement inférieurs en 2020 à ceux de 2012 pour tous les véhicules, hormis le véhicule essence qui montre par ailleurs toujours le plus fort impact.

En termes de réchauffement climatique, les résultats montrent une nette tendance en faveur du véhicule électrique.

Pour la catégorie **création d'ozone photochimique**, les résultats de 2020 sont similaires à ceux de 2012 sauf pour le véhicule essence pour lequel ils sont légèrement supérieurs.

En conclusion, le véhicule électrique est nettement moins impactant pour les catégories d'impact potentiel de changement climatique, création d'ozone photochimique et épuisement des ressources fossiles. Pour le potentiel d'acidification, il a tendance à être plus impactant que les véhicules conventionnels, à l'exception du VE en France, où la production du mix énergétique émet peu d'émissions impactant directement sur le potentiel d'acidification. Enfin, pour le potentiel d'eutrophisation, le véhicule électrique est généralement plus impactant que le véhicule essence et moins que le véhicule Diesel.

Il est important de préciser que l'intégration du scénario de fin de vie des impacts évités entraîne un gain important au niveau des différents indicateurs d'impact potentiel, notamment pour la batterie (voir chapitre 4.2.5).

La figure suivante récapitule les résultats pour l'ensemble des indicateurs d'impact.

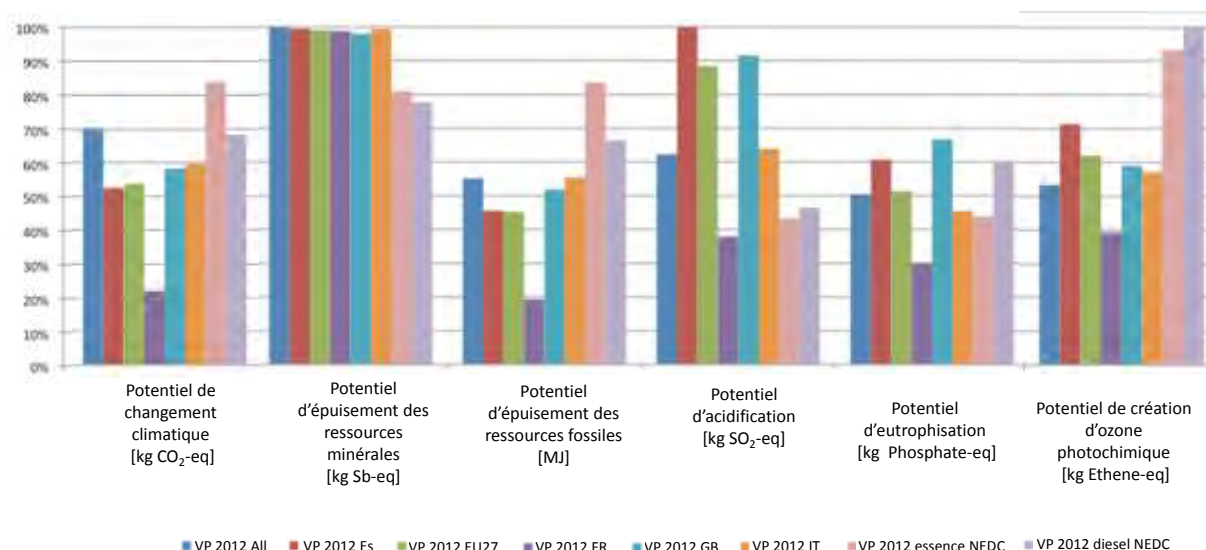


Figure 4-53 Histogramme récapitulatif des indicateurs d'impact du cycle de vie des VP 2020 (méthode des impacts évités utilisée en fin de vie)

En comparaison des scénarios étudiés à l'horizon 2012, les résultats pour l'indicateur d'épuisement des ressources fossiles sont plus proches pour les VE et VT. Pour le scénario Allemand, le VE reste aux alentours de 50% des bilans environnementaux des VT. En conclusion, les résultats des scénarios du VE sont maintenant plus proches de ceux des VT Diesel et essence par rapport aux scénarios 2012. Cette tendance est vérifiée pour les indicateurs d'acidification, d'eutrophisation et de réchauffement climatique. Les résultats pour l'indicateur de création d'ozone photochimique restent inchangés par rapport aux scénarios 2012. Pour les flux de l'inventaire, présentés sur la figure suivante, les résultats pour la consommation d'énergie primaire sont toujours comparables aux scénarios 2012. Une augmentation de 10% des résultats des scénarios du VE peut être observée pour les émissions de COV par rapport aux scénarios 2012.

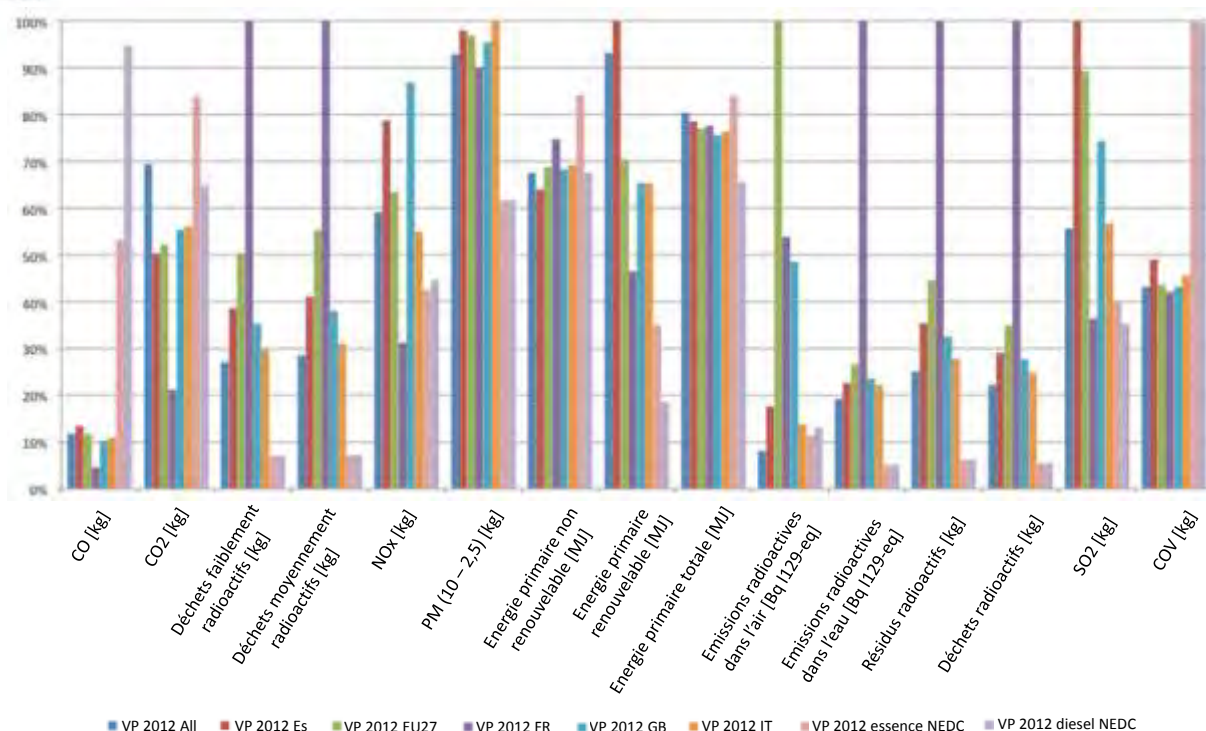


Figure 4-54: Histogramme récapitulatif des flux d'inventaire du cycle de vie des VP 2020 (méthode des impacts évités utilisée en fin de vie)

Le Tableau 4-12 récapitule les résultats absolus des indicateurs d'impact et des flux d'inventaire des scénarios VP 2020.

Tableau 4-12 Résultats des indicateurs d'impact et des flux d'inventaire des VP 2020

	VP 2020 DE	VP 2020 ES	VP 2020 EU27	VP 2020 FR	VP 2020 GB	VP 2020 IT	VP 2020 gasoline NEDC	VP 2020 Diesel NEDC
Potentiel d'épuisement des ressources minérales [kg Sb-Equiv.]	1,81E-01	1,80E-01	1,80E-01	1,79E-01	1,78E-01	1,80E-01	2,37E-01	2,31E-01
Potentiel d'épuisement des ressources fossiles [MJ]	1,81E+05	1,50E+05	1,48E+05	6,34E+04	1,70E+05	1,82E+05	3,09E+05	2,53E+05
Potentiel d'acidification [kg SO2-Equiv.]	4,40E+01	7,05E+01	6,24E+01	2,67E+01	6,46E+01	4,50E+01	4,50E+01	4,72E+01
Potentiel d'entrophisation [kg Phosphate-Equiv.]	3,95E+00	4,75E+00	4,02E+00	2,35E+00	5,23E+00	3,56E+00	4,12E+00	5,38E+00
Potentiel de changement climatique [kg CO2-Equiv.]	1,67E+04	1,25E+04	1,29E+04	5,27E+03	1,39E+04	1,43E+04	2,29E+04	1,92E+04
Potentiel de création d'ozone photochimique [kg Ethene-Equiv.]	4,85E+00	6,48E+00	5,63E+00	3,57E+00	5,36E+00	5,19E+00	9,61E+00	1,02E+01
CO [kg]	8,40E+00	9,63E+00	8,39E+00	3,29E+00	7,33E+00	7,80E+00	4,93E+01	7,89E+01
CO2 [kg]	1,81E+04	1,31E+04	1,36E+04	5,52E+03	1,44E+04	1,46E+04	2,43E+04	1,94E+04
Déchets faiblement radioactifs [kg]	3,74E-01	5,33E-01	6,94E-01	1,38E+00	4,87E-01	4,10E-01	1,15E-01	1,16E-01
Déchets moyennement radioactifs [kg]	1,74E-01	2,50E-01	3,37E-01	6,09E-01	2,31E-01	1,89E-01	5,79E-02	5,84E-02
NOx [kg]	2,26E+01	3,01E+01	2,42E+01	1,19E+01	3,32E+01	2,10E+01	2,11E+01	2,19E+01
PM (10 - 2.5) [kg]	2,61E+00	2,75E+00	2,72E+00	2,53E+00	2,68E+00	2,81E+00	1,91E+00	1,91E+00
Consommation d'énergie primaire non renouvelable [MJ]	2,30E+05	2,18E+05	2,34E+05	2,54E+05	2,33E+05	2,36E+05	3,33E+05	2,77E+05
Consommation d'énergie primaire renouvelable [MJ]	6,96E+04	7,48E+04	5,26E+04	3,47E+04	4,88E+04	4,88E+04	3,73E+04	2,50E+04
Consommation d'énergie primaire totale [MJ]	2,99E+05	2,92E+05	2,87E+05	2,89E+05	2,81E+05	2,84E+05	3,71E+05	3,02E+05
Emiss. radioactives dans l'air [Bq I129-Equiv.]	4,74E+07	1,02E+08	5,81E+08	3,13E+08	2,82E+08	8,03E+07	6,85E+08	6,75E+08
Emiss. radioactives dans l'eau [Bq I129-Equiv.]	2,64E+08	3,10E+08	3,66E+08	1,37E+09	3,24E+08	3,04E+08	1,20E+08	1,21E+08
Résidus radioactifs [kg]	1,92E+01	2,72E+01	3,42E+01	7,67E+01	2,49E+01	2,13E+01	9,08E+00	9,11E+00
Déchets radioactifs [kg]	3,14E-02	4,12E-02	4,95E-02	1,42E-01	3,93E-02	3,53E-02	1,55E-02	1,55E-02
SO2 [kg]	2,47E+01	4,44E+01	3,97E+01	1,62E+01	3,30E+01	2,52E+01	2,76E+01	2,55E+01
COV [kg]	6,66E+00	7,57E+00	6,72E+00	6,49E+00	6,66E+00	7,03E+00	1,57E+01	1,56E+01

Scénario de base pour les VUL à l'horizon 2020

Les résultats des scénarios pour le VUL à l'horizon 2020 sont très semblables à ceux du VUL en 2012 et sont disponibles en annexe.

Pour le **potentiel d'épuisement des ressources minérales**, la tendance est similaire à celle de 2012, en revanche la production du véhicule Diesel en 2020 demande davantage de ressources minérales (0,25 kg Sb Equiv en 2020 contre 0,15 kg Sb Equiv en 2012).

Pour le **potentiel d'épuisement des ressources fossiles**, les résultats sont légèrement inférieurs à ceux de 2012, en raison de la réduction de la consommation de carburant pour les VT.

Les deux véhicules conventionnels montrent des valeurs d'épuisement des ressources fossiles plus élevées que celles pour les VE, pour qui le choix du bouquet énergétique a un impact très significatif sur la consommation en ressources fossiles.

Pour le **potentiel d'acidification**, les résultats à l'horizon 2012 et 2020 sont similaires.

Pour le **potentiel d'eutrophisation**, le véhicule Diesel sur cycle HBEFA en 2020 en fin d'utilisation (9 kg PO₄ equiv.) apparaît nettement moins impactant qu'à l'horizon 2012 (environ 14.3 kg PO₄ equiv.) en raison de la diminution importante des émissions de NO_x.

Pour tous les véhicules, à l'horizon 2020, les résultats du **potentiel de changement climatique** sont légèrement inférieurs à ceux de 2012, en raison de la réduction de la consommation en phase d'usage liée à l'allègement du véhicule et au mix électrique moins carbonés (pour le VE uniquement).

Enfin, pour le **potentiel de création d'ozone photochimique**, les résultats sont similaires entre 2012 et 2020.

En conclusion générale, à l'horizon 2020, le VUL électrique est nettement moins impactant pour la catégorie d'impact d'épuisement des ressources fossiles. Dans le cas des catégories d'impact potentiel de changement climatique et création d'ozone photochimique, le VE est souvent moins impactant que les véhicules conventionnels et cela pour la majorité des bouquets énergétiques étudiés. Pour les autres catégories d'impact, les résultats sont très dépendants des scénarios utilisés.

D'une manière générale, les résultats pour le scénario de base de 2020 sont plus proches, aussi bien pour les VP que les VUL.

Il y a plusieurs raisons pour cela :

- ✓ La consommation en carburant des véhicules conventionnels est considérablement inférieure à la consommation énergétique des VE, en raison du design allégé des véhicules et des améliorations techniques à l'horizon 2020,
- ✓ Au contraire, la consommation énergétique des VE ne décroît pas significativement entre 2012 et 2020 car les VE, ayant une plus grande efficacité énergétique, sont moins sensibles à la réduction de masse.

Tableau 4-13 Résultats des indicateurs d'impact et des flux d'inventaire des différents scénarios VUL 2020

	VUL 2020 ALL	VUL 2020 ES	VUL 2020 EU27	VUL 2020 FR	VUL 2020 GB	VUL 2020 IT	VUL 2020 essence NEDC	VUL 2020 diesel NEDC
Potentiel d'épuisement des ressources minérales [kg Sb-Equiv.]	2,28E-01	2,27E-01	2,26E-01	2,26E-01	2,24E-01	2,27E-01	1,59E-01	2,52E-01
Potentiel d'épuisement des ressources fossiles [MJ]	2,04E+05	1,71E+05	1,70E+05	6,91E+04	1,93E+05	2,05E+05	3,76E+05	3,18E+05
Potentiel d'acidification [kg SO2-Equiv.]	6,30E+01	9,10E+01	8,24E+01	4,32E+01	8,48E+01	6,42E+01	5,57E+01	6,48E+01
Potentiel d'entrophisation [kg Phosphate-Equiv.]	4,52E+00	5,36E+00	4,59E+00	2,67E+00	5,86E+00	4,10E+00	6,06E+00	7,35E+00
Potentiel de changement climatique [kg CO2-Equiv.]	1,90E+04	1,46E+04	1,49E+04	6,16E+03	1,61E+04	1,65E+04	2,82E+04	2,40E+04
Potentiel de création d'ozone photochimique [kg Ethene-Equiv.]	6,57E+00	8,29E+00	7,40E+00	5,08E+00	7,11E+00	6,93E+00	1,21E+01	1,18E+01
CO [kg]	9,21E+00	1,05E+01	9,20E+00	3,66E+00	8,08E+00	8,58E+00	7,17E+01	5,96E+01
CO2 [kg]	2,03E+04	1,51E+04	1,56E+04	6,38E+03	1,65E+04	1,67E+04	3,00E+04	2,43E+04
Déchets faiblement radioactifs [kg]	3,69E-01	5,36E-01	7,07E-01	1,46E+00	4,88E-01	4,07E-01	1,06E-01	1,05E-01
Déchets moyennement radioactifs [kg]	1,75E-01	2,56E-01	3,47E-01	6,48E-01	2,36E-01	1,91E-01	5,55E-02	5,59E-02
NOx [kg]	2,63E+01	3,41E+01	2,79E+01	1,39E+01	3,74E+01	2,45E+01	3,23E+01	2,94E+01
PM (10 - 2.5) [kg]	3,11E+00	3,27E+00	3,23E+00	3,02E+00	3,19E+00	3,33E+00	2,11E+00	2,12E+00
Consommation d'énergie primaire non renouvelable [MJ]	2,61E+05	2,49E+05	2,66E+05	2,80E+05	2,64E+05	2,67E+05	4,01E+05	3,44E+05
Consommation d'énergie primaire renouvelable [MJ]	7,80E+04	8,34E+04	6,00E+04	4,73E+04	5,60E+04	5,60E+04	4,39E+04	3,04E+04
Consommation d'énergie primaire totale [MJ]	3,29E+05	3,22E+05	3,16E+05	3,17E+05	3,10E+05	3,13E+05	4,45E+05	3,74E+05
Emiss. radioactives dans l'air [Bq I129-Equiv.]	3,55E+08	4,13E+08	9,18E+08	6,45E+08	6,03E+08	3,90E+08	8,39E+08	9,22E+08
Emiss. radioactives dans l'eau [Bq I129-Equiv.]	2,63E+08	3,12E+08	3,71E+08	1,46E+09	3,27E+08	3,05E+08	1,15E+08	1,18E+08
Résidus radioactifs [kg]	2,02E+01	2,86E+01	3,60E+01	8,26E+01	2,62E+01	2,24E+01	9,27E+00	9,60E+00
Déchets radioactifs [kg]	3,28E-02	4,31E-02	5,18E-02	1,52E-01	4,10E-02	3,69E-02	1,56E-02	1,62E-02
SO2 [kg]	3,87E+01	5,95E+01	5,44E+01	2,87E+01	4,74E+01	3,92E+01	3,18E+01	3,57E+01
COV [kg]	8,99E+00	9,94E+00	9,05E+00	8,74E+00	8,99E+00	9,38E+00	1,94E+01	1,93E+01

4.3.5 Analyse de sensibilité à la consommation des auxiliaires

4.3.5.1 Scénario 2012

Dans ce chapitre, l'usage du VE est modélisé en ajoutant une consommation due aux auxiliaires : chauffage et climatisation.

Les hypothèses considérées dans cette modélisation sont :

- ✓ **Assemblage des véhicules électriques et thermiques en France,**
- ✓ **Fabrication de la batterie en France,**
- ✓ **Batterie hybride Li-Ion NMC de 24 kWh**
- ✓ **Consommations et émissions d'usage estimées sur le cycle de conduite NEDC à partir des normes Euro 5 + Chauffage + Climatisation,**
- ✓ **3 origines de l'électricité utilisée pour la charge (France, UE 27 et Allemagne),**
- ✓ **La durée de vie de la batterie est identique à la durée de vie du véhicule (150 000 km sur 10 ans),**
- ✓ **La méthode des stocks est utilisée pour modéliser la fin de vie (voir Chapitre 2.5.3.1).**

Chauffage

Tableau 4-14 Indicateurs d'impact potentiel et flux d'inventaire des scénarios d'usage avec chauffage des VP électriques à l'horizon 2012

	VP elec 2012 FRA chauffage	VP elec 2012 UE27 chauffage	VP elec 2012 ALL chauffage
Potentiel d'épuisement des ressources minérales [kg Sb-Equiv.]	0,0009	0,0009	0,0012
Potentiel d'épuisement des ressources fossiles [MJ]	29210	129059	144862
Potentiel d'acidification [kg SO2-Equiv.]	9,33	48,27	23,97
Potentiel d'entrophisation [kg Phosphate-Equiv.]	0,74	2,59	2,30
Potentiel de changement climatique [kg CO2-Equiv.]	2545	11326	14447
Potentiel de création d'ozone photochimique [kg Ethene-Equiv.]	0,64	2,94	1,77
Consommation d'énergie primaire totale [MJ]	230200	226655	237925
Consommation d'énergie primaire non renouvelable [MJ]	213529	197769	203355
Consommation d'énergie primaire renouvelable [MJ]	16671	28886	34570
CO [kg]	1,22	6,49	6,81
CO2 [kg]	2672	11757	15702
NOx [kg]	4,75	18,33	14,86
COV [kg]	0,26	0,60	0,37
SO2 [kg]	5,62	31,11	12,27
PM (10 - 2.5) [kg]	0,06	0,25	0,12
Emiss. radioactives dans l'air [Bq I129-Equiv.]	389471760	279942421	227119994
Emiss. radioactives dans l'eau [Bq I129-Equiv.]	1340369677	320719838	139409454
Résidus radioactifs [kg]	74,06	27,44	23,08
Déchets faiblement radioactifs [kg]	1,32	0,53	0,49
Déchets moyennement radioactifs [kg]	0,58	0,26	0,25
Déchets radioactifs [kg]	0,14	0,04	0,03

Climatisation

Tableau 4-15 Indicateurs d'impact potentiel et flux d'inventaire des scénarios d'usage avec climatisation des VP électriques à l'horizon 2012

	VP elec 2012 FRA Clim. Well-to- Tank	VP elec 2012 UE27 Clim. Well-to- Tank	VP elec 2012 ALL Clim. Well-to- Tank	VP Diesel 2012 Clim.			VP essence 2012 Clim.		
				Tank-to- Wheel	Well-to- Tank	Total	Tank-to- Wheel	Well-to- Tank	Total
Potential d'épuisement des ressources minérales [kg Sb-Equiv.]	0,0008	0,0009	0,0011	0,0000	0,0007	0,0007	0,0000	0,0008	0,0008
Potential d'épuisement des ressources fossiles [MJ]	27645	122148	137104	0	253785	253785	0	324290	324290
Potential d'acidification [kg SO2-Equiv.]	8,83	45,68	22,68	10,79	22,31	33,10	2,33	23,39	25,72
Potential d'entrophisation [kg Phosphate-Equiv.]	0,70	2,45	2,18	2,79	2,40	5,19	0,59	1,87	2,45
Potential de changement climatique [kg CO2-Equiv.]	2409	10719	13673	16425	2499	18924	20625	2906	23531
Potential de création d'ozone photochimique [kg Ethene-Equiv.]	0,60	2,78	1,67	5,05	2,72	7,77	4,57	3,23	7,80
Consommation d'énergie primaire totale [MJ]	217872	214517	225183	0	264871	264871	0	344055	344055
Consommation d'énergie primaire non renouvelable [MJ]	202094	187178	192464	0	254900	254900	0	325606	325606
Consommation d'énergie primaire renouvelable [MJ]	15778	27339	32718	0	9971	9971	0	18449	18449
CO [kg]	1,16	6,15	6,45	43,43	3,38	46,80	43,05	4,28	47,33
CO2 [kg]	2529	11127	14861	16425	2698	19123	20625	3865	24490
NOx [kg]	4,50	17,35	14,06	21,45	6,87	28,32	4,50	9,10	13,60
COV [kg]	0,24	0,57	0,35	9,00	2,96	11,96	9,00	3,35	12,35
SO2 [kg]	5,32	29,44	11,61	0,05	12,76	12,82	0,07	15,27	15,34
PM (10 - 2.5) [kg]	0,06	0,24	0,11	0,00	0,42	0,42	0,00	0,45	0,45
Emiss. radioactives dans l'air [Bq I129-Equiv.]	3686139 96	2649503 89	2149568 14	0	4485339	4485339	0	5139567	5139567
Emiss. radioactives dans l'eau [Bq I129-Equiv.]	1268587 541	3035440 13	1319435 23	0	4697039	4697039	0	5313342	5313342
Résidus radioactifs [kg]	70,10	25,97	21,85	0,00	0,44	0,44	0,00	0,51	0,51
Déchets faiblement radioactifs [kg]	1,25	0,51	0,46	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01
Déchets moyennement radioactifs [kg]	0,55	0,24	0,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Déchets radioactifs [kg]	0,13	0,04	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

4.3.5.2 Comparaison sur l'ensemble du cycle de vie

Les figures suivantes montrent la comparaison des scénarios avec consommation d'auxiliaires sur l'ensemble du cycle de vie des véhicules. Les scénarios de base ont été

utilisés (les hypothèses sont rappelées en début de chapitre) auxquels ont été rajoutés les valeurs liées au chauffage et à la climatisation. Les résultats sont présentés pour 3 indicateurs d'impact potentiel (épuiement des ressources minérales, acidification et changement climatique) les autres sont disponibles en annexes.

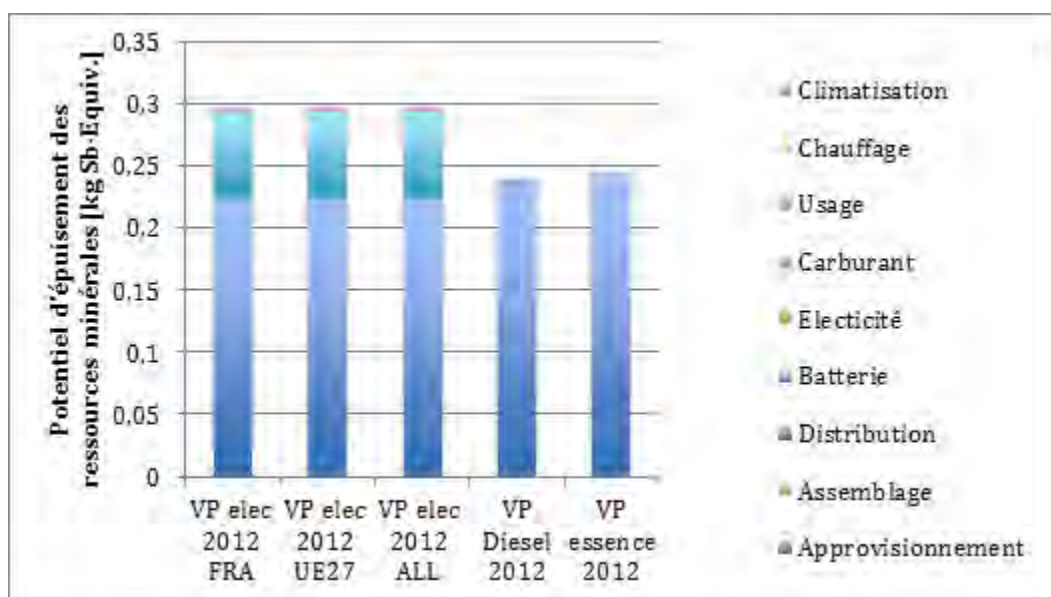


Figure 4-55 Contribution au potentiel d'épuisement des ressources minérales des différentes étapes du cycle de vie des véhicules et des surconsommations liées aux auxiliaires à l'horizon 2012

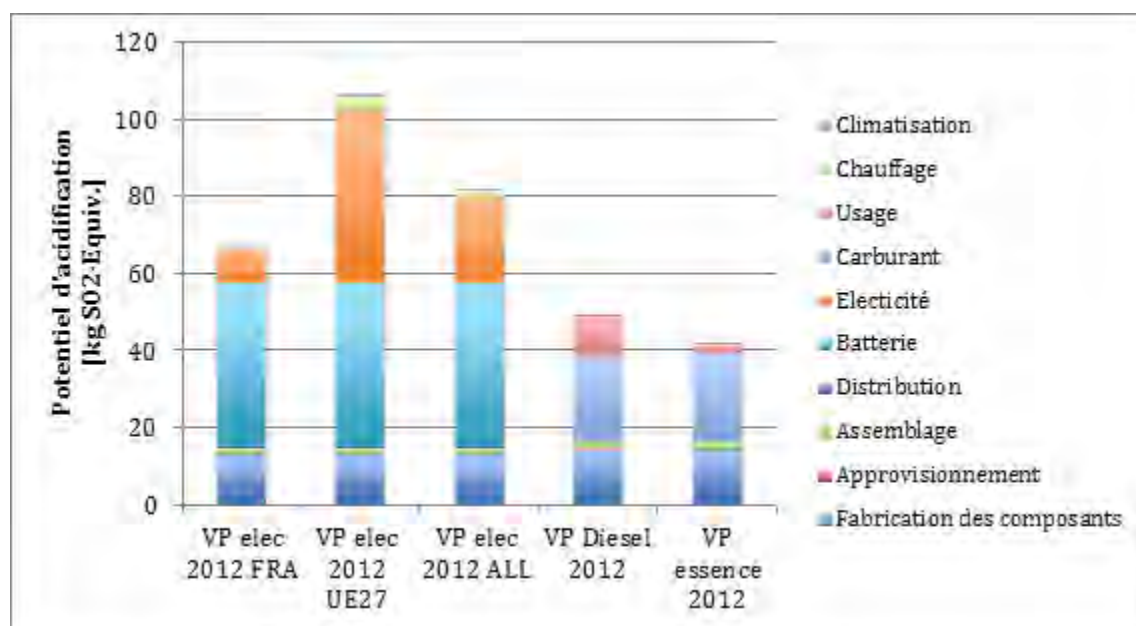


Figure 4-56 Contribution au potentiel d'acidification des différentes étapes du cycle de vie des véhicules et des surconsommations liées aux auxiliaires à l'horizon 2012

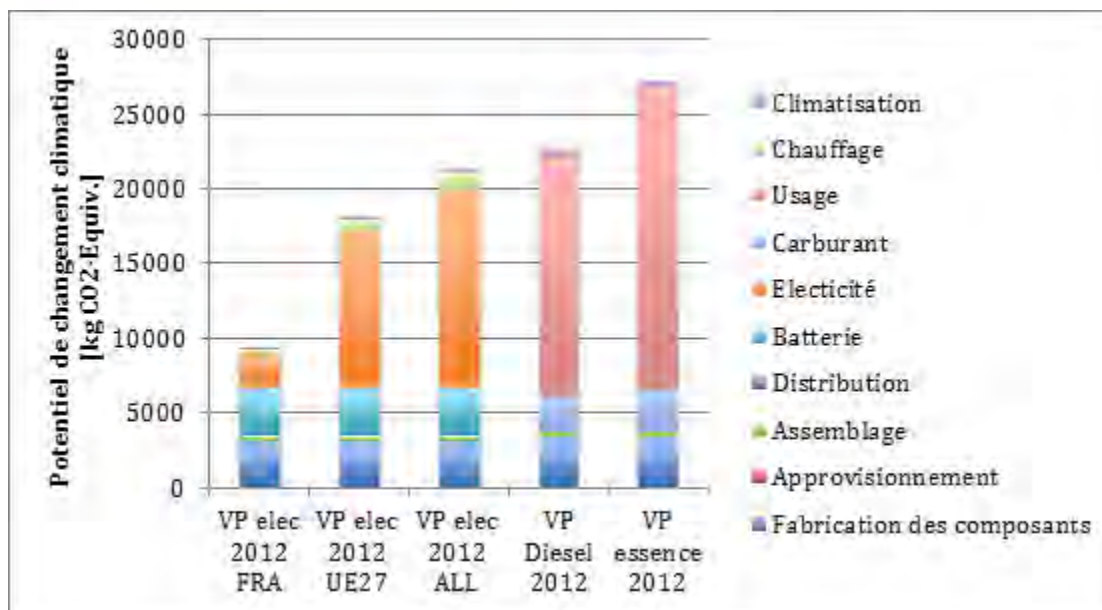


Figure 4-57 Contribution au potentiel de changement climatique des différentes étapes du cycle de vie des véhicules et des surconsommations liées aux auxiliaires à l'horizon 2012

Pour l'ensemble des indicateurs d'impact, les scénarios avec auxiliaires sont logiquement supérieurs aux scénarios électriques de référence. Les écarts sont proportionnels à la surconsommation liée au chauffage et à la climatisation de l'habitacle sur l'ensemble de la durée de vie du VE.

Pour le potentiel d'épuisement des ressources minérales, la consommation des auxiliaires n'est pas significative étant donné que la phase de production (véhicule et batterie) est responsable de cet impact.

Pour certains indicateurs comme le potentiel de changement climatique ou la consommation d'énergie primaire, l'écart entre le scénario allemand (cas défavorable en terme d'émissions de CO₂ équivalent) et le scénario de base Diesel est considérablement réduit, si bien qu'il semble difficile d'estimer le meilleur scénario sur ces indicateurs.

Les scénarios avec et sans auxiliaires possèdent une contribution au potentiel d'acidification supérieure aux VT, en raison des émissions de SO₂ et de NO_x importantes. Pour les scénarios avec auxiliaires, cet écart est logiquement plus important.

La surconsommation d'énergie liée aux auxiliaires entraîne une augmentation des bilans environnementaux (surtout due au chauffage dont la puissance est supérieure à la climatisation) d'environ 10%, ce qui est significatif, mais n'inverse pas les tendances entre VT et VE. Cependant une utilisation plus fréquente du chauffage dans un VE (25, 50 ou 100% du temps de parcours) aurait une importance significative sur ces tendances, notamment pour les potentiels d'acidification et d'eutrophisation.

4.3.5.3 Scénario 2020

Par rapport au scénario 2012, les auxiliaires modélisés dans le scénario 2020 consomment moins d'énergie (2kW au lieu de 4 kW pour le chauffage et 0,4 kW au lieu de 0,5 kW pour la climatisation). Ainsi le scénario présente le cas le plus défavorable. Le système modélisé étant linéaire, les tendances des scénarios 2020 resteront les mêmes qu'en 2012, avec cependant une contribution plus faible pour la climatisation et le chauffage.

Les tableaux des indicateurs d'impact et des flux d'inventaires des scénarios 2020 des consommations des auxiliaires sont disponibles en annexes.

4.3.6 Analyse de sensibilité au lieu de fabrication de la batterie

Le tableau suivant présente les résultats d'impacts potentiels et d'inventaire pour une batterie fabriquée en France et au Japon.

Un bouquet électrique japonais a été choisi car la modélisation d'une fabrication de la batterie au Japon est représentative de la réalité industrielle. De plus, le bouquet électrique japonais est bien différent du français (part de nucléaire moins important et énergies fossiles et non renouvelable plus important, voir Chapitre 3.1.6.1) ce qui assure des différentiels significatifs en termes d'indicateurs d'impacts potentiels entre les deux scénarios étudiés.

Tableau 4-16 Comparaison du lieu de fabrication (France / Japon) - résultats d'impact potentiel et d'inventaire

Indicateurs d'impact	France	Japon
Potentiel d'épuisement des ressources minérales [kg Sb-Equiv.]	0,07	0,07
Potentiel d'épuisement des ressources fossiles [MJ]	35386	37068
Potentiel d'acidification [kg SO2-Equiv.]	42,59	42,81
Potentiel d'entrophisation [kg Phosphate-Equiv.]	1,48	1,50
Potentiel de changement climatique [kg CO2-Equiv.]	3168	3300
Potentiel de création d'ozone photochimique [kg Ethene-Equiv.]	2,27	2,29
Inventaire		
Consommation d'énergie primaire totale [MJ]	62388	62374
Consommation d'énergie primaire non renouvelable [MJ]	56530	56500
Consommation d'énergie primaire renouvelable [MJ]	5858	5873
CO [kg]	4,44	4,47
CO2 [kg]	3020,47	3155,98
NOx [kg]	8,87	9,00
COV [kg]	0,67	0,69
SO2 [kg]	31	31
PM (10 - 2.5) [kg]	2,21	2,23

Emiss. radioactives dans l'air [Bq I129-Equiv.]	57916971	103665027
Emiss. radioactives dans l'eau [Bq I129-Equiv.]	146162331	132406742
Résidus radioactifs [kg]	8,47	7,78
Déchets faiblement radioactifs [kg]	0,15	0,14
Déchets moyennement radioactifs [kg]	0,07	0,06
Déchets radioactifs [kg]	0,02	0,01

Impact du lieu de fabrication

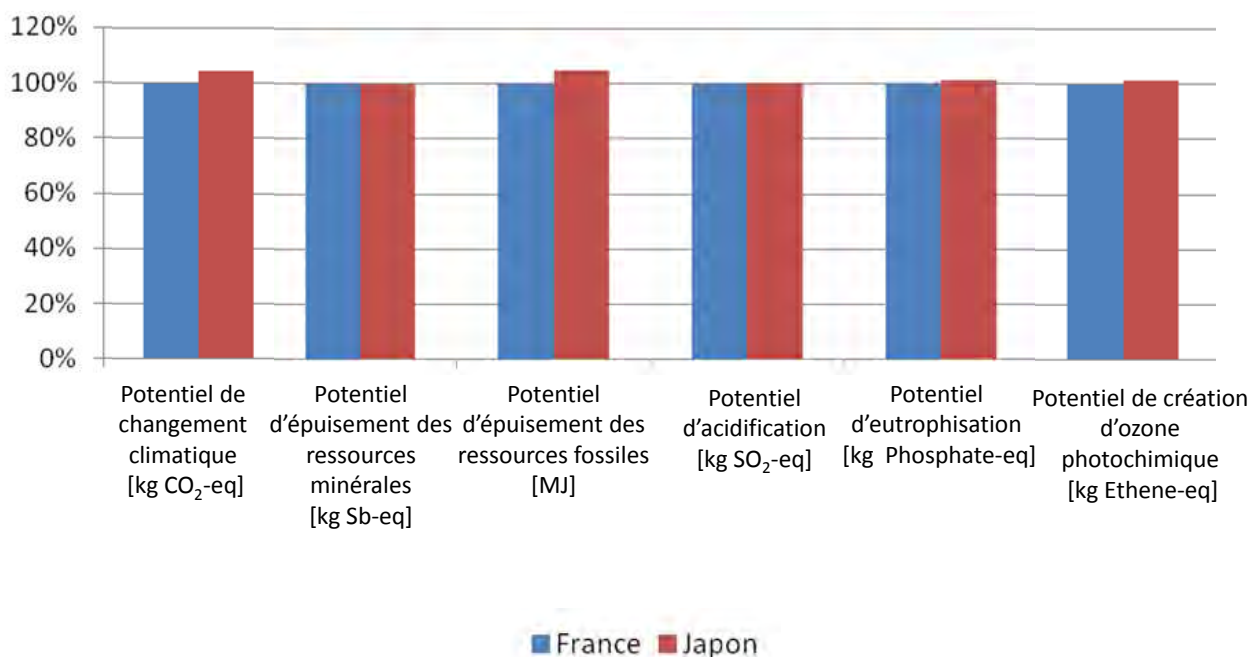


Figure 4-58 Comparaison des indicateurs d'impact selon les lieux de fabrication des batteries

Les résultats montrent que le mix électrique choisi pour la fabrication de la batterie est très peu impactant. Ce qui impacte considérablement les potentiels d'impact d'une batterie est la phase d'extraction des matériaux pour la cathode et non la fabrication et l'assemblage des éléments de la batterie.

4.3.7 Analyse de sensibilité à la durée de vie de la batterie

Les hypothèses utilisées dans ce chapitre sont :

- ✓ Assemblage des véhicules électriques et thermiques en France,
- ✓ Fabrication de la batterie en France,
- ✓ Batterie hybride Li-Ion NMC de 24 kWh
- ✓ Consommations et émissions d'usage estimées sur le cycle de conduite NEDC à partir des normes Euro 5,
- ✓ 2 origines de l'électricité utilisée pour la charge (France, Allemagne),
- ✓ 3 durées de vie de la batterie sont utilisées, 1, 1,2 et 2 batterie sur la durée de vie du véhicule (150 000 km sur 10 ans),

- ✓ **La méthode des stocks est utilisée pour modéliser la fin de vie du véhicule (voir Chapitre 2.5.3.1),**
- ✓ **Dans les scénarios utilisant plus d'une batterie la fin de vie est calculée en utilisant la méthode des impacts évités, prenant en compte les impacts du recyclage de la batterie et les impacts évités liés à la matière recyclée récupérée (voir Chapitre 2.5.3.2).**

Au cours des réunions du comité technique, la durée de vie de la batterie a été discutée. Dans le scénario de référence, il est supposé que la durée de vie de la batterie est la même que la durée de vie du véhicule. C'est ce qui est actuellement demandé dans les cahiers des charges des batteries émis par les constructeurs. Cependant, le manque de retour d'expérience fait peser une forte incertitude sur ce point. 2 scénarios modélisant la réduction de la durée de vie de la batterie ont été réalisés.

Dans le premier scénario, la batterie est en location, ainsi si elle rencontre un incident, elle est envoyée au recyclage et remplacée par une nouvelle batterie. Si la batterie en fin de vie est réutilisable pour un autre véhicule ou une autre application, alors elle est réutilisée. Pour ce scénario, il est supposé que 1,2 batteries sont nécessaires sur l'ensemble du cycle de vie du véhicule électrique. Une autre solution pour ce type de scénario serait de remplacer les cellules hors d'usage de la batterie et ainsi d'utiliser la même batterie sur la durée de vie du véhicule. A l'heure actuelle, le stock de batterie est trop petit pour envisager une telle activité.

Un scénario utilisant 2 batteries sur l'ensemble du cycle de vie du VE est modélisé. Ce scénario représente un cas très défavorable, qui ne représenterait aucun avantage économique. Il est utilisé uniquement comme valeur maximale de l'analyse de sensibilité.

Le tableau ci-dessous montre les indicateurs d'impact potentiel et les flux d'inventaire des 2 scénarios pour un VE utilisé en France et un utilisé en Allemagne.

Tableau 4-17 indicateurs d'impact et flux d'inventaire du cycle de vie d'un VE utilisé en France et en Allemagne pour 0,2 batterie et 1 batterie supplémentaire

	pour 1,2 batterie		pour 2 batteries	
	VE 2012 ALL	VE 2012 FRA	VE 2012 ALL	VE 2012 FRA
Potentiel d'épuisement des ressources minérales [kg Sb-Equiv.]	0,30	0,30	0,36	0,36
Potentiel d'épuisement des ressources fossiles [MJ]	207845	101175	227682	121012
Potentiel d'acidification [kg SO2-Equiv.]	55,5	42,0	67,8	54,3
Potentiel d'eutrophisation [kg Phosphate-Equiv.]	4,51	3,08	5,32	3,89
Potentiel de changement climatique [kg CO2-Equiv.]	19304	8326	20978	10001
Potentiel de création d'ozone photochimique [kg Ethene-Equiv.]	5,78	4,74	6,64	5,60
Consommation d'énergie primaire totale [MJ]	342355	335230	382157	375032
Consommation d'énergie primaire non renouvelable [MJ]	302955	312339	339372	348756
Consommation d'énergie primaire renouvelable [MJ]	39400	22891	42784	26276
CO [kg]	30	25	33	28
CO2 [kg]	20101	8083	21684	9666
NOx [kg]	26,9	17,5	31,6	22,2
COV [kg]	5,81	5,71	6,26	6,16
SO2 [kg]	32,5	26,3	40,2	34,1
PM (10 - 2.5) [kg]	1,71	1,66	2,51	2,47
Emiss. radioactives dans l'air [Bq I129-Equiv.]	806787610	956529530	851605971	1001347891
Emiss. radioactives dans l'eau [Bq I129-Equiv.]	388057851	1495739610	504075685	1611757443
Résidus radioactifs [kg]	37,3	84,3	44,0	91,0
Déchets faiblement radioactifs [kg]	0,70	1,46	0,81	1,58
Déchets moyennement radioactifs [kg]	0,35	0,65	0,40	0,70
Déchets radioactifs [kg]	0,06	0,16	0,07	0,17

La figure suivante montre les indicateurs d'impact potentiel des différents scénarios utilisant 1,2 et 2 batteries pour la France et l'Allemagne comparés au scénario de référence électriques et thermiques.

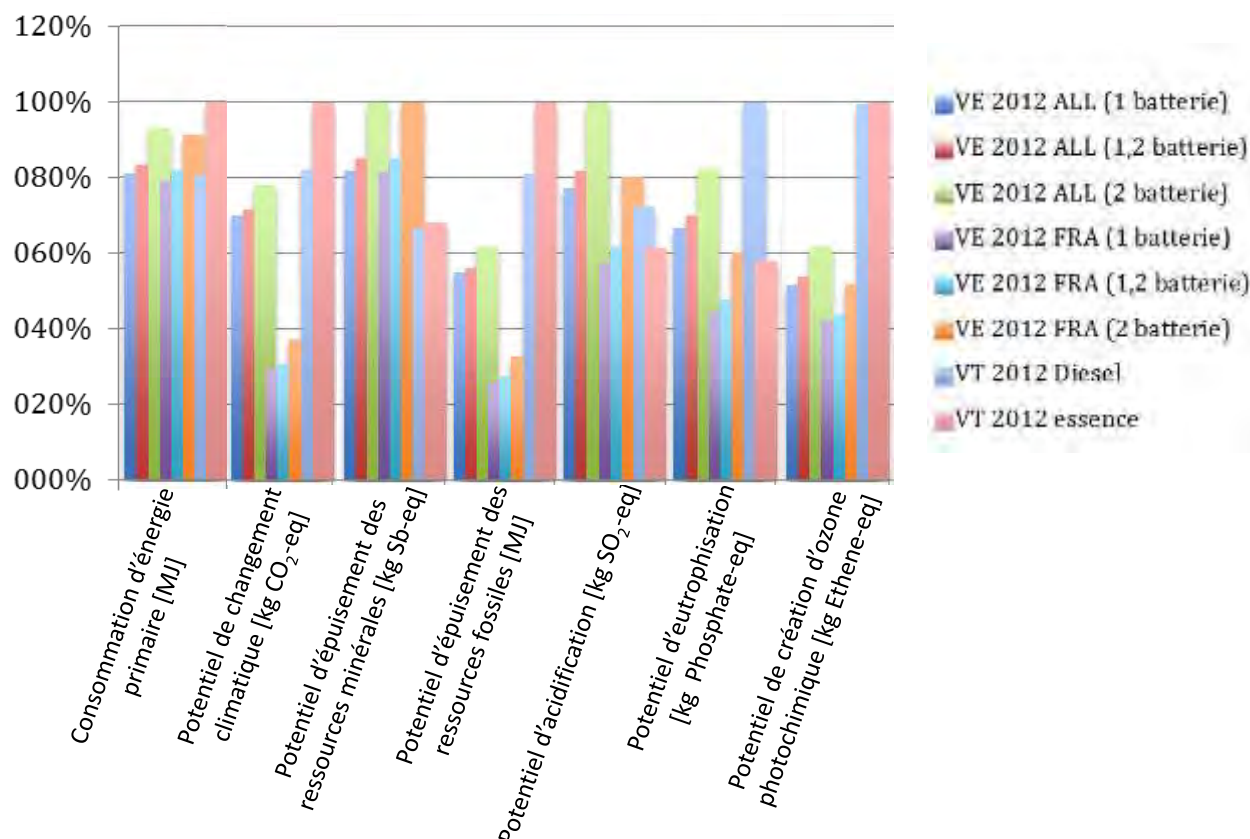


Figure 4-59 Comparaison des indicateurs d'impact potentiel des scénarios utilisant 1,2 et 2 batterie pour l'Allemagne et la France par rapport au scénario de référence

Dans le cas des scénarios utilisant 1,2 et 2 batterie, les résultats des indicateurs d'impact changent significativement. L'indicateur de changement climatique augmente de 2 à 10 points. L'indicateur d'épuisement des ressources fossiles augmente de 4 à 8 points, le potentiel de création d'ozone photochimique gagne environ 10 points et l'indicateur d'eutrophisation entre 12 et 15 points. L'indicateur d'acidification augmente significativement. La consommation d'énergie primaire augmente de 10% si bien que les VE dépassent le VT Diesel.

Cette analyse montre que la durée de vie de la batterie possède un impact considérable. Ainsi la façon dont est traitée la batterie hors d'usage aura une conséquence importante sur l'impact environnemental global du VE.

4.3.8 Analyse d'incertitudes

Tout d'abord, une liste des paramètres influents a été établie, selon les ressources bibliographiques. Elle a été discutée avec les membres du comité technique.

En première approximation, tous les paramètres pouvaient être considérés comme indépendants, excepté ceux sur la durée de vie du véhicule et le nombre de batteries utilisées.

Ensuite, comme le modèle ACV est linéaire, et comme aucune distribution de probabilité n'était disponible pour les paramètres d'incertitudes, une analyse d'incertitude simplifiée⁵⁶ a été menée en calculant les valeurs minimum et maximum pour chacun des paramètres. Cela a conduit à des intervalles de valeurs qui ont été ajoutés afin d'estimer l'incertitude totale sur le système.

Pour le véhicule électrique, aussi bien le cas de base que le scénario allemand ont été utilisés pour présenter la diversité des situations du véhicule électrique et pour faire une comparaison pertinente avec le véhicule thermique.

Les paramètres clés d'incertitude sont donnés ci-dessous :

- ✓ Batterie
 - Densité énergétique de la batterie
 - Composition de la batterie
 - Pays de production de la batterie
 - Durée de vie de la batterie
- ✓ Utilisation
 - Conditions réelles de consommation énergétique (pour un VE et VT),
 - Mix électrique
 - Système de chauffage
 - Système de climatisation
 - Durée de vie du véhicule
- ✓ Fin de vie
 - Par définition, l'incertitude sur le scénario 2020 est plus forte que celle sur le scénario 2012. Cependant, étant donné la proximité des résultats, l'analyse d'incertitude est menée sur le scénario 2012 uniquement.

4.3.8.1 Description des paramètres clés

Batterie

Densité énergétique de la batterie

La densité énergétique de la batterie dépend des matériaux actifs utilisés dans la cathode : plus il y a de matériaux tels que le manganèse, le cobalt et le nickel, plus la densité énergétique est basse. Comme montré dans le chapitre précédent concernant les résultats ACV de la batterie, le potentiel d'impact des catégories dépend du poids des matériaux utilisés dans la composition de masse active.

2 scénarios ont ainsi été réalisés :

⁵⁶ L'analyse d'incertitudes suivant n'utilise pas la méthodologie classique de Montecarlo. Le modèle utilisé est plus proche du « FRAMEWORK FOR SCENARIO DEVELOPMENT IN LCA » édité par le SETAC-Europe LCA Working Group 'Scenario in Development in LCA' en 1998.

- ✓ Minimum: haute densité énergétique de la batterie avec une réduction de 20% de la masse active de la cathode.
- ✓ Maximum: faible densité énergétique de la batterie avec une augmentation de 20% de la masse active de la cathode.

Composition de la batterie

La composition physique de la batterie est un des éléments les plus importants pour la production d'un véhicule électrique. La contribution de la production de la batterie aux différents indicateurs d'impacts tout au long du cycle de vie du véhicule électrique est significative, comme présenté dans les résultats du chapitre précédent.

L'extraction des métaux utilisés dans la production de la cathode : nickel cobalt et manganèse sont responsables de cette forte contribution. Pour les batteries Li-ion NMC, la proportion de ces trois métaux peut varier.

3 scénarios ont été proposés pour modéliser cette incertitude :

- ✓ Scénario de base $\rightarrow \text{LiNi}_{0,33}\text{Co}_{0,33}\text{MnO}_{0,33}$
- ✓ 80% Nickel $\rightarrow \text{LiNi}_{0,8}\text{Co}_{0,1}\text{MnO}_{0,1}$
- ✓ 80% Manganese $\rightarrow \text{LiNi}_{0,1}\text{Co}_{0,1}\text{MnO}_{0,8}$

Pays de production de la batterie

Cette variable a été testée lors d'une analyse de sensibilité présentée dans le rapport, ainsi :

- ✓ La valeur minimum correspond à la production Française des matériaux actifs de la batterie,
- ✓ La valeur maximale correspond à la production Japonaise.

Durée de vie des batteries

Dans le scénario de référence, on considère que la durée de vie de la batterie est équivalente à celle du véhicule. Un scénario comprenant 1,2 batterie durant la durée de vie du véhicule électrique a également été modélisé. Le comité technique a validé la probabilité de ce scénario. Un scénario comprenant 2 batteries a également été modélisé dans le cadre de l'analyse d'incertitude afin de maximiser l'impact potentiel de la batterie.

Utilisation

Consommation durant l'utilisation (carburant et électricité)

Le scénario de base repose sur des valeurs de consommation issues des essais d'homologation (litres de carburant pour les véhicules à moteur à combustion et kWh pour le véhicule électrique), ce qui correspond aux valeurs officielles fournies par les constructeurs automobiles pour un cycle de conduite NEDC. Aussi bien pour le VE que pour le VT, les valeurs fournies par l'homologation NEDC représentent le scénario minimum, car on considère qu'il est difficile de parvenir à des consommations plus faibles que celles mesurées sur cycle NEDC. Pour définir des scénarios maximum, différentes fonctionnalités ont été prises en compte pour le VE et le VT :

- ✓ Pour le VE, la variation de l'efficacité de la batterie selon la température extérieure a été prise en compte. En se basant sur l'étude de l'Université Western Michigan The Impact of Driving Conditions on pHEV Battery Performance, N. Christensen, 2011) qui montre la relation linéaire entre la performance électrique et la température, il a été décidé de prendre en compte une surconsommation de 30% liée à la variation de température.
- ✓ Pour le VT, la consommation réelle a été calculée grâce à la surconsommation lors du démarrage. Considérant que le démarrage à froid est plus pertinent dans notre cas puisque nous nous concentrons sur des voyages de courte distance, une surconsommation de 10%, liée au démarrage à froid a été prise en compte comme valeur maximale dans notre scénario.

Mix électriques

Pour l'analyse de l'incertitude, les scénarios Français (scénario de base) et Allemands ont été considérés. L'incertitude sur le mix électrique a été modélisée grâce à la production d'électricité verte décrite au chapitre 3.1.6.1. Ainsi, la production d'électricité verte est la valeur minimale et le mix national la valeur maximale.

Chauffage

Concernant le chauffage, le scénario maximal considère que le système de chauffage est utilisé 25% du temps, au lieu de 10% dans le scénario présenté dans les résultats d'ACV (Chapitre 4.3.5). Le calcul utilisé pour déterminer la surconsommation due au système de chauffage est détaillé dans le chapitre 3.1.8.1. La surconsommation est calculée pour le VE et pour le VT selon des modèles différents.

Climatisation

Pour le scénario de climatisation, le scénario maximum prend en compte un système de climatisation utilisé à 50% du temps, au lieu de 25% dans le scénario présenté dans les résultats d'ACV (Chapitre 4.3.5). Le calcul utilisé pour déterminer la surconsommation due à la climatisation est détaillé dans le chapitre 3.1.8.2. La surconsommation est calculée pour le VE et pour le VT.

Durée de vie du véhicule

Pour comprendre la pertinence du véhicule électrique en comparaison au véhicule thermique, les résultats de l'ACV ont été calculés pour un véhicule qui dure de 0 à 200 000km.

Fin de vie

Le scénario des impacts évités est utilisé comme scénario minimal. Il n'y a pas de fin de vie dans le scénario maximum.

4.3.8.2 Présentation des résultats d'incertitude

Les graphiques suivants montrent l'analyse d'incertitude pour les différents indicateurs d'impact et les valeurs minimales et maximales.

Pour chaque catégorie d'impact, les 3 premiers graphiques montrent l'incertitude pour les différentes phases du cycle de vie du véhicule: production (avec la batterie pour le VE), utilisation (pour 150 000 km) et fin de vie. Pour chaque graphique, les différents facteurs d'incertitude ainsi que l'incertitude cumulée sont présentés.

- le graphique de la phase de production présente les incertitudes liées à la composition, la densité énergétique, le pays d'assemblage et la durée de vie de la batterie, ainsi que l'incertitude cumulée pour la phase de production du VE et des VT (aucune incertitude n'a été utilisée pour la phase de production des VT).
- Le graphique de la phase d'usage présente, en premier lieu, la différence entre les mix nationaux et le « green mix » présenté dans le chapitre 3 (les 2 premières colonnes du graphique). Ensuite, les incertitudes de la phase d'usage sont présentées pour 3 scénarios électrique (France, Allemagne et « green mix ») et 2 scénarios thermique (Diesel et essence), chaque scénario est constitué de 4 colonnes correspondants : à la consommation en conduite réelle, à la surconsommation due au chauffage, à la surconsommation due à la climatisation, à l'incertitude cumulée.
- Le graphique de fin de vie montre l'incertitude méthodologique pour le VE et les VT (méthode des stocks vs méthode des impacts évités).

Un autre graphique présente ensuite l'impact des véhicules de 0 à 200 000 km ; celui-ci regroupe toutes les incertitudes précédentes hormis la phase de fin de vie qui n'est pas prise en compte.

Energie Primaire

La figure suivante montre les incertitudes de la demande d'énergie primaire. La durée de vie des batteries est la source principale des incertitudes.

Pour ce qui est des scénarios de mix énergétique, le choix du mix Français ou Allemand conduit à des écarts relativement faibles. Le green mix est lui 20 à 30% inférieur principalement parce que l'efficacité énergétique de la production d'hydroélectricité est plus grande.

L'indicateur de demande d'énergie primaire indiqué inclut également les ressources énergétiques d'origine renouvelable, tels que l'eau et le vent.

Les scénarios réalisés sur différentes conditions d'opérations montrent que, les conditions extérieures et le chauffage sont des sources majeures d'incertitudes pour le véhicule électrique. Les incertitudes pour les VTs sont plus faibles. Pour le véhicule Diesel, les résultats sont de même grandeur que ceux pour un VE avec un mix Français ou Allemand. Les résultats pour le véhicule essence varient à des niveaux légèrement supérieurs.

Analyse d'incertitudes sur la consommation d'énergie primaire totale [GJ]

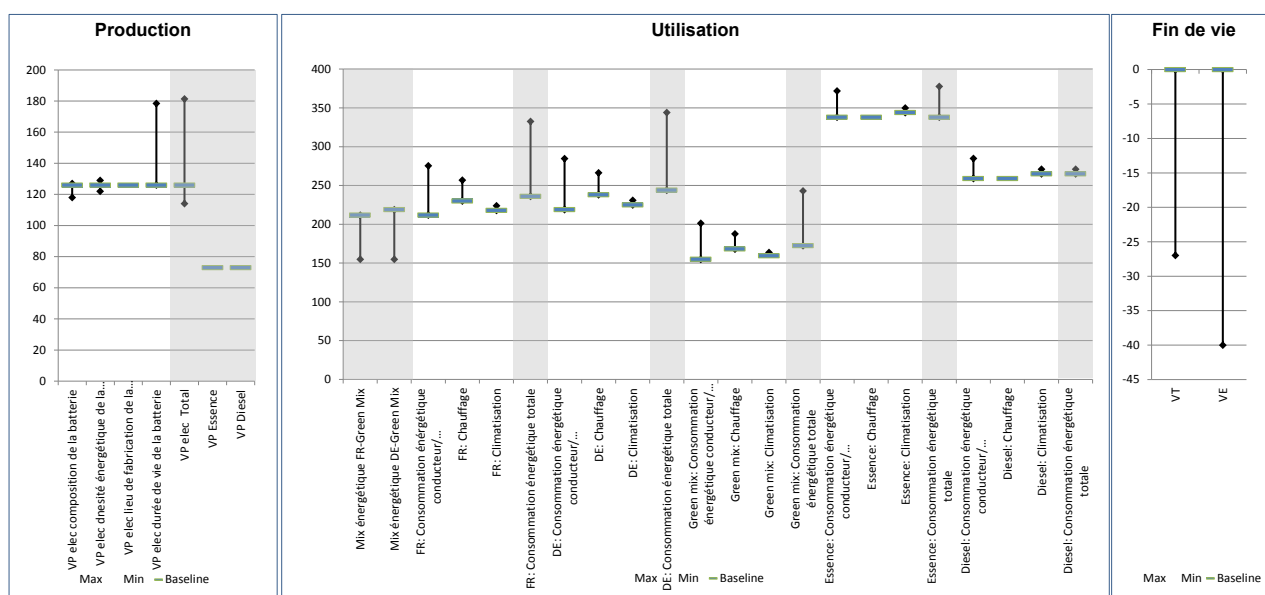


Figure 4-60 Incertitudes sur la consommation d'énergie primaire totale pour la production, l'utilisation et la fin de vie

La figure suivante montre les variabilités de la consommation d'énergie primaire totale. Les résultats des scénarios de référence du VE sont proches de ceux du véhicule essence. En termes de demande d'énergie primaire, le véhicule Diesel est meilleur que le VE. Si l'on considère en plus les fortes incertitudes de la phase d'utilisation, le VE est, en termes d'énergie primaire, au meilleur des cas, au même niveau qu'un véhicule essence.

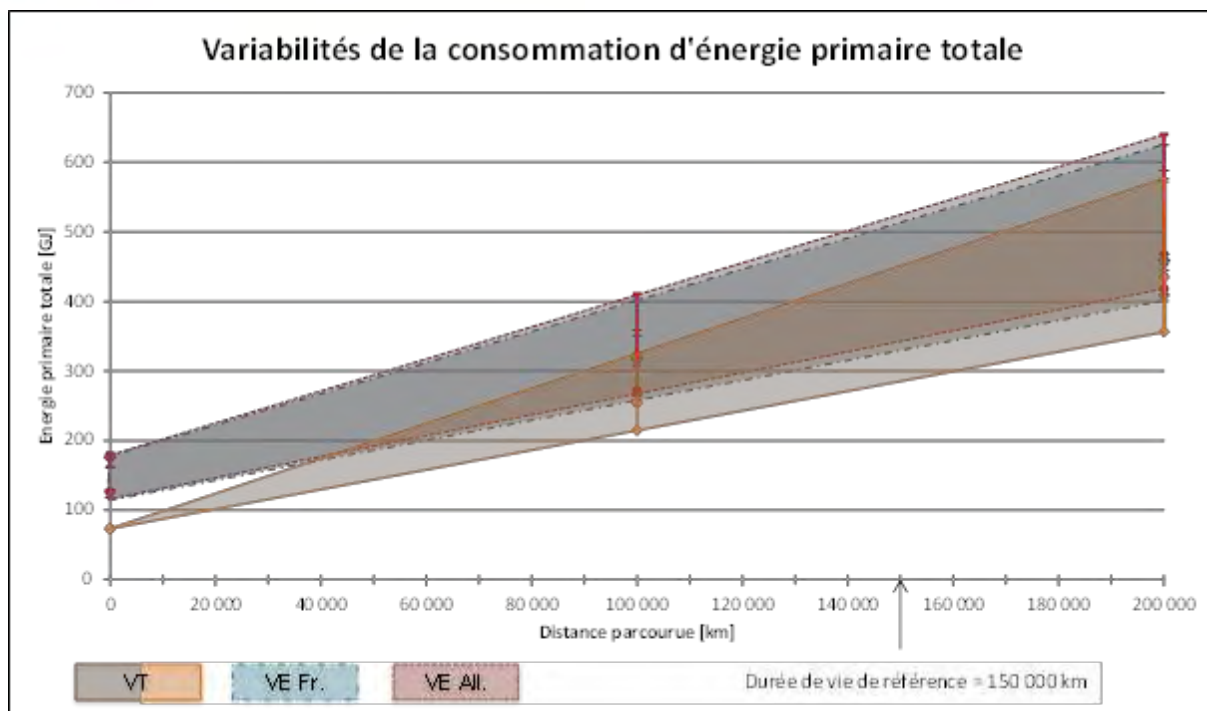


Figure 4-61 Variabilités de la consommation d'énergie primaire totale pour le cycle de vie complet (sans le scénario de fin de vie)

Potentiel de Changement Climatique

Analyse d'incertitudes sur le potentiel de changement climatique [kg CO₂e]

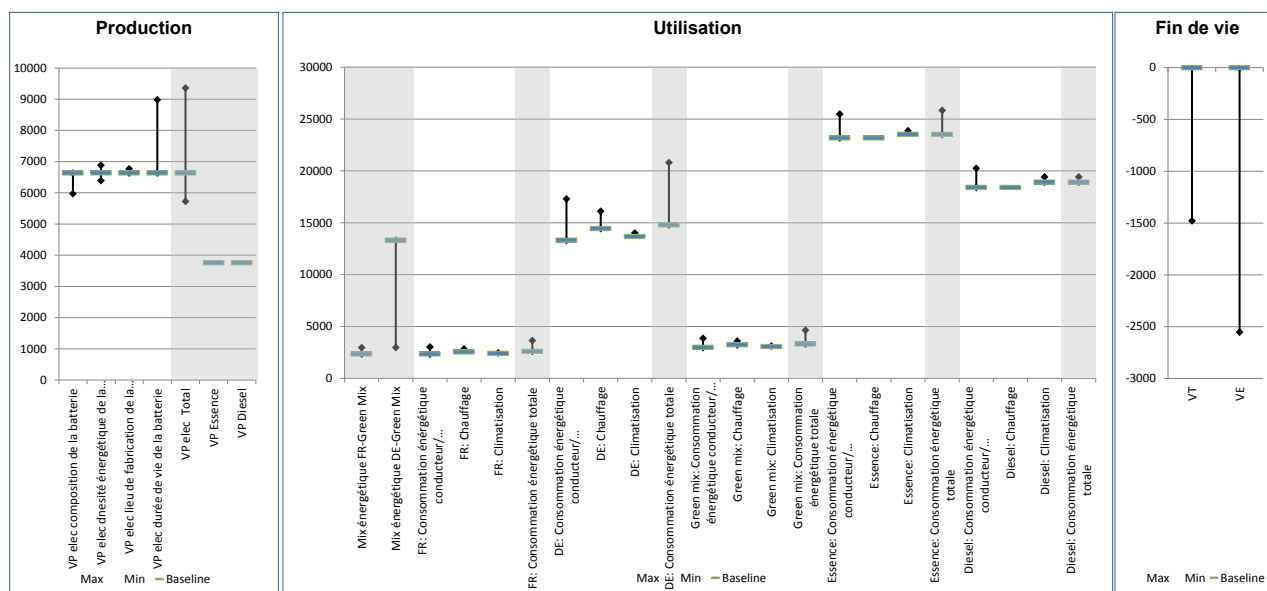


Figure 4-62 Incertitude sur le potentiel de changement climatique pour la production, l'utilisation et la fin de vie

Ce graphique présente les incertitudes des résultats comme une conséquence des incertitudes dans les données modélisées selon les hypothèses définies au début de ce chapitre (composition du véhicule, composition de la batterie et sa durée de vie, consommations des véhicules).

La figure ci-dessus présente les résultats de l'analyse d'incertitude pour le potentiel de changement climatique. Pour la phase de production du VE ; la durée de vie de la batterie a une grande importance (variation de 35% sur le scénario de base) ; la variation de la densité énergétique et de la composition de la batterie est également importante (environ 10% de variation).

Pour le véhicule thermique, aucune incertitude n'a été prise en compte, car elles seraient identiques entre la caisse assemblée peinte du VE et la production du VT et donc sans effet majeur sur les résultats de l'étude. En fin de compte, l'incertitude de la production totale du VE est plus grande que celle du VT en raison de la production de batteries.

Pour la phase d'utilisation, on peut observer que le scénario ayant le green mix en France est plus impactant que le scénario Français de référence en raison des faibles émissions de CO₂ du mix Français. Les principales émissions de GES du green mix sont principalement dues au taux d'incinération des déchets et du biogaz présents dans ce scénario.

Les autres incertitudes prises en compte lors de la phase d'utilisation (chauffage, climatisation et conditions extérieurs) sont d'une importance mineure pour les émissions de gaz à effet de serre du cycle de vie compte tenu de l'utilisation du mix Français. Le mix électrique Français, avec son très faible taux d'émissions GES ne présente qu'un très faible impact malgré de nombreux cas d'incertitudes étudiés dans cette étude.

Le green mix présente des résultats similaires. Les émissions spécifiques au GES du mix Allemand sont les plus élevées de tous les scénarios de mix électriques étudiés. Dans ce cas, l'analyse des incertitudes a bien plus d'importance ; les paramètres tels que les conditions extérieures et le chauffage conduisent aux plus grandes variations des résultats.

Le potentiel de changement climatique de la phase d'utilisation pour le VT est généralement à un niveau légèrement plus élevé que pour le VE mais les incertitudes calculées à partir des résultats sont plus faibles. En considérant les valeurs maximum de l'analyse d'incertitude, les émissions de la phase d'utilisation du VE et le VT Diesel sont dans le même ordre de grandeur avec un mix énergétique Allemand.

Les résultats pour la fin de vie ont déjà été présentés dans les chapitres précédents.

La figure suivante présente les incertitudes combinées pour le cycle de vie. Les lignes rouges et bleues représentent les scénarios de base les plus optimistes ligne pour le VE avec une ou deux batteries, avec le mix Allemand et Français. Les lignes en pointillé rouge et bleu indiquent respectivement les zones d'incertitudes du VE allemand et du VE français présentées sur les graphiques précédents. Les lignes orange et les zones représentent les VTs et les plages d'incertitudes.

Dans le scénario de référence présenté ici, ni chauffage, ni climatisation ne sont pris en compte. Un scénario d'utilisation réelle est donc probablement nettement au-dessus de la ligne de base. En comparant le VT avec un VE selon un mix allemand, on aperçoit que le VE pour un cycle de vie entre 150 000 km et même 200 000 km conduit à des résultats

de même ordre de grandeur que le VT. Selon les conditions d'utilisation, il est possible que le VE atteigne des performances environnementales similaires à celles du VT, soit légèrement moins bonnes que celles calculées dans le scénario de référence où le VE se situait à un niveau similaire à celui d'un véhicule à moteur Diesel. Si l'on considère le mix Français, le VE se positionne alors nettement devant le VT, avec des résultats nettement inférieurs.

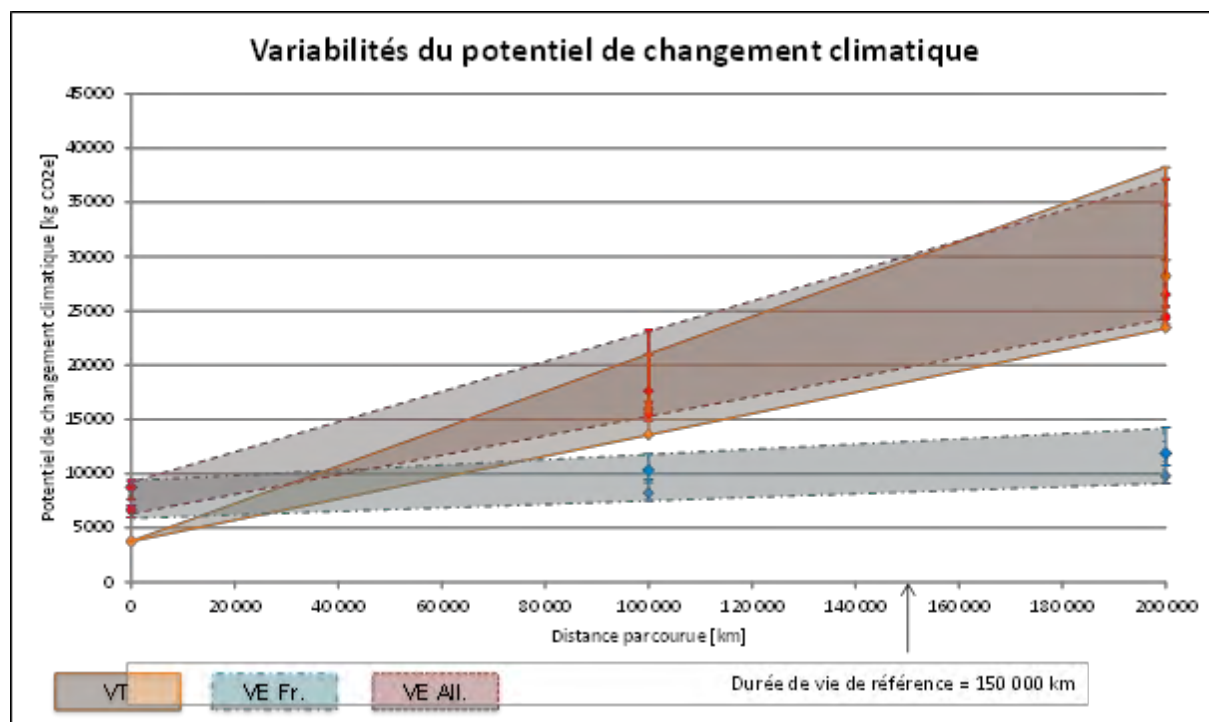


Figure 4-63 Variabilités de potentiel de changement climatique sur le cycle de vie complet (sans scénario de fin de vie)

Potentiel d'épuisement des ressources fossiles

La figure suivante présente l'analyse d'incertitudes de l'épuisement des ressources fossiles.

Analyse d'incertitudes sur le potentiel d'épuisement des ressources fossiles [MJ]

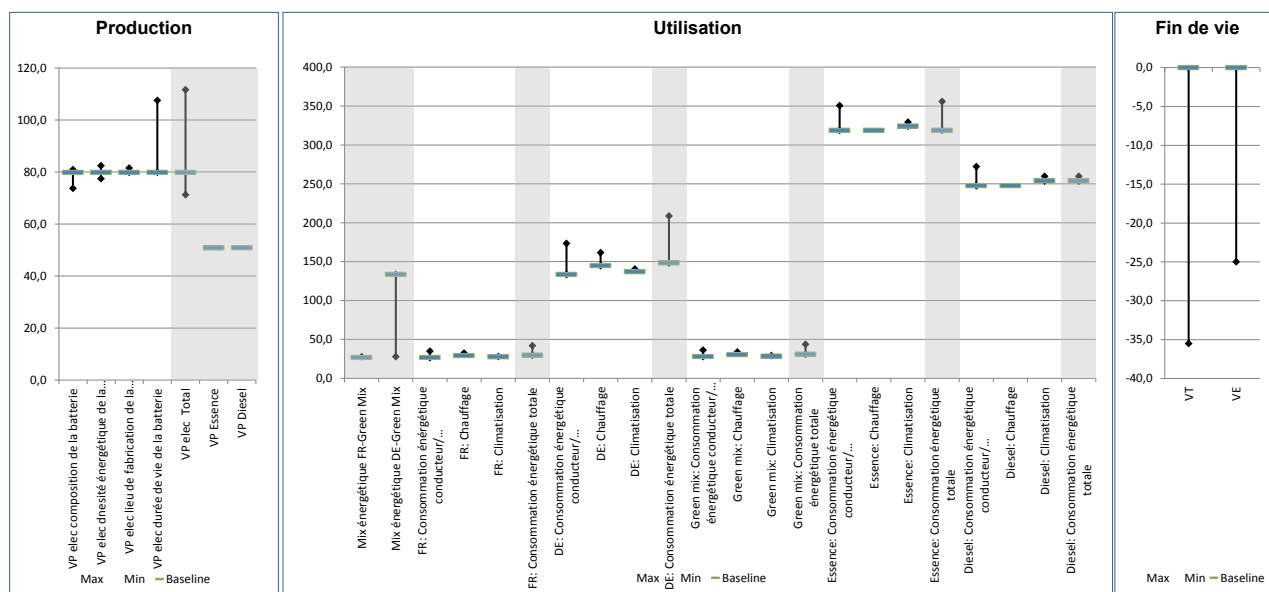


Figure 4-64 Incertitudes sur le potentiel d'épuisement des ressources fossiles pour la production, l'utilisation et la fin de vie

Lors de la phase de production, l'intervalle des incertitudes est comparable aux résultats précédemment présentés pour l'énergie primaire. Lors de la phase d'utilisation, l'ADP fossile est très faible pour les mix Français et green mix et les incertitudes y sont également faibles. Les résultats du mix Allemand se situent entre les résultats du scénario Français et ceux des véhicules thermiques.

La figure suivante présente les résultats pour le cycle de vie complet. Le VE apparaît dans les mêmes ordres de grandeur (voir légèrement inférieur) que les véhicules thermiques comparé au scénario Allemand.

Dans le pire des cas, le véhicule électrique atteindra les pires résultats du véhicule Diesel pour une durée de vie de 150.000 km et 200.000 km.

Dans le cas d'un mix Français, le véhicule électrique est nettement meilleur que les deux VT.

En conclusion, le véhicule électrique offre la possibilité de préserver des quantités significatives de ressources fossiles, même s'il est important de rappeler que l'ADP fossile ne prend pas en compte les ressources nucléaires. Il n'y a actuellement pas d'indicateur mid-point disponibles dans GaBi pour refléter la rareté de l'uranium et des autres ressources fossiles de façon satisfaisante. Ainsi, il est difficile de tirer des conclusions pertinentes sur la capacité du véhicule électrique à préserver les ressources énergétiques.

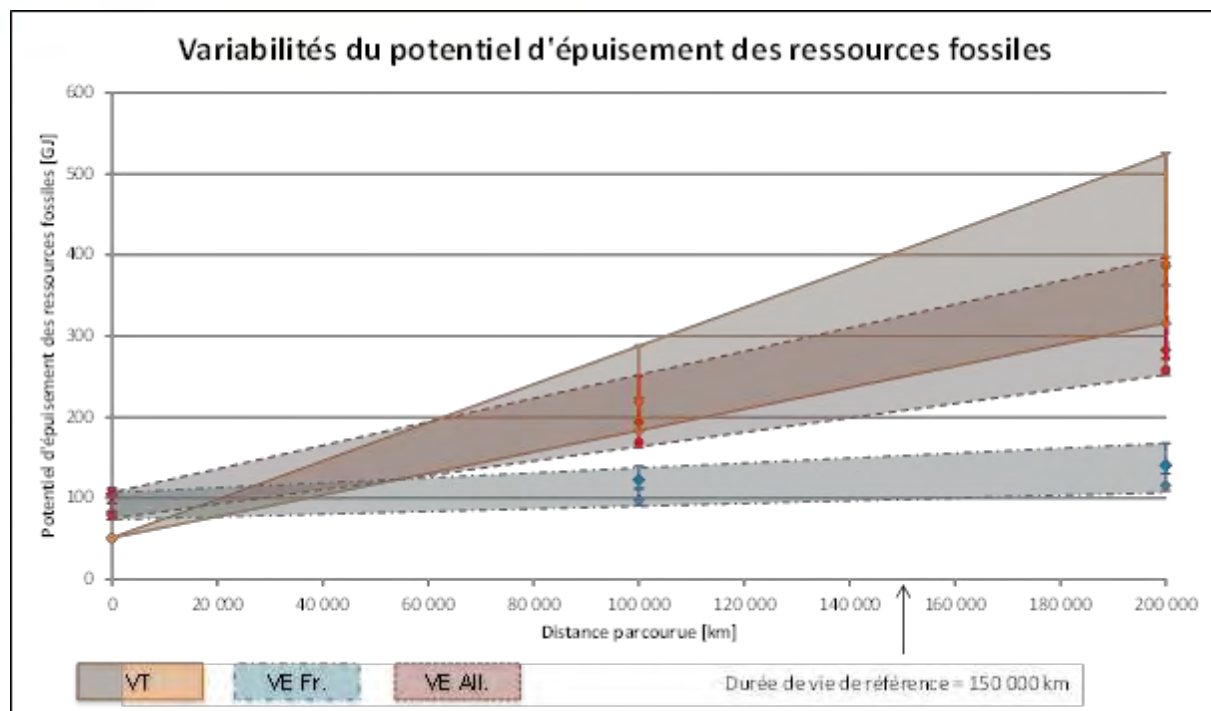


Figure 4-65 Variabilités du potentiel d'épuisement des ressources fossiles sur le cycle de vie complet (sans la phase de fin de vie)

Potentiel d'acidification

La figure suivante présente les résultats du potentiel d'acidification.

Analyse d'incertitudes du potentiel d'acidification [kg SO₂e]

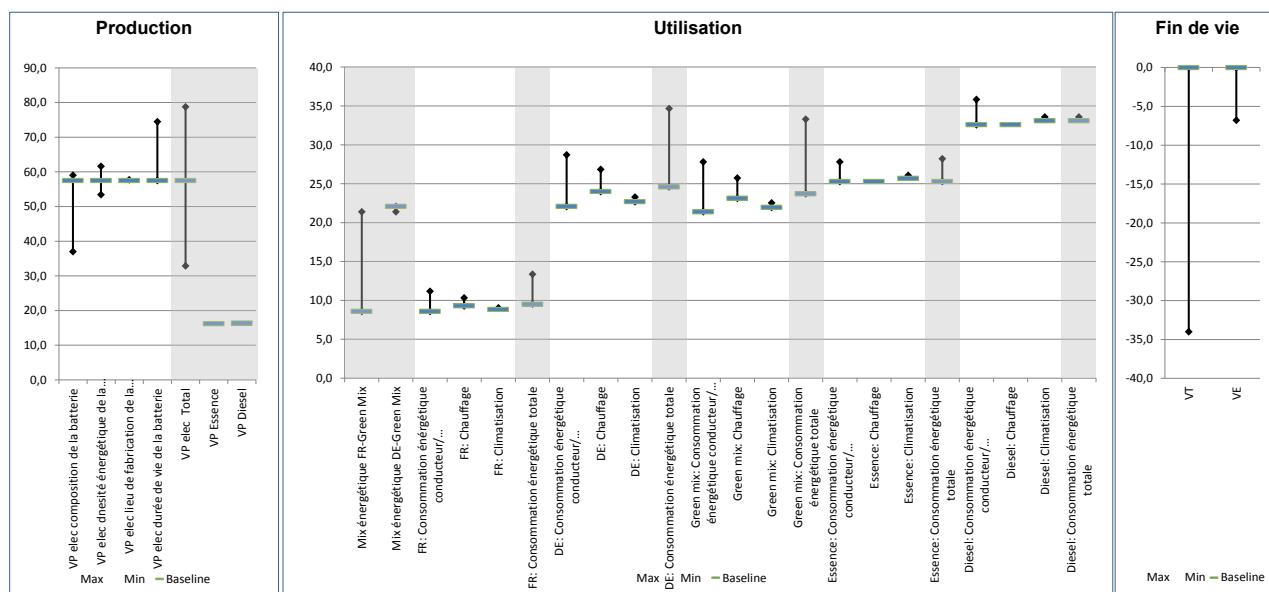


Figure 4-66 Analyse d'incertitudes du potentiel d'acidification pour la production, l'utilisation et la fin de vie

Pour l'étape de production, le VE présente de très grandes incertitudes pour ce qui est de la production de la batterie. La production de Cobalt et de Nickel présentent alors de fortes émissions de SO₂. Le scénario de production, comprenant une forte proportion de manganèse, conduit à des résultats légèrement inférieurs.

En comparaison au VT, les résultats de production des VE sont au moins 2 fois plus grands (meilleur cas) et plus de 4 fois plus grands (pire cas).

La phase d'utilisation présente de faibles résultats pour l'acidification dans le cas d'un mix Français. Le green mix et le mix Allemand conduisent tous deux à des résultats comparables, et similaires à ceux d'un véhicule essence.

Le véhicule Diesel présente des résultats légèrement plus élevés en raison des émissions de NO_x plus importantes. Si l'on s'en tient à l'intervalle de variation des incertitudes, tous les véhicules présentent des résultats similaires.

Le potentiel d'acidification est principalement dû aux émissions de SO₂ et de NO_x provenant des procédés de combustion de tous genres. Tout mix électrique comprenant des taux importants d'énergie thermique conduirait donc probablement à des résultats similaires, en fonction toutefois des réglementations spécifiques des pays.

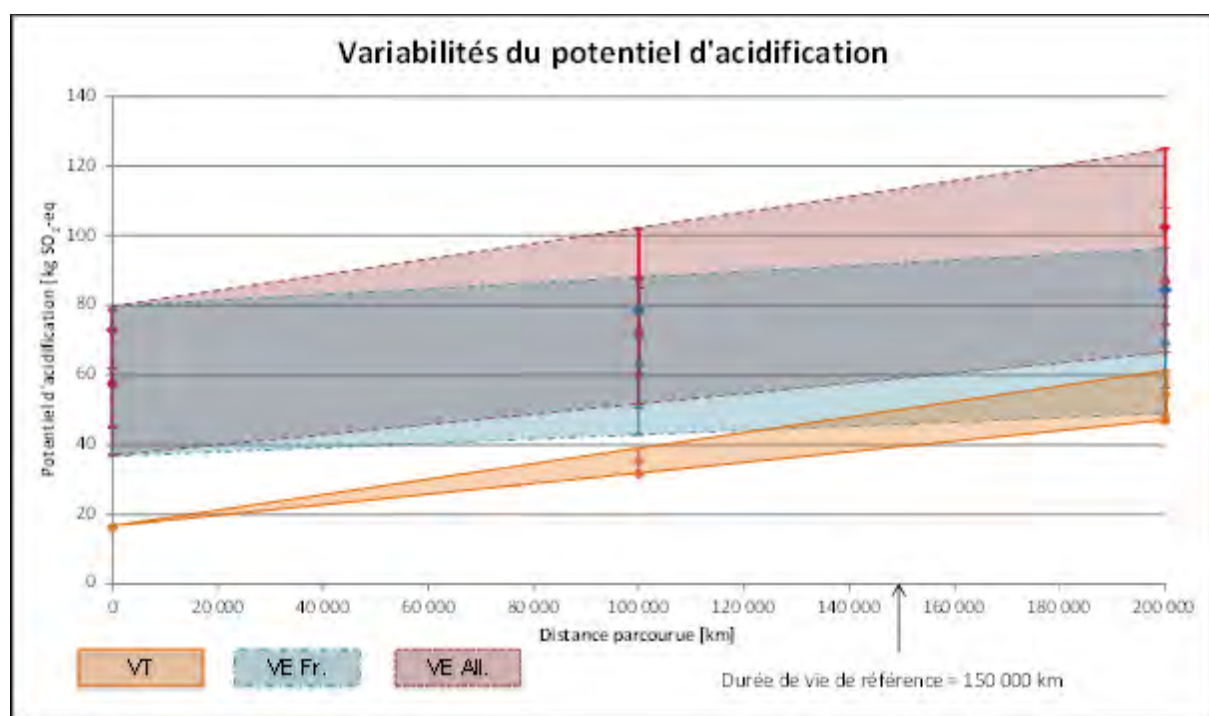


Figure 4-67 Variabilité du potentiel d'acidification du cycle de vie complet (sans le scénario de fin de vie)

La figure ci-dessus montre les incertitudes du potentiel d'acidification. Elle montre que le potentiel d'acidification pour le VE dans un scénario de base est beaucoup plus grand que pour un véhicule thermique. L'acidification est principalement due à la production du VE. Si l'on considère le scénario de base Français, même pour une durée de vie de 200.000 km, le potentiel d'acidification du VE est plus élevé que pour le véhicule essence ou pour le véhicule Diesel. Au regard des résultats du potentiel d'acidification, un grand potentiel d'optimisation du véhicule électrique réside alors dans une composition de batterie différente.

Au regard des grandes variations d'incertitudes lors de la phase d'utilisation du véhicule électrique, le mix électrique et la production de la batterie sont deux paramètres à

optimiser pour que les véhicules électrique et thermique aient des performances environnementales comparables.

Cette analyse d'incertitude a été réalisée sur les données entrantes essentielles du modèle ACV. Il y a également une incertitude inhérente aux données d'ACV, estimée entre 5 et 10%, qui doit être prise en considération pour l'interprétation des résultats. Cependant, dans une étude comparative comme celle-ci, de nombreuses données sont utilisées simultanément pour les scénarios comparatifs - les données liées à des matériaux constituant la caisse assemblée peinte – par exemple, conduit à une compensation partielle de l'incertitude. En conclusion, l'incertitude sur les résultats devrait être légèrement augmentée pour l'interprétation en raison des incertitudes liées aux données elles-mêmes.

Potentiel d'Eutrophisation

Analyse d'incertitudes du potentiel d'eutrophisation [kg PO_{4e}]

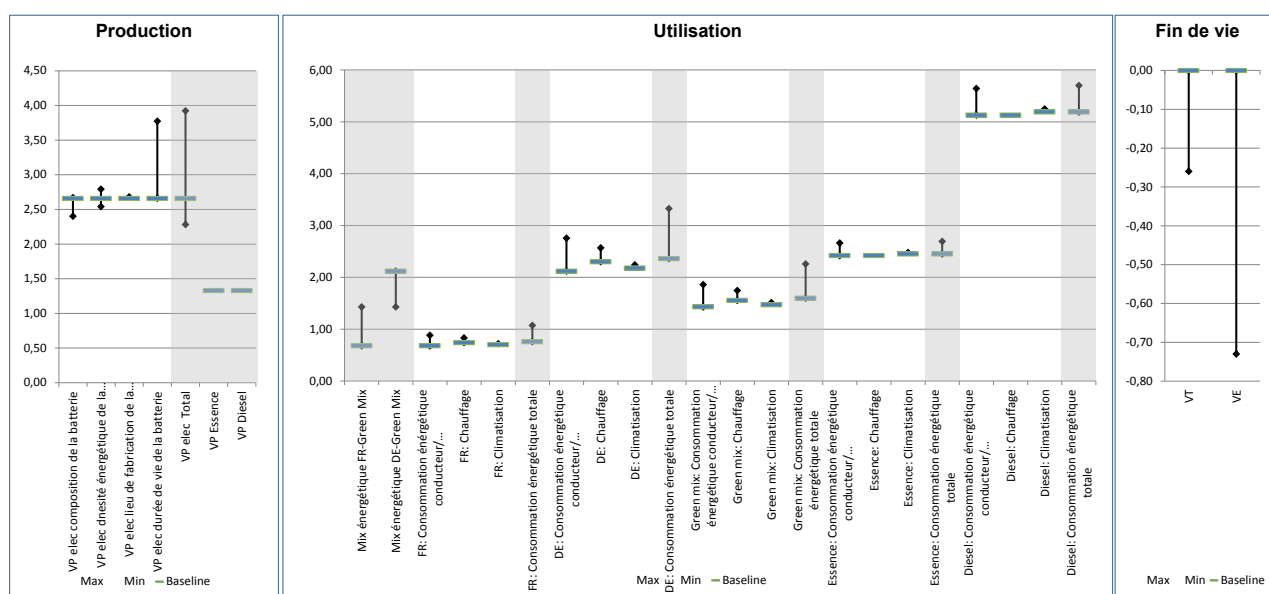


Figure 4-68 Incertitudes pour le potentiel d'eutrophisation pour la production, l'utilisation et la fin de vie

La figure suivante montre l'incertitude du potentiel d'eutrophisation. Le potentiel d'eutrophisation est généralement élevé pour le véhicule Diesel en raison des émissions de NO_x important pour ce type de motorisation. Pour le véhicule essence, la technologie de pot catalytique utilisée permet de réduire les émissions de NO_x, si bien que le potentiel d'eutrophisation est plus faible pour le véhicule essence que celui du VE.

Pour le VE, le potentiel d'eutrophisation est dû en grande partie à la production de la batterie. En général, la phase d'usage (donc de la production d'électricité) est inférieure à la phase d'usage des VT. On observe, sur la durée de vie des véhicules, que le potentiel d'eutrophisation pour le scénario français du VE est du même ordre de grandeur que celui du véhicule essence. Le potentiel d'eutrophisation du scénario allemand du VE est du même ordre de grandeur que celui du véhicule Diesel. Cependant, l'incertitude pour les VE est supérieure à celle des VT en raison de l'incertitude pour une durée de vie de

200 000 km les chances d'utiliser une deuxième batterie sont fortes, si bien que la valeur d'EP du VE allemand sera probablement supérieure à celle du véhicule Diesel (incertitude maximum avoisinant les 8 kg de phosphate).

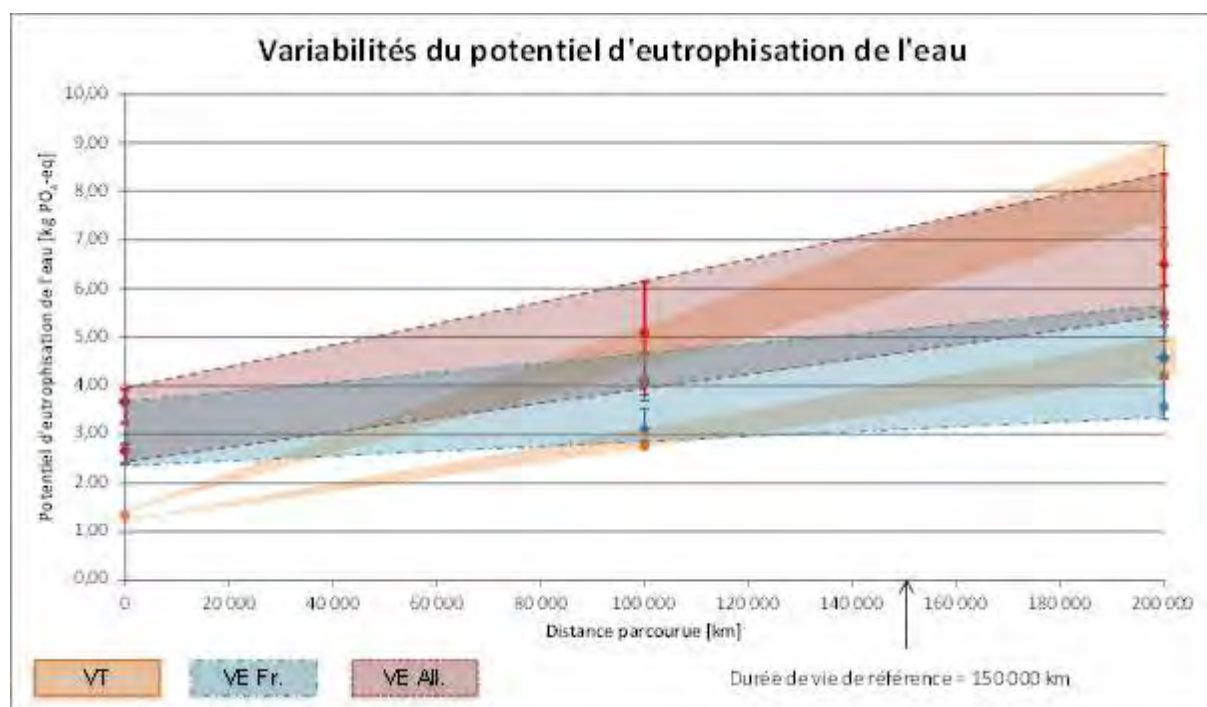


Figure 4-69 : Variabilités du potentiel d'eutrophisation des véhicules particuliers sur l'ensemble du cycle de vie (sans le scénario de fin de vie)

Potentiel de création d'ozone photochimique

Analyse d'incertitudes du potentiel de création d'ozone photochimique [kg C₂H₄e]

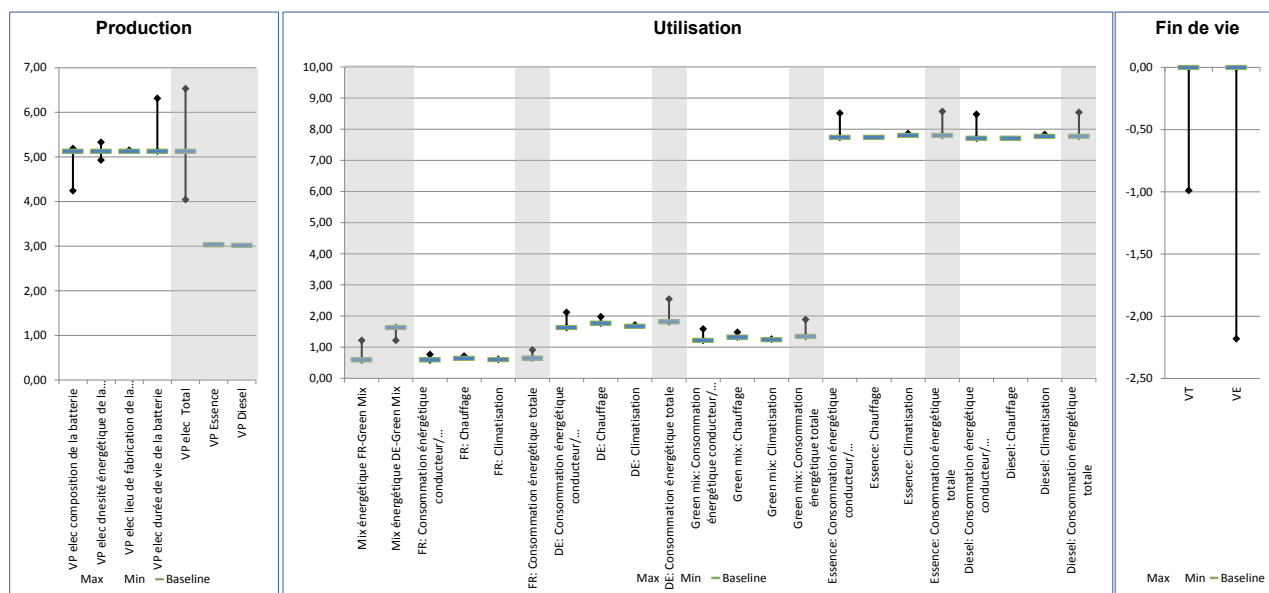


Figure 4-70 Incertitudes pour le potentiel de création d'ozone photochimique pour la production, l'utilisation et la fin de vie

La figure suivante montre l'incertitude du potentiel de création d'ozone photochimique. Pour cet indicateur d'impact potentiel, les VE (scénario français et allemand) affichent des valeurs inférieures aux VT sur l'ensemble du cycle de vie. En effet, le potentiel de création d'ozone photochimique est principalement dû aux émissions de COV des gaz d'échappement des VT.

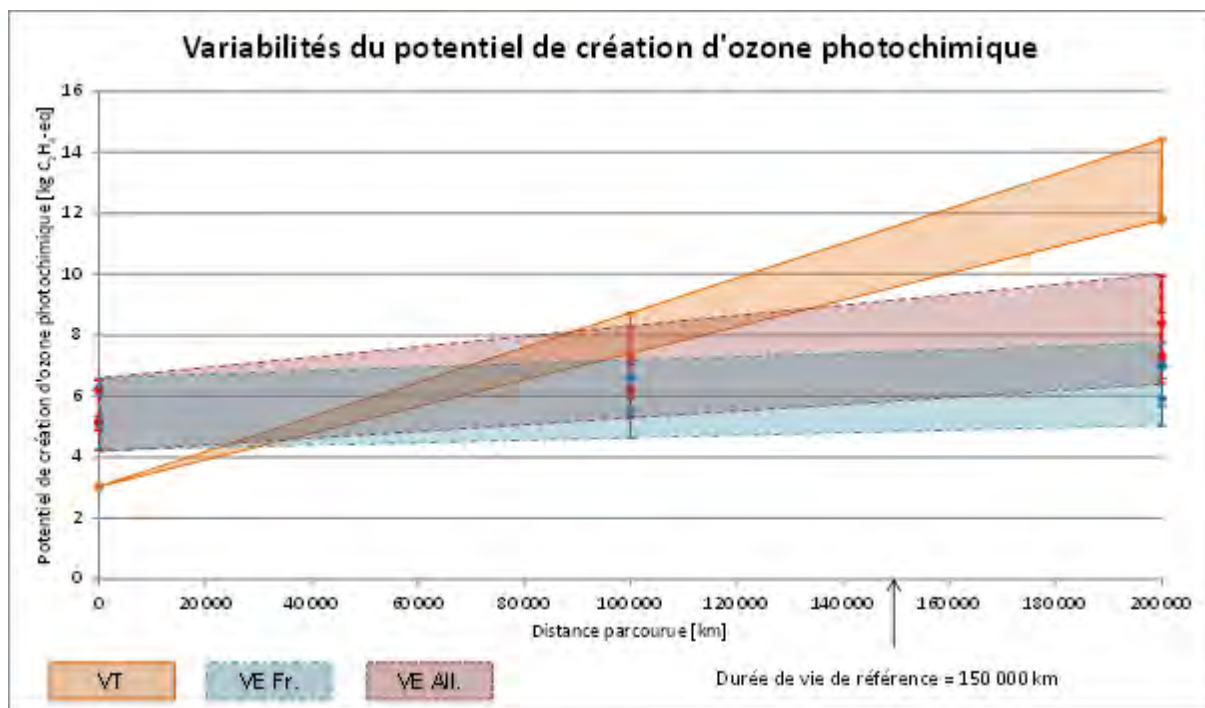


Figure 4-71 Variabilités du potentiel de création d'ozone photochimique des véhicules particuliers sur l'ensemble du cycle de vie (sans le scénario de fin de vie)

L'analyse d'incertitude permet d'identifier les conclusions suivantes:

- Pour le potentiel d'acidification, les scénarii modélisés montre que la contribution du VE est plus importante que celle du VT. Le potentiel d'acidification représente un désavantage de l'électromobilité. D'un autre côté, l'analyse d'incertitude montre l'importance des matériaux rentrant dans la composition de la batterie, offrant un levier d'amélioration potentiel important. Le scénario utilise à l'horizon 2020 valide cette amélioration potentielle,
- Pour le potentiel de création d'ozone photochimique, le VE affiche un bénéfice par rapport au VTs. Le potentiel de création d'ozone photochimique est principalement dû aux émissions de composés organiques volatiles (VOC) des VTs en phase d'usage (conduite), émissions inexistantes pour les VE durant cette phase. Comme le potentiel de création d'ozone photochimique est un problème de pollution locale, le VE favorise la diminution de cet impact potentiel à l'endroit où le véhicule est utilisé (par exemple en milieu urbain),
- Le potentiel d'épuisement des ressources fossiles révèle que le VE tend à réduire la consommation de ressources fossiles, même pour le scénario du VE allemand. Le VE est donc plus indépendant des ressources fossiles, notamment pour le VE français (utilisant de l'électricité principalement nucléaire) et pour un VE utilisant des énergies renouvelables pour se charger,
- La consommation totale d'énergie primaire montre que le VE n'est pas plus efficace énergétiquement qu'un VT sur l'ensemble de son cycle de vie. La plage d'incertitude du VE pour cet indicateur est plus grande pour le VE que pour le VT, ainsi le VE tend vers une efficacité énergétique moindre par rapport au VT,
- Les déchets/émissions radioactives n'ont pas été calculées dans l'analyse d'incertitude, mais les résultats pour ces flux sont disponibles plus haut dans le

rapport. Un chapitre dédié aux bouquets électriques montre que les flux radioactifs (déchets et émissions) du VE sont logiquement plus importants que ceux des VTs, quel que soit le bouquet électrique utilisé pour la charge,

- Pour les autres indicateurs d'impact potentiel, les résultats dépendent du bouquet électrique utilisé pour la charge du VE. Un bouquet basé sur des énergies fossiles entrainera un bénéfice faible pour le VE. Un bouquet basé sur des énergies renouvelables représentera une meilleure alternative pour l'ensemble des indicateurs d'impact potentiel à l'exception de l'acidification.

Afin de faciliter la compréhension des conclusions sur les incertitudes, les graphiques suivants ont été réalisés. Ils mettent en avant les domaines de pertinence du VE comparés aux VT pour les différentes catégories d'impact.

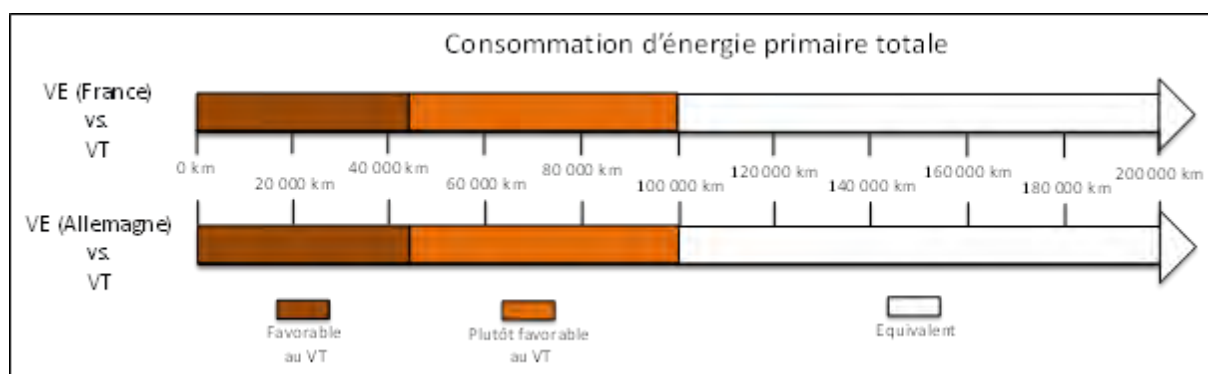


Figure 4-72 Domaine de pertinence du VE comparé aux VT pour la consommation d'énergie primaire totale à l'horizon 2012

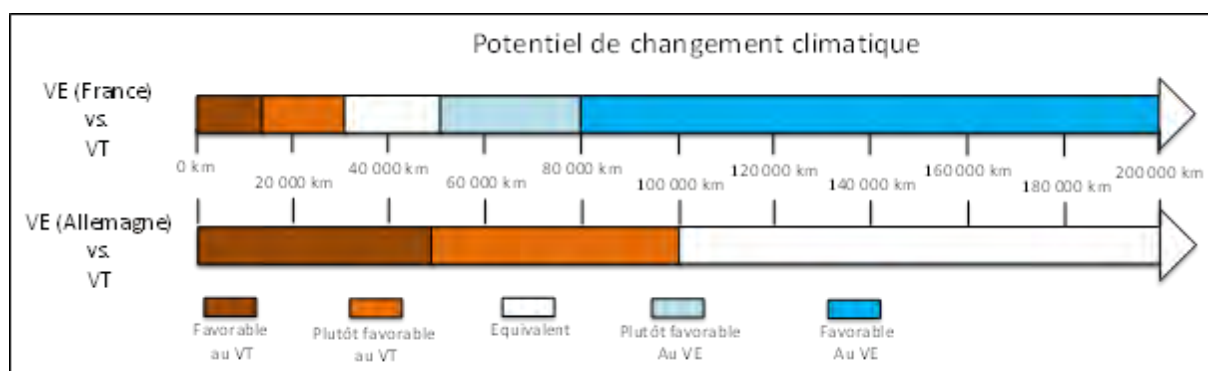


Figure 4-73 Domaine de pertinence du VE comparé aux VT pour le potentiel d'effet de serre à l'horizon 2012

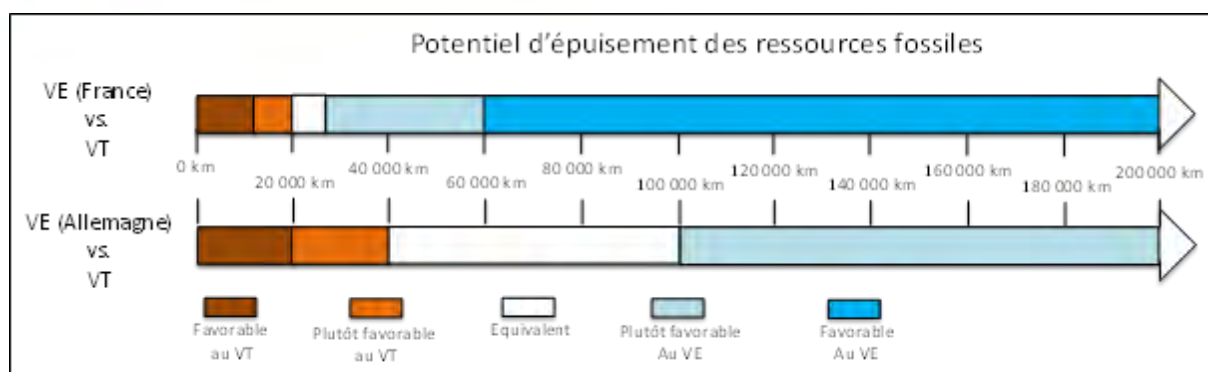


Figure 4-74 Domaine de pertinence du VE comparé aux VT pour le potentiel d'épuisement des ressources fossiles à l'horizon 2012

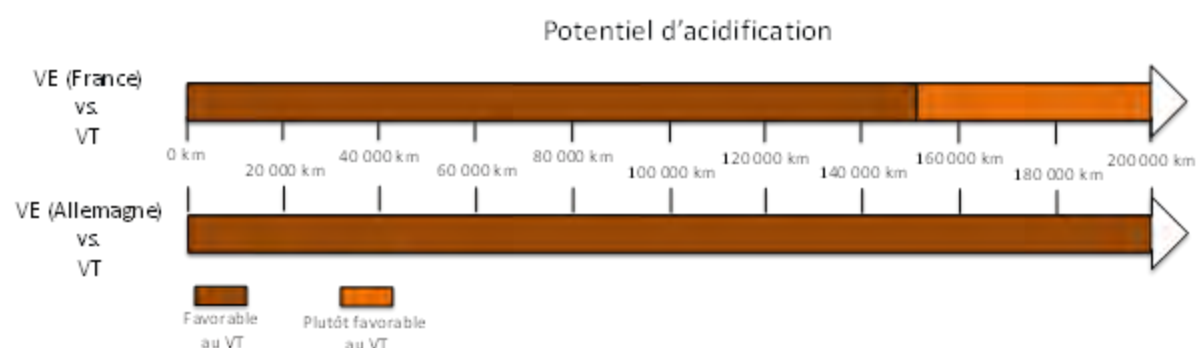


Figure 4-75 Domaine de pertinence du VE comparé aux VT pour le potentiel d'acidification à l'horizon 2012

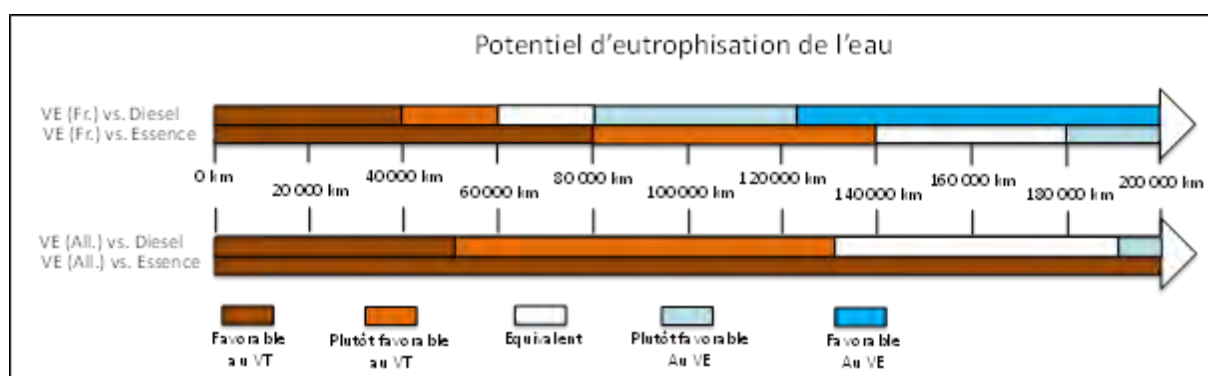


Figure 4-76 Domaine de pertinence du VE comparé aux VT pour le potentiel d'eutrophisation à l'horizon 2012

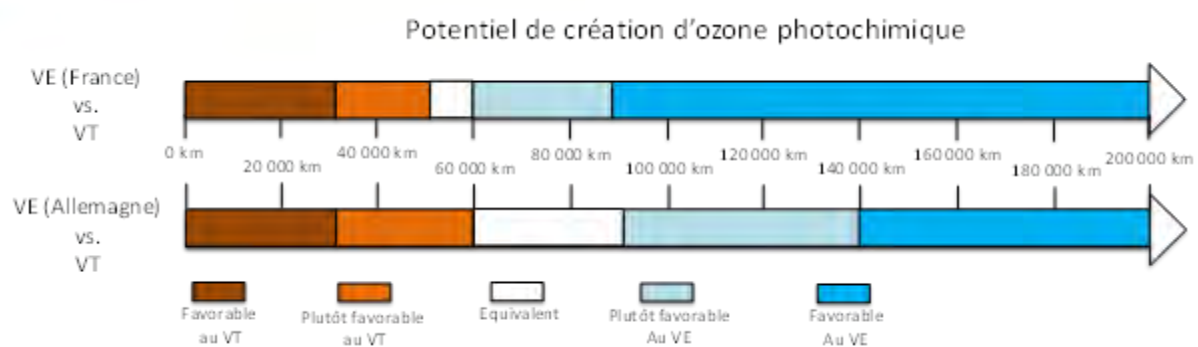


Figure 4-77 Domaine de pertinence du VE comparé aux VT pour le potentiel de création d'ozone photochimique à l'horizon 2012

5. Module 2 : étude des risques et bénéfices du VE

Cette étude est une mise en perspective des résultats de l'ACV, à l'horizon 2020 pour le périmètre français. Cet exercice est basé sur de nombreuses hypothèses provenant de différentes sources. Les résultats présentent donc une incertitude élevée mais ils permettent néanmoins de montrer une tendance des impacts non considérés dans la partie ACV.

L'objectif est d'évaluer le véhicule électrique à l'horizon 2020 sur 2 thématiques pour lesquelles l'interprétation des résultats de l'inventaire et de l'analyse d'impact, attachés à un seul véhicule, peut s'enrichir d'une vision élargie au parc de véhicules :

- ✓ La pollution atmosphérique locale
- ✓ La consommation de matières critiques.

La thématique du bruit, absente de l'ACV, est également traitée ici.

La figure ci-dessous, extraite du Rapport du Sénat sur les nuisances de l'automobile en France, confirme l'intérêt des thématiques retenues.

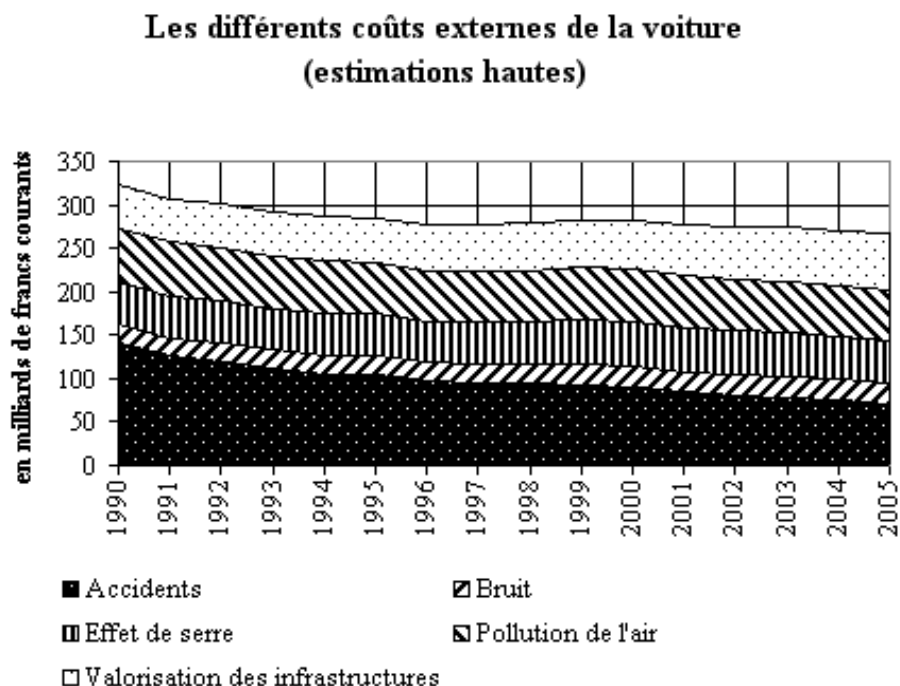


Figure 5-1 Les nuisances de l'automobile en France, Sénat, 2001

Les récents travaux de la Commission Européenne (stratégie renforcée sur les matières premières⁵⁷) mais aussi de l'UNEP (Produits et matières prioritaires⁵⁸, 2010) témoignent par ailleurs du renouvellement de l'intérêt pour la thématique des matières dites « critiques ».

⁵⁷ Communication de la Commission du 02/02/11 « Relever les défis posés par les marchés des produits de base et les matières premières ».

⁵⁸ Assessing the Environmental impacts of consumption and Production : Priority Products and Materials, UNEP, 2010

5.1 Pollution locale

5.1.1 Pollution atmosphérique

L'objectif de cette partie est de déterminer les gains ou déplacements de la pollution atmosphérique liés au déploiement du VE à l'horizon 2020. Après une brève introduction sur la pollution atmosphérique locale et les différents polluants participants à cet impact, nous nous intéresserons aux facteurs d'émissions de ces polluants et à leur variation suivant la source choisie. Enfin dans une dernière partie, une modélisation à l'échelle d'une agglomération sera réalisée afin d'estimer l'impact du déploiement du VE.

5.1.1.1 Introduction

Nous nous intéresserons dans cette partie aux polluants primaires. Les polluants primaires sont des polluants directement produits par des sources de pollution. Généralement, on les trouve à l'endroit de l'émission mais ils peuvent également, notamment en fonction des conditions météorologiques, être dispersés et ainsi se retrouver au-delà du périmètre de l'émission ou au contraire être lessivés et rester peu de temps dans l'atmosphère. Par exemple, le monoxyde de carbone, CO, est un polluant primaire. Les polluants secondaires sont des polluants qui ne sont pas directement émis, mais qui résultent de la transformation physico-chimique des polluants primaires au cours de leur séjour dans l'atmosphère. Par exemple, l'ozone résulte de réactions chimiques impliquant notamment les oxydes d'azote et les composés organiques volatils ou COV. Il est possible de réaliser un inventaire d'émissions pour les polluants primaires, mais pas pour les polluants secondaires, les réactions et les sources potentielles étant très variées.

Le rapport SECTEN du CITEPA fournit des facteurs d'émissions de différents polluants atmosphériques, regroupés par thème :

Tableau 5-1 Substances concernées par thèmes de pollution atmosphérique

Thème	Polluants concernés
Acidification, eutrophisation, pollution photochimique	SO ₂ , NO _x , NH ₃ , COVNM, CO
Accroissement de l'effet de serre (les gaz à effet de serre indirect étant déjà rapportés dans le thème de l'acidification et de la pollution photochimique ne sont pas répétés)	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, HFC, PFC, SF ₆
Contamination par les métaux lourds	As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Zn
Contamination par les polluants organiques persistants	Dioxines et furannes (PCDD-F), HAP, PCB, HCB
Particules en suspension	Particules totales en suspension (TSP), PM ₁₀ , PM _{2,5} , PM _{1,0}

Etant donné que cette partie se focalise sur la pollution locale, la catégorie d'impact "effet de serre" n'est pas considérée. En effet, les émissions de gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone ou le méthane ne constituent pas une pollution avec un impact sanitaire à court ou moyen terme et sont déjà étudiées dans les chapitres précédents. La liste est réduite aux polluants pour lesquels la contribution du transport est importante. Les substances pour lesquelles le secteur des transports représente plus de 5% des émissions totales en 2009 sont les suivantes :

Tableau 5-2 Contribution des transports par rapport au total national (France) – CITEPA / format SECTEN, avril 2011

Substances	%
NOx	60
COVNM	18
CO	22
CO2	34
HFC	28
Cu	87
Pb	10
HAP ⁵⁹	27
HCB	55
TSP	10
PM10	12
PM2,5	13
PM1,0	19

La plupart des émissions des transports sont imputables au transport routier, comme le montre le tableau ci-dessous extrait des résultats du format SECTEN du CITEPA :

Tableau 5-3 Contribution du transport routier par rapport au total national (France) – CITEPA / format SECTEN, avril 2011

Substances	Contribution du transport routier en France
NOx	89,2%
COVNM	78,8%
CO	85,5%
CO2	93,8
HFC	74,4%
Cu	60,0%
HAP ⁶⁰	95,4%
HCB	98,7%
TSP	89,6%
PM10	84,6%
PM2,5	83,4%
PM1,0	85,3%

⁵⁹ Somme des HAP tels que définis par la CEE-NU : benzo(a)pyrène, benzo(b)fluoranthène, benzo(k)fluoranthène et indeno(1, 2, 3-cd)pyrène

⁶⁰ Somme des HAP tels que définis par la CEE-NU : benzo(a)pyrène, benzo(b)fluoranthène, benzo(k)fluoranthène et indeno(1, 2, 3-cd)pyrène

Ces émissions doivent être réparties entre les véhicules particuliers (essence et Diesel), les véhicules utilitaires et les poids lourds.

Il a été décidé de réduire la liste des polluants afin de faciliter l'analyse et la lisibilité des résultats. Il fait sens de s'intéresser aux polluants réglementés.

Ainsi seuls les rejets atmosphériques réglementés par les normes européennes d'émissions (Euro I, II, III, IV, V et VI) sont considérés :

- ✓ **NOx**
- ✓ **CO**
- ✓ **COV (ou HC)⁶¹**
- ✓ **PM 10-2,5**

Le **SO2** est rajouté à cette liste. En effet, les émissions de ce polluant réglementé (plafonds d'émissions nationales et concentrations dans l'air) sont principalement dues à la production, la transformation et la distribution d'énergie (51%⁶² des émissions). Le raffinage du pétrole (47,5%) et la production d'électricité (43%) sont responsables de la majeure partie de ces émissions.

Les **émissions radioactives dans l'air** et dans l'**eau**, exprimées en Bq eq, seront également considérées dans le cadre de cette étude, conformément aux recommandations du comité technique.

5.1.1.2 Facteurs d'émissions

Les facteurs d'émissions présentés dans cette partie sont issus du scénario de base 2020 :

- ✓ **Cycle de conduite NEDC**
- ✓ **Bouquet électrique français moyen pour les VE**
- ✓ **1 batterie (hybride NMC et Li-FePO4) utilisée sur la durée de vie du VE**
- ✓ **Pas de scénario de fin de vie**

Les tableaux présentant les facteurs d'émissions comportent les étapes suivantes :

- ✓ **Production** : extraction, mise en forme, transport et assemblage des composants des véhicules (hors batterie pour le VE),
- ✓ **Carburant** : production des carburants fossiles (VT uniquement)
- ✓ **Usage** : émissions des véhicules roulants (VT uniquement)
- ✓ **Batterie** : extraction, mise en forme, transport et assemblage des composants de la batterie (VE uniquement),
- ✓ **Electricité** : production de l'électricité pour la charge du véhicule (VE uniquement).

⁶¹ Hydrocarbures imbrûlés HC ou COV : composés organiques volatils, c'est à dire présents à l'état gazeux ; sous cette dénomination générique, on trouve un grand nombre de produits résultant d'une combustion incomplète, souvent instables et sujets à des réactions chimiques entre eux : des hydrocarbures simples, des hydrocarbures aromatiques (ou benzéniques) monocycliques (benzène, toluène, xylène parfois regroupés en BTX), des composés oxygénés (alcools, aldéhydes, cétones, etc.). Pour les distinguer du méthane (CH₄, stable et non toxique), on les désigne souvent par COVNM ou HCNM (non méthaniques) – source : [SECTEN - CITEPA](#)

⁶² CITEPA / format SECTEN, avril 2011

Véhicules thermiques

Les informations disponibles, tant dans la bibliographie que dans les données recueillies pour la réalisation de l'ACV, montrent que l'incertitude sur les facteurs d'émissions des polluants choisis est grande comme rappelé dans le Chapitre 2.5.2.

Dans la partie ACV de cette étude, les émissions du cycle NEDC ont été comparées à celles d'un cycle HBEFA. Les écarts entre ces différents scénarios ont pu être observés, notamment pour les émissions de NOx. Ainsi, les cycles de conduite étudiés ont une importance significative sur les facteurs d'émissions.

De plus les sources d'émissions des polluants atmosphériques étudiés sont nombreuses : gaz d'échappement, abrasion des pneus, abrasion des plaquettes de freins, climatisation, resuspension des particules, elles sont détaillées en annexe. Il a été décidé de ne pas prendre en considération les émissions de particules liées à l'abrasion des plaquettes de freins et des pneus et à la resuspension des particules. En effet il est considéré que ces émissions sont sensiblement les mêmes pour le VT et le VE.

Les tableaux ci-dessous (et les graphiques associés) montrent les facteurs d'émissions par étapes du cycle de vie des VT (Diesel et essence) par kilomètre parcouru. Les valeurs sont directement extraites des résultats d'ACV présentés dans le chapitre 4.

Tableau 5-4 Facteurs d'émissions locales d'un VP Diesel moyen à l'horizon 2020

Facteurs d'émissions Diesel	Production	Batterie	Carburant	Usage	Total
CO (g/km)	0,08	0	0,02	0,43	0,53
Nox (g/km)	0,06	0	0,04	0,05	0,15
SO2 (g/km)	0,11	0	0,06	0,00	0,17
NMCOV (g/km)	0,04	0	0,01	0,05	0,10
PM 2,5-10 (g/km)	0,01	0	0,00	0,00	0,01
radioactivité dans l'air (en Bq/km)	4478	0	24	0	4502
radioactivité dans l'eau (en Bq/km)	781	0	24	0	805

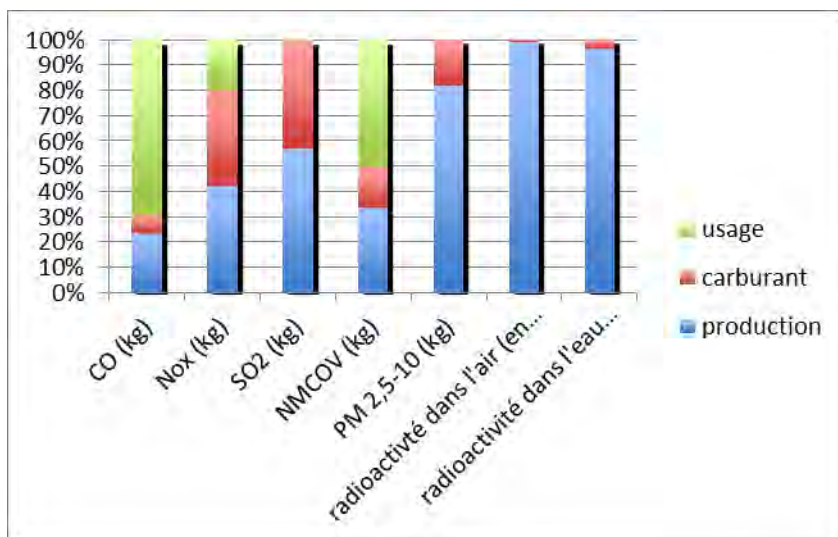


Figure 5-2 Répartition des émissions locales pour un VP Diesel moyen à l'horizon 2020

Tableau 5-5 Facteurs d'émissions locales d'un VP essence moyen à l'horizon 2020

Facteurs d'émissions essence	Production	Batterie	Carburant	Usage	Total
CO (g/km)	0,08	0	0,02	0,23	0,33
Nox (g/km)	0,06	0	0,05	0,03	0,14
SO2 (g/km)	0,11	0	0,08	0,00	0,18
NMCOV (g/km)	0,04	0	0,02	0,05	0,10
PM 2,5-10 (g/km)	0,01	0	0,00	< 0,01	0,01
radioactivité dans l'air (en Bq/km)	4538	0	28	0	4566
radioactivité dans l'eau (en Bq/km)	769	0	28	0	797

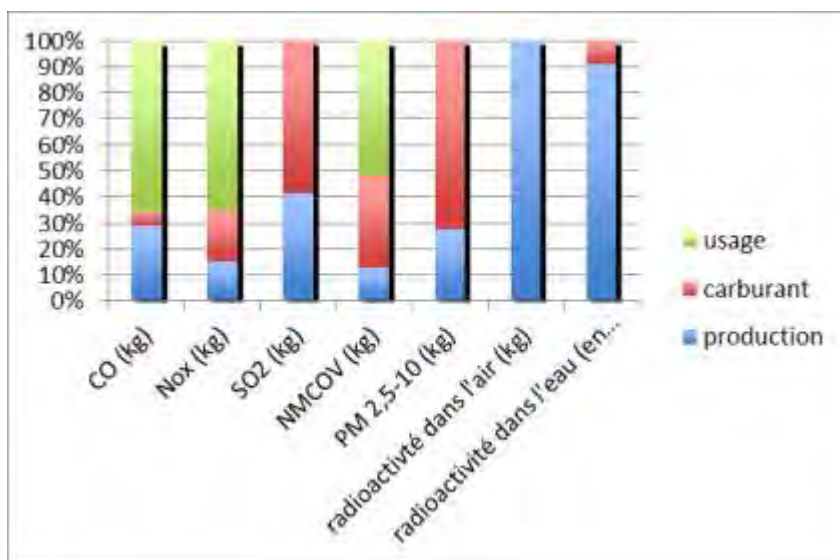


Figure 5-3 Répartition des émissions locales pour un VP essence moyen à l'horizon 2020

Véhicule électrique

En l'absence de données d'émissions des sites de production de batterie (les émissions de CO, NOx, SO2, PM... du site de fabrication ne sont pas connues, seules les consommations d'électricité de la fabrication des cellules et de l'assemblage de la batterie sont prises en compte dans l'ACV), ces valeurs ne seront pas prises en considération. Les émissions de polluants du VE se résumeront donc à la production du véhicule, des matériaux de la batterie (extraction et mise en forme) et de l'électricité.

Les tableaux ci-dessous montrent les facteurs d'émissions par kilomètre pour les différentes étapes du cycle de vie des véhicules. Les valeurs sont directement extraites des résultats d'ACV et représentent le scénario décrit au chapitre 4.

Tableau 5-6 Facteurs d'émissions locales d'un VP électrique moyen à l'horizon 2020

Facteurs					Total
d'émissions essence	Production	Batterie	Electricité	Usage	
CO (g/km)	0,10	0,02	0,01	0	0,13
Nox (g/km)	0,05	0,05	0,02	0	0,12
SO2 (g/km)	0,11	0,12	0,02	0	0,25
NMCOV (g/km)	0,05	0,00	0,00	0	0,06
PM 2,5-10 (g/km)	0,01	0,01	0,00	0	0,02
radioactivité dans l'air (en Bq/km)	4804	379	2380	0	7564
radioactivité dans l'eau (en Bq/km)	668	988	8133	0	9790

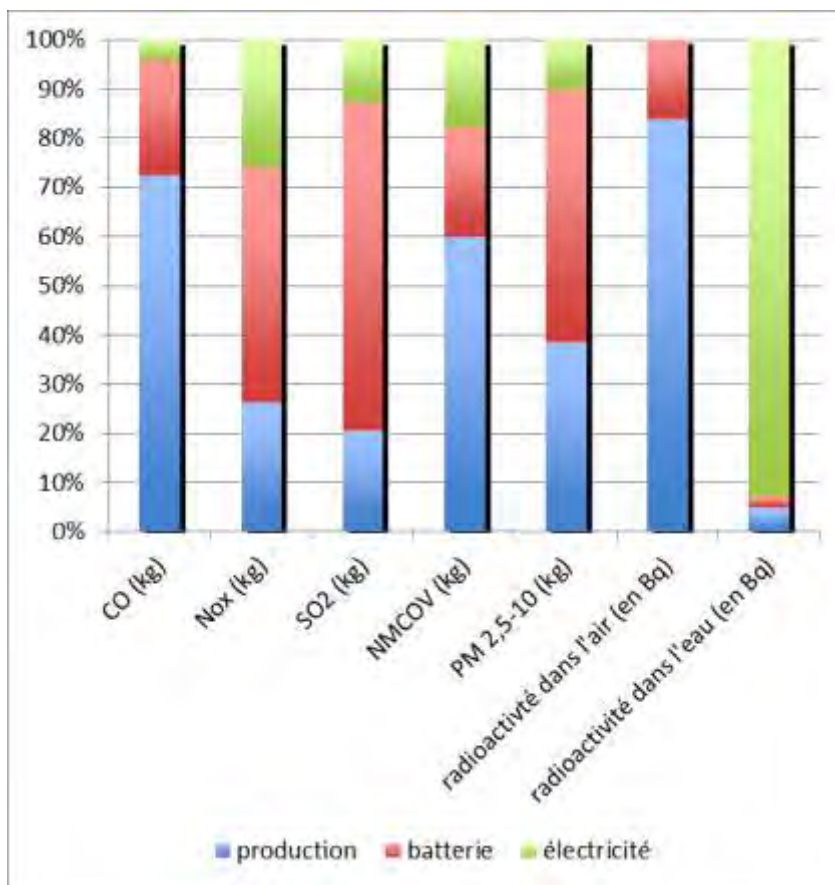


Figure 5-4 Répartition des émissions locales pour un VP électrique moyen à l'horizon 2020

Les facteurs d'émissions locales des VUL à l'horizon 2020 suivent les mêmes tendances que ceux des VP. Ces facteurs sont disponibles en annexe.

Le tableau des émissions de polluants par filière de production d'électricité en France est disponible en annexe (source : GaBi). Ces différentes filières ont été utilisées afin de modéliser le bouquet électrique français (mix électrique de consommation en 2020 utilisé dans le scénario de référence de la partie ACV).

On observe que la phase de production du véhicule électrique (production du véhicule et des matériaux de la batterie) est plus émettrice de polluants atmosphériques que la phase de production de l'électricité en raison de la production de la batterie. Il est difficile de localiser ces émissions de polluants de la phase de fabrication :

- ✓ Les véhicules sont constitués de plusieurs centaines de composants fabriqués en différents endroits du globe,
- ✓ Les émissions de production prennent en compte l'assemblage du véhicule mais également toute la phase amont d'extraction des matières premières et de transport. Il est extrêmement compliqué de connaître le lieu d'extraction de chaque matière première.

Ainsi, il est possible de comparer les émissions sur l'ensemble du cycle de vie du VE et du VT mais il est difficile d'estimer où ces émissions ont lieu pour chaque étape.

Le tableau permet de comparer les véhicules pour les différentes émissions atmosphériques sur l'ensemble du cycle de vie :

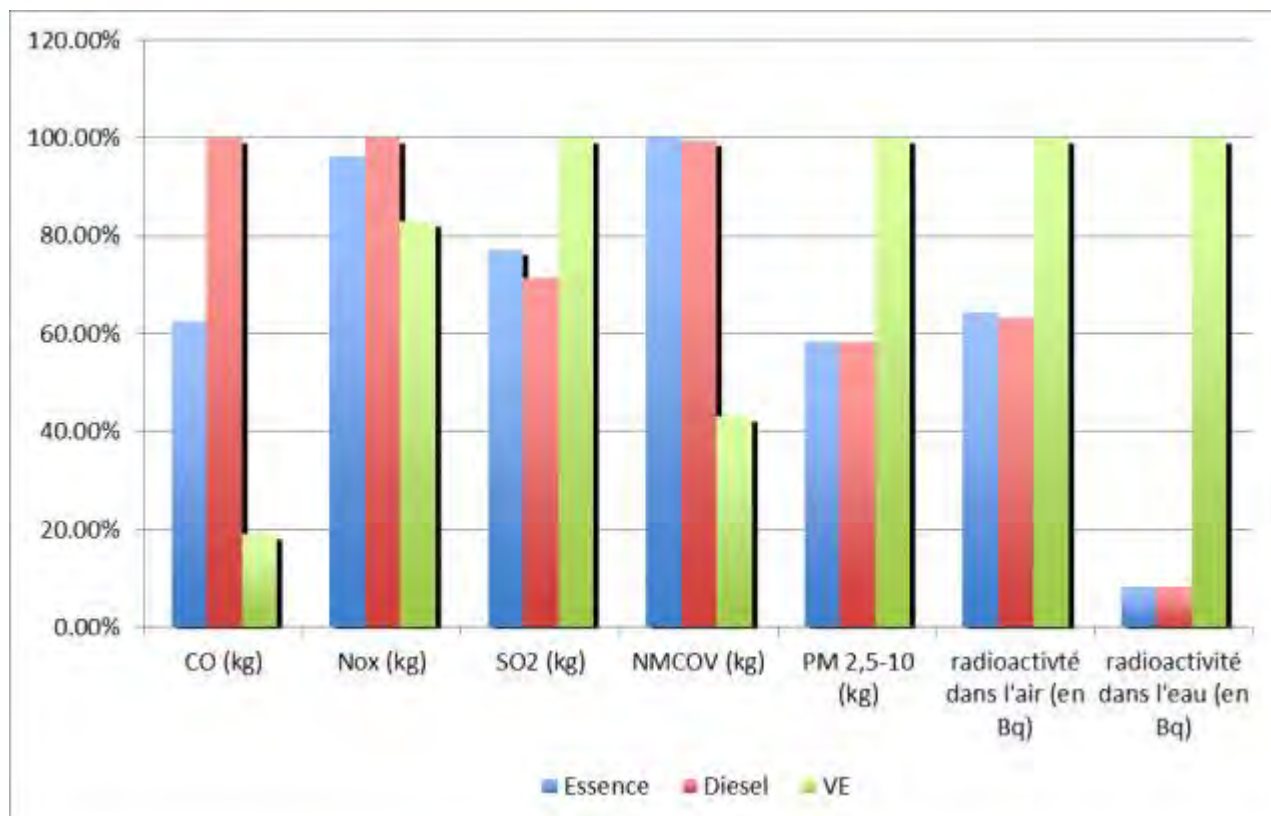


Figure 5-5 Comparaison des émissions de polluants locaux sur le cycle de vie des véhicules thermiques, essence et Diesel, et du véhicule électrique

On observe à l'aide du graphique ci-dessus que les véhicules thermiques émettent plus de CO, de NOx et de NMCOV que les véhicules électriques. Ces résultats sont logiques, dans la mesure où ces trois polluants sont présents dans les gaz d'échappement du véhicule thermique.

Les émissions de SO2 sont plus importantes pour le véhicule électrique, c'est la production d'électricité nécessaire tout au long de la phase d'usage du VE et les émissions lors de l'extraction des matières premières de la batterie qui expliquent cette valeur.

Le VE possède également un bilan supérieur au VT pour les émissions de particules principalement dues aux matériaux intervenant dans la fabrication de la batterie.

Enfin, sans grande surprise, les émissions radioactives (dans l'eau et dans l'air) sont beaucoup plus importantes pour le VE que pour le VT. Ce résultat s'explique par la consommation d'électricité et par l'importance du nucléaire dans le bouquet électrique français. En effet, le facteur d'émissions radioactives pour l'électricité nucléaire est beaucoup plus important que celui des autres sources électriques (386 Bq/kWh – voir en annexe).

Cependant, les résultats présentés doivent être interprétés avec précaution. En effet nous avons vu que les facteurs d'émissions sont dépendants de nombreux paramètres, comme le cycle de conduite, les conditions de circulation, les bouquets électriques utilisés...

Nous nous concentrerons dans la suite de l'étude sur les phases suivantes :

- ✓ La phase de production des véhicules thermiques et électriques (sans la batterie),
- ✓ La production de la batterie du VE,
- ✓ L'élaboration du carburant et les émissions en phase d'usage pour les véhicules thermiques,
- ✓ La production d'électricité pour le VE.

Par ailleurs, l'objectif de cette partie étant de mettre en évidence les éventuels transferts de polluants atmosphériques locaux, nous séparerons les émissions d'usage (émis là où le véhicule roule) et les émissions déportées sur d'autres sites de production (production du véhicule, de la batterie, du carburant et de l'électricité).

5.1.1.3 Modélisation à l'échelle d'une agglomération

L'objectif de cette partie est d'estimer l'impact en termes de pollution atmosphérique du déploiement du VE en agglomération à l'horizon 2020. Pour cela, 3 types de données sont nécessaires :

- ✓ La flotte de véhicules particuliers de l'agglomération considérée
- ✓ Le kilométrage journalier moyen des VP
- ✓ Les facteurs d'émissions des polluants atmosphériques étudiés par kilomètre moyen parcouru

Pour une utilisation urbaine, une moyenne de 15000 km/an peut être considérée, conformément à l'unité fonctionnelle choisie.

Les facteurs d'émissions ont été déterminés dans la partie précédente.

Le point dur reste la modélisation de la flotte de VP d'une agglomération. En effet, il est compliqué d'estimer le parc roulant (i.e. véhicule.km) d'une agglomération⁶³ car il combine d'une part les véhicules des habitants de l'agglomération et d'autre part les véhicules en transit. Autant est-il possible d'estimer grossièrement le parc "local" via des indicateurs comme les immatriculations (qui n'est pas le meilleur), autant le parc "transit" n'est pas estimable sans enquête sur le périmètre souhaité (enquête portant sur les origines/destinations, type de véhicule, charge du véhicules, etc).

L'approche choisie ici consiste à modéliser le parc de VP d'une agglomération imaginaire, représentatif de la flotte française. Des estimations sont disponibles dans le Livre vert (p32).

⁶³ Les Associations agréées de la qualité de l'air – AASQA- lefont. D'autre part, dans le cadre du Système National d'Inventaires d'Emissions et de Bilans dans l'Atmosphère (SNIEBA), le ministère a mis en place un Pôle de coordination nationale des Inventaires d'Emissions Territoriaux (PCIT - cf. description dans la publication du CITEPA http://www.citepa.org/publications/c_dans_lair/CDL151_VF.pdf en page 2). Le but est de réaliser pour fin juin 2012, un guide méthodologique afin d'estimer les émissions, notamment du transport routier, au niveau local.

Tableau 5-7 : Flotte de VE d'une ville de 500 000 habitants en 2020

Nombre d'habitants	Nombre de véhicules particuliers	Nombre de véhicules rechargeables en 2020	Nombre de véhicules tout électriques en 2020
500 000	275 000	15 000 (5,5%)	5000 ⁶⁴ (1,8%)

Pour une agglomération de 500 000 habitants, la flotte de véhicules tout électriques représentera 1,8% de la flotte de VP.

En supposant que chaque véhicule effectue 15000 km/an sur des déplacements de proximité uniquement, le nombre total de kilomètres parcourus par les véhicules pour cette agglomération (parc roulant) serait : $4,125 \cdot 10^9$ km, dont $74,25 \cdot 10^6$ km en véhicule tout électrique.

Pour cette simulation, nous supposons que chaque VE introduit dans la flotte de la ville évite l'achat et donc l'utilisation d'un VT neuf, et non pas qu'il se substitue à un VT existant. Ainsi, les émissions de polluants atmosphériques du VE seront comparés aux émissions de VT fabriqués à la même époque (2020, donc avec un carburant Euro6).

D'après les statistiques de la CCFA, 72% des VP vendus en 2011 sont des Diesel et 27% des essences. Nous gardons ces chiffres à l'horizon 2020. Cependant, nous modéliserons d'autres scénarios afin de voir l'impact de l'évolution de ce pourcentage sur la pollution atmosphérique locale (voir en annexe).

D'autre part, d'après les statistiques du CCFA, les ventes en 2011 des VUL représentent 16% des ventes totales. Nous supposons que cette valeur est applicable dans le cadre de l'exercice de modélisation. Ainsi, sur les $74\,250\,000$ km parcourus par les VE de la ville imaginaire, 16% (soit $11\,800\,000$ km) sont attribuable aux VUL.

⁶⁴ Basé sur les prévisions nationales : 2M de VE à l'horizon 2020 dont 2/3 d'hybride et 1/3 de tout électrique

Tableau 5-8 Quantité de NOx annuelle émise par an par une flotte de VE d'une ville de 500 000 habitants comparée à celle émise par les VT

	VE (VP)	VE (VUL)	VT Diesel	VT essence	VUL Diesel
	84%	16%	72%	28%	
Km annuel parcouru	62 370 000	11 800 000	44 906 400	17 463 600	11 800 000
Facteur d'émission en gNOx/km	0,12	0,13	0,15	0,14	0,20
Quantité annuelle de NOx en kg	7484	1534	6736	2445	2360
Total annuel en t		9,02		11,54	

On observe que le déploiement du VE évite l'émission de 2,5t de NOx par an à l'échelle d'une agglomération de 500 000 habitants.

Le tableau ci-dessous montre les émissions évitées et/ou déplacées pour les différents polluants étudiés :

Tableau 5-9 Emissions de polluants locaux évitées ou/et déplacées à l'échelle d'une agglomération de 500 000 habitants, liées au déploiement du VE à l'horizon 2020

	Emissions évitées (total VT)	Emissions déportées (total VE)	Bilan (déportées – évitées)	Bilan des émissions évitées en zone urbaine
CO (en t)	34,1	7,9	-26,2	-26,8
NOx (en t)	11,5	9	-2,5	-2,3
SO2 (en t)	13,7	17,8	4,1	0
NMCOV (en t)	8	3,5	-4,5	-3,9
PM 2,5-10 (en t)	1	1,6	0,6	< - 0,01
Radioactivité dans l'air (en Bq)	354922	532518	177596	0
radioactivité dans l'eau (en Bq)	59432	708020	648589	0

Dans le tableau ci-dessus, les émissions évitées en zone urbaine correspondent aux émissions à l'usage de 5000 VT évitées par l'intégration du VE en milieu urbain.

La figure suivante détaille les émissions annuelles de NOx par étape du cycle de vie pour les véhicules thermiques et électriques (VP et VUL confondus) :

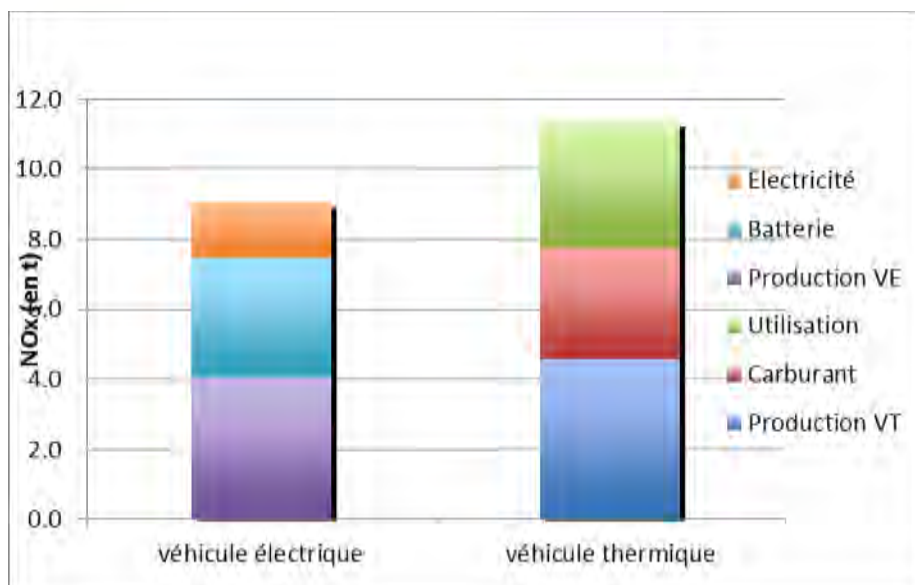


Figure 5-6 Comparaison des émissions annuelles de NOx sur l'ensemble du cycle de vie d'une flotte de 5000 véhicules électriques et thermiques

Le bénéfice de l'implantation du VE en milieu urbain correspond à la partie « Usage » du thermique.

Les mêmes figures ont été élaborées pour les différents polluants atmosphériques locaux (cf Annexes).

En effet les VE vont permettre d'éviter les émissions d'échappement des VT qu'ils remplaceront, c'est à dire pour une flotte de 5000 VE :

- ✓ 26,8 t de CO,
- ✓ 2,3 t de NOx,
- ✓ 3,9 t de COVM.

Cependant, certaines émissions seront « déplacées », en raison des impacts importants liés à la fabrication du VE (notamment la production de la batterie) et à la production d'électricité. Ainsi le déploiement de 5000 VE sera notamment responsable des émissions de :

- ✓ 4,1 t de SO2 supplémentaire,
- ✓ 600 kg de PM2,5-10 supplémentaire,
- ✓ 177596 Bq d'émissions radioactives dans l'air et 648589 Bq d'émissions radioactives dans l'eau supplémentaires.

Les inventaires de l'étude OPTINEC 4 : Scénarios prospectifs climat - air – énergie, Evolution des émissions de polluants en France Horizons 2020 et 2030, réalisée par le CITEPA, proposent des émissions de polluants atmosphériques à l'horizon 2020 selon les mesures réglementaires disponibles. Ainsi nous pouvons comparer les émissions évitées ou déplacées précédemment calculées avec les émissions totales liées au transport routier, au transport en général ou à l'ensemble des activités.

Une extraction des scénarios prospectifs des émissions de polluants atmosphériques de l'étude Optindec est disponible en annexe.

L'étude du CITEPA ne s'intéresse pas à l'ensemble des polluants que nous souhaitons étudier, ainsi nous nous concentrerons sur les émissions suivantes : NO_x, COV, SO₂ et PM_{2,5-10}.

Il serait intéressant de comparer les émissions évitées en zone urbaine avec le total des émissions locales du transport pour une agglomération. En l'absence de ces données, nous ramenons les émissions nationales à une ville de 500 000 habitants. Nous considérons que cette ville imaginaire de 500 000 habitants est représentative de la situation française. Ainsi les émissions spécifiques à la ville imaginaire peuvent être obtenues en multipliant les valeurs d'inventaire par la population de la ville (500 000) puis en les divisant par la population totale française à l'horizon 2020 (65 000 000⁶⁵). Les résultats sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 5-10 Contribution des émissions évitées par rapport aux émissions totales annuelles

	NO _x	NMCOV
émissions évitées (en t)	- 3,6	- 3,9
total VP+VUL par an (en t)	1693	173
	- 0,21%	- 2,3%
total transport routier (en t)	2253	317
	- 0,16%	- 1,2%
total transport (en t)	2954	490
	- 0,12%	- 0,8%
total (en t)	5907	5478
	- 0,06%	- 0,07%

Les émissions évitées liées au déploiement de 5000 VE dans une ville de 500 000 habitants à l'horizon 2020 ne sont pas significatives comparées aux émissions totales de polluants atmosphériques pour cette ville. Si on se concentre uniquement sur les émissions liées aux véhicules particuliers et utilitaires légers, le déploiement de 5000 VE représente 2,3% des émissions de COVNM liées aux VP et VUL évitées grâce au déploiement du VE dans la ville

Tableau 5-11 Contribution des émissions déplacées par rapport aux émissions totales annuelles

	SO ₂	PM 2,5-10
émissions déplacées (en t)	4,1	0,6
total VP+VUL par an (en t)	4,3	64,6
	95%	0,9%
total transport routier (en t)	6,2	72,3
	66%	0,8%

⁶⁵ Source : INSEE, 2006

total transport (en t)	41,3	176
	10%	0,3%
total (en t)	1750	1662
	0,2%	0,04%

Les émissions évitées ou déplacées liées au déploiement de 5000 VE dans une ville de 500 000 habitants à l'horizon 2020 ne sont pas significatives comparées aux émissions totales de polluants atmosphériques pour cette ville. Si on se concentre uniquement sur les émissions liées aux véhicules particuliers et utilitaires légers, le déploiement de 5000 VE induit le déplacement de 95% des émissions de SO₂ liées aux VP et VUL vers les sites de production d'électricité et surtout de production de la batterie.

Il est important de souligner que les émissions déplacées (SO₂, PM 2,5-10 et émissions radioactive) sont relâchées sur différents sites de production contrairement aux émissions d'échappement des VT (émissions en zone urbaine). Les calculs affichés dans le tableau ci-dessus sont présentés afin de donner un ordre de grandeur des émissions déplacées. D'autres parts, la conception et le recyclage des batteries (réduction des matériaux impactants comme le cobalt ou le nickel) et l'origine de l'électricité utilisée auront un impact significatif sur les émissions déplacées.

En conclusion, le déploiement de 5000 VE dans une agglomération de 500 000 habitants induit une réduction modérée des émissions locales et peut entraîner une augmentation sensible des émissions « déplacées » (principalement du SO₂). Cependant les futures technologies mises en place (nouvelles technologies de batteries, recyclage des batteries, électricité d'origine renouvelable) permettront d'atténuer ces émissions déplacées.

5.1.2 Bruit

Contrairement à la pollution atmosphérique, le bruit n'est pas une information disponible dans les résultats d'une ACV classique. Les données utilisées dans cette partie proviennent d'études complémentaires. L'objectif idéal serait ici d'évaluer le gain en termes de pollution sonore du déploiement du VE en agglomération à l'horizon 2020.

Un projet à l'IFFSTAR vient d'être lancé afin de modéliser ce problème (contact : Joël Lelong). Nous ne pouvons pas reproduire cet exercice ici, cela dépasse l'ampleur de ce projet, cependant nous invitons les personnes intéressées à suivre ce projet pour obtenir des résultats plus complets.

5.1.2.1 Les origines du bruit

Le bruit d'un véhicule (thermique) a principalement 2 origines :

- ✓ Le bruit du moteur
- ✓ Le bruit du roulement (frottement roue/chaussée)

Le bruit du roulement intervient surtout à haut régime (au-delà de 50 km/h) car le bruit en dB est proportionnel à la racine de la vitesse. Dans le cadre d'une utilisation urbaine du véhicule, le bruit du moteur est la principale nuisance sonore (notamment à bas régime

par exemple l'accélération aux feux rouge). D'où l'intérêt du véhicule électrique, pour lequel le moteur est beaucoup plus silencieux⁶⁶.

5.1.2.2 Evolution des facteurs d'émissions

Une étude réalisée par l'Inrets - *Passenger cars. Power unit and tyre-road noise, driving behaviour : what are the stakes, Inrets, 2001* - quantifie le bruit émis pour différentes motorisations en fonction de la vitesse. Ces valeurs mesurées sont représentatives d'un large échantillon de véhicules. Pour des vitesses supérieures à 50 km/h, le bruit en dB est quasiment identique pour le VE et le VT car il est principalement dû au roulement. Plus la vitesse est basse, plus le VE est intéressant en termes de pollution sonore, comme le montre la figure ci-dessous :

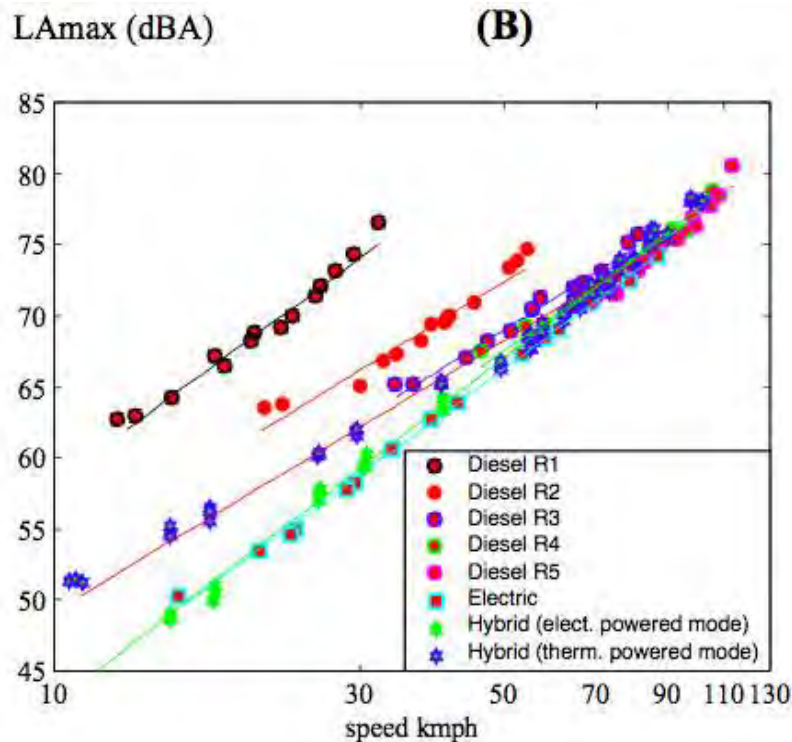


Figure 5-7 Evolution du bruit en dB en fonction de la vitesse pour différents types de véhicules⁶⁷

Le bruit émis par la voiture est une fonction du logarithme de la vitesse, fonction différente pour chaque rapport enclenché (symbolisé par r).

$$L_r = A_r + B_r \lg \left(\frac{v}{v_r} \right)$$

A et B sont des constantes spécifiques pour chaque rapport, v est la vitesse correspondante au bruit émis L_r et v_r est la vitesse maximum (de référence) pour le

⁶⁶ Projet de règlement relatif au bruitage des véhicules électriques et hybrides

<http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2011/wp29grb/ECE-TRANS-WP29-GRB-2011-06e.pdf>

⁶⁷ Passenger cars. Power unit and tyre-road noise, driving behaviour : what are the stakes, Inrets, 2001

rapport donnée. Par exemple, d'après la figure ci-dessus, en première vitesse, la vitesse de référence est de 30 km/h et atteint l'émission sonore maximum sur ce segment de 74 dBA (d'où $A_r = 74$ dBA).

Ainsi, cette étude de l'Inrets nous permet d'estimer les émissions sonores d'un VT comparées à celles d'un VE en fonction de la vitesse. 3 points de vigilance doivent être notés :

- ✓ Les VT étudiés dans le cadre de cette étude sont représentatifs d'un large panel de véhicules (différences aux niveaux des motorisations, des cylindrées, des poids et des tailles de jantes),
- ✓ L'équation présentée ci-dessus ne prend pas en compte le bruit de l'accélération, négligeable à haute vitesse, mais qui peut représenter jusqu'à 4dB en première ou deuxième vitesse.
- ✓ Un véhicule électrique à l'arrêt n'émet aucun bruit (0 dB)⁶⁸. Les émissions sonores correspondant à des vitesses comprises entre 1 et 10 km/h ont été déterminées par régression linéaire, à l'aide de l'équation présentée ci-dessus.

Le cycle NEDC n'est pas pertinent pour évaluer le gain du bruit car il comporte des portions sur voies rapides pour lesquelles VE et VT possèdent un gain équivalent. Ainsi, afin de mettre en perspective le gain sonore du VE par rapport au VT, d'autres cycles de conduite représentatifs d'un trajet urbain ont été utilisés. Le bruit de chaque véhicule est déterminé pour 2 cycles provenant du projet ARTEMIS :

- ✓ Un cycle urbain modem-Hyzem représentatif d'un trajet en ville (vitesse maximum aux alentours de 55 km/h, arrêts prolongés au feu rouge)
- ✓ Un cycle urbain lent de l'Inrets représentatif d'une route au trafic dense (vitesse maximum aux alentours de 25 km/h, ralentissements et accélérations fréquentes)

Les courbes ci-dessous présentent l'évolution de la vitesse en fonction du temps de parcourt des cycles précédemment cités.

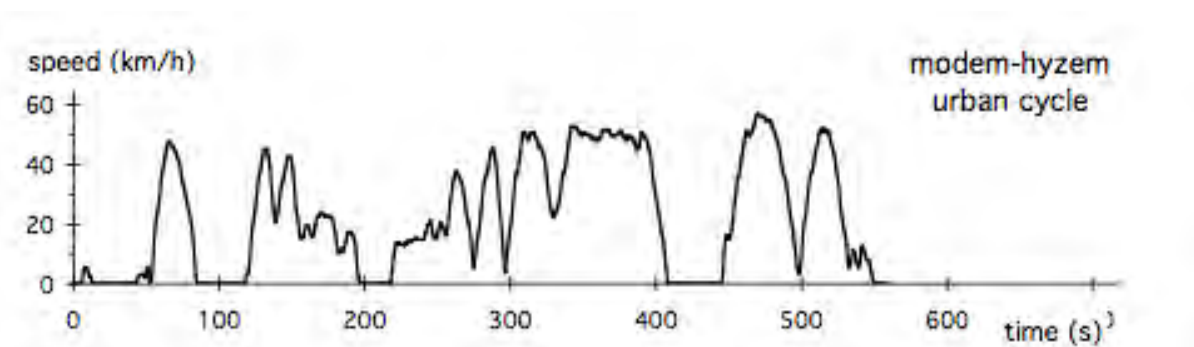


Figure 5-8 Cycle représentatif urbain modem-hyzem

⁶⁸ IFFSTAR

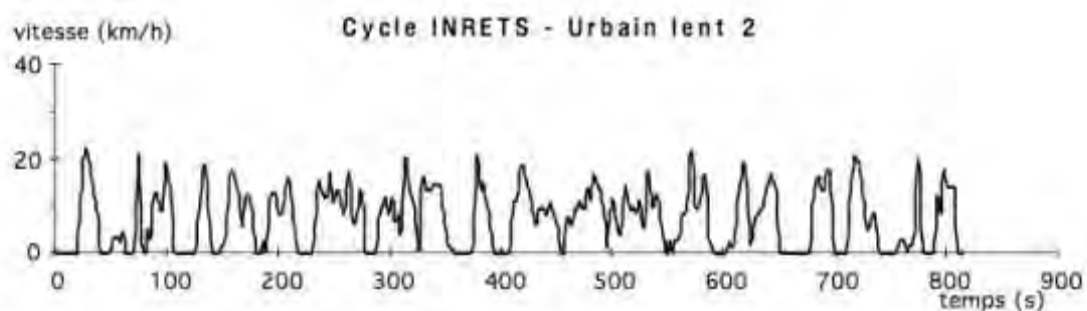


Figure 5-9 Cycle représentatif Inrets urbain lent 2 (données EUREV-France ; Crauser, 1989)

Les résultats obtenus montrent l'intérêt du VE en particulier pour le cycle lent, c'est-à-dire pour les petites vitesses (à l'arrêt, un VE n'émet aucun bruit).

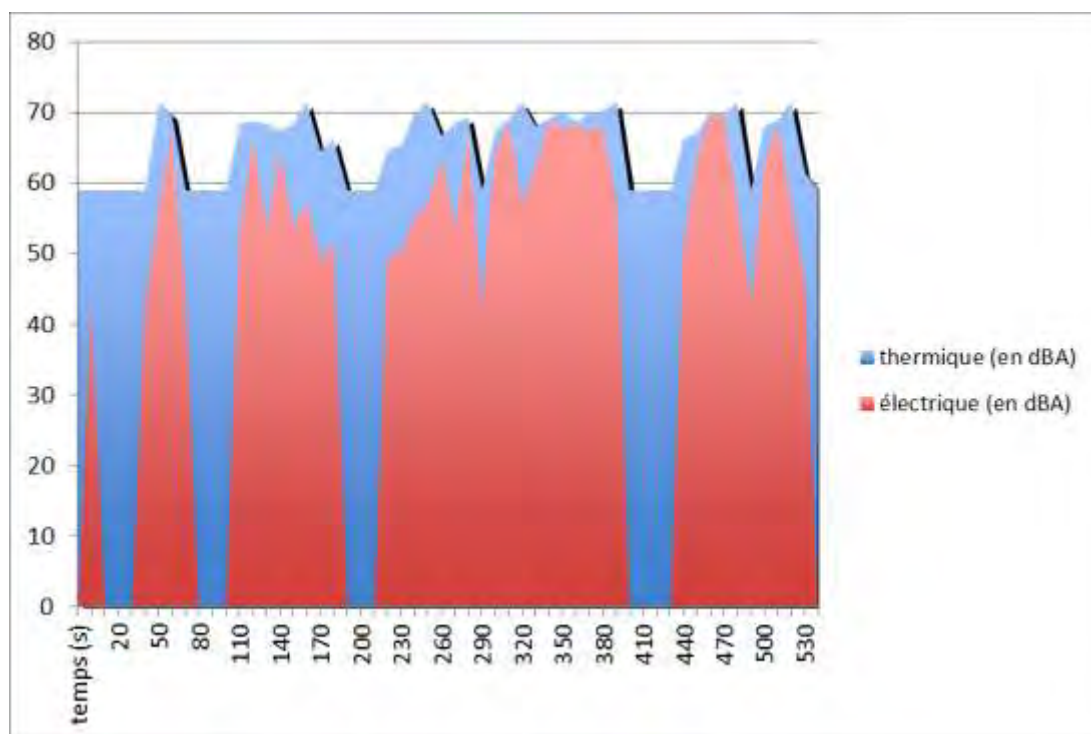


Figure 5-10 Evolution du bruit d'un VE et d'un VT sur un cycle urbain modem-Hyzem

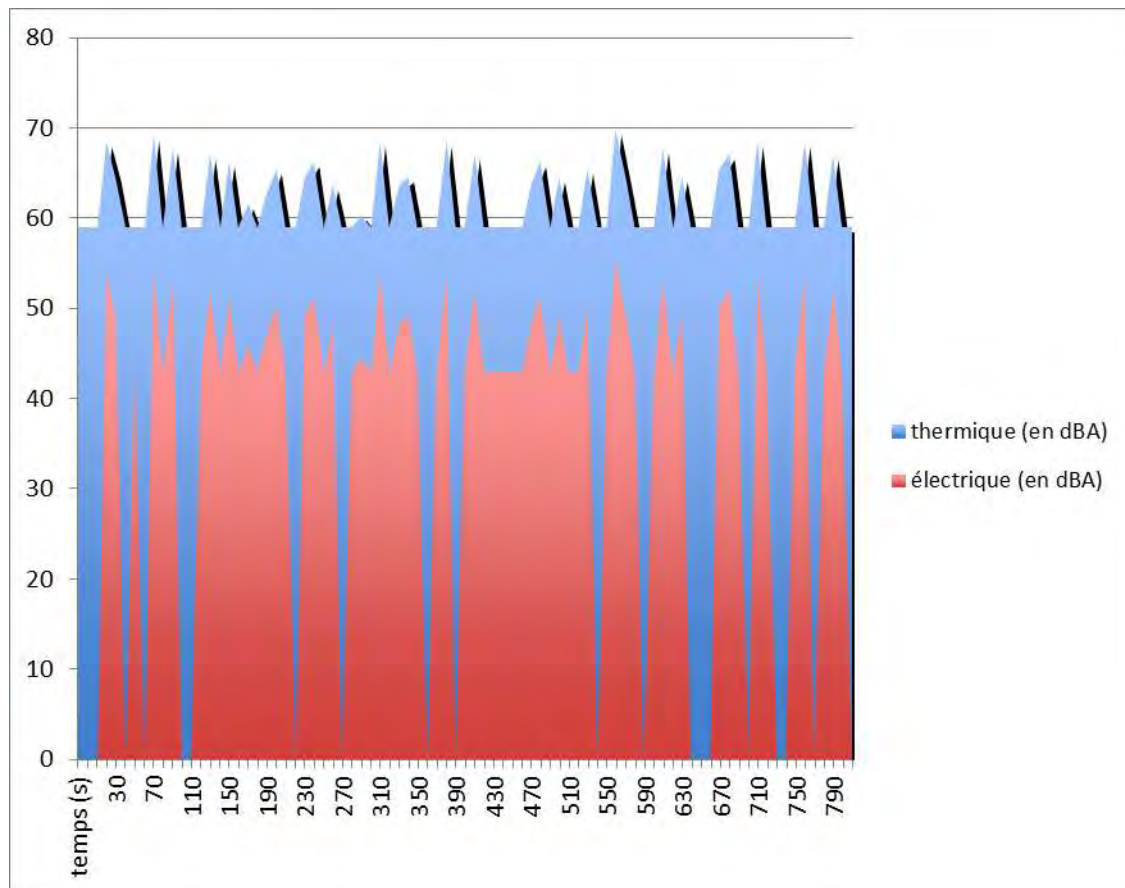


Figure 5-11 Evolution du bruit d'un VE et d'un VT sur un cycle urbain lent Inrets

Les graphes des figures ci-dessus ont été produits par Gingko 21 en combinant les valeurs des niveaux de bruit mesurés par l'INRETS et les cycles de conduite retenus.

Le bruit moyen des véhicules étudiés est de

- 65 dBA pour le VT et 43 dBA pour le VE sur le cycle modem-hyzem
- 62 dBA pour le VT et 37 dBA pour le VE sur le cycle Inrets urbain lent

Même si une valeur moyenne n'est pas représentative de la gêne occasionnée à l'instant t , on observe néanmoins l'avantage très net du VE par rapport au VT en terme de nuisance pour des petites vitesses. Attention toutefois, car ces valeurs ne prennent pas en compte l'accélération et donc le comportement du conducteur qui peut avoir une influence sur les résultats, tout comme la qualité du revêtement.

5.1.2.3 A l'échelle d'une flotte

Au regard des calculs précédents, nous allons considérer 2 vitesses moyennes d'écoulement du trafic : 10km/h et 25km/h. On va par ailleurs supposer que le trafic n'est constitué que de VP, avec un débit Q de 1000 veh/h.

Pour un trafic constitué à 100 % de VT, cela donne un niveau de puissance par mètre de voie de

$$L = L_v(\text{thermique}) + 10\log(Q) - 10\log(V) - V$$

Avec $L_v(\text{thermique})$ la puissance correspondant à la vitesse v pour un véhicule thermique.

Pour un trafic de 1000 veh/h dont 15% sont des VE, cela donne :

$$L = L_1 + L_2 \text{ (au sens de l'addition des niveaux en dB) avec}$$

$$L_1 = L_v(\text{thermique}) + 10\log(0,85*Q) - 10\log(V) - V$$

$$L_2 = L_v(\text{électrique}) + 10\log(0,15*Q) - 10\log(V) - V$$

$$\text{soit } L = L_1 + L_2 = 10 \cdot \log_{10}(10^{L_1/10} + 10^{L_2/10})$$

Les courbes ci-dessous présentent l'évolution de la puissance pour un débit de 1000 veh/h en fonction de l'implantation du VE dans la flotte (de 0 à 100%).

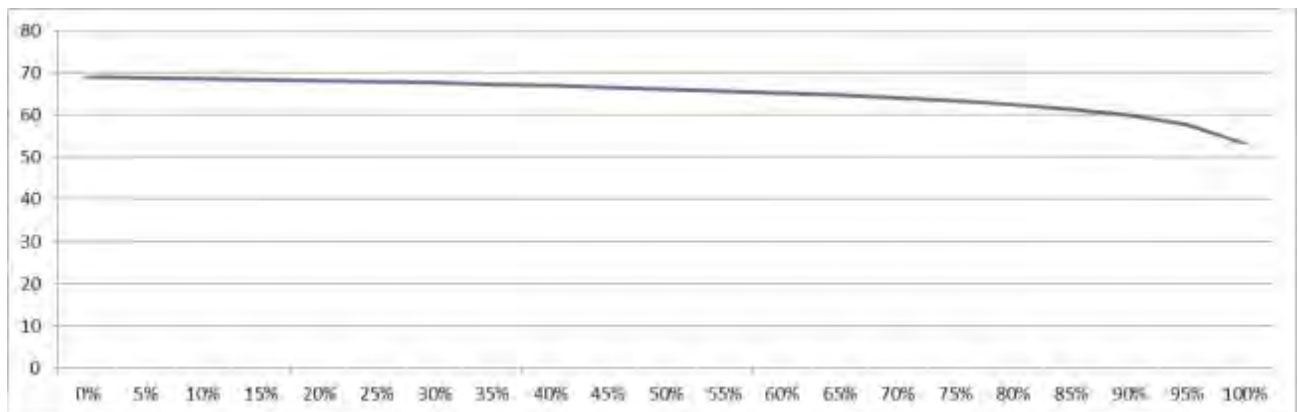


Figure 5-12 Evolution de la puissance sonore (en dB) en fonction de l'implantation du VE pour un débit de 1000 veh/h roulant à une vitesse de 10 km/h

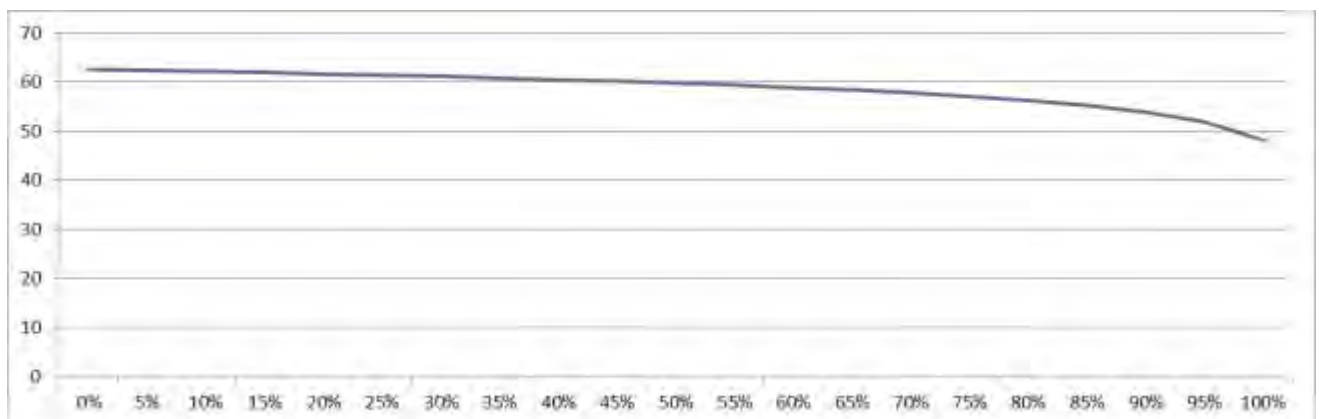


Figure 5-13 Evolution de la puissance sonore (en dB) en fonction de l'implantation du VE pour un débit de 1000 veh/h roulant à une vitesse de 25 km/h

Pour un trafic de 1000 veh/h dont 5% sont des VE, ce qui représente une hypothèse favorable au VE à l'horizon 2020, le gain serait de 0,2 dB (aussi bien pour le trafic à 10km/h que pour celui à 25 km/h)... ce qui est négligeable.

Il faudrait 25% de VE dans ce trafic pour obtenir un gain supérieur à 1 dB, et 75% pour un gain supérieur à 5 dB.

A titre d'exemple, diminuer par deux le volume de trafic initial (passer de 1000 veh/h à 500 veh/h) ferait gagner 3 dB⁶⁹.

5.1.2.4 Conclusion

Le gain en dB calculé ci-dessus met en évidence une très nette atténuation du bruit lié au véhicule à petite vitesse. Cependant le gain à l'échelle d'une flotte reste négligeable au regard des prévisions d'implantation du VE.

De plus, cet indicateur ne suffit pas à qualifier l'impact de la pollution sonore sur la population environnante. En effet, le nombre de personnes dérangées doit être également pris en compte, ainsi que le bruit ambiant. Dans la mesure où le véhicule électrique est utilisé sur des trajets courts, il est possible d'émettre l'hypothèse qu'une part significative de ces trajets se fait en milieu urbain ou habité. Cette observation conforte l'intérêt de l'atténuation du bruit mise en évidence ici.

Par ailleurs, il est important de préciser que le bruit joue un rôle dans la sécurité des personnes interagissant avec la chaussée (piétons, cyclistes...). Les constructeurs réfléchissent à intégrer un système de signalisation sonore pour les VE, afin d'éviter les accidents, à l'instar des sonneries de cloche utilisées en ville pour les tramways.

Ainsi la forte atténuation à faible vitesse du bruit du véhicule électrique peut représenter soit un avantage (en terme de pollution sonore) dans la mesure ou la flotte de VE est dominante par rapport à la flotte de VT, soit un inconvénient (en terme de sécurité).

5.2 Métaux critiques

La notion de criticité est rattachée aux métaux rares, dont les réserves s'amenuisent, ou bien dont le lieu d'extraction est instable (politiquement, économiquement, social...). Le but de ce chapitre est d'identifier quels sont les métaux critiques intervenant dans le cycle de vie du VE et quels seraient les impacts du déploiement du VE sur la demande de ces métaux en Europe à l'horizon 2020.

5.2.1.1 Introduction

La criticité est définie dans le rapport « Critical Raw materials for the EU » comme étant la résultante de 2 composantes :

- ✓ Le risque d'approvisionnement, variable prenant en compte :

⁶⁹ IFFSTAR

- la disponibilité : basée sur la stabilité politico-économique des pays producteurs, le niveau de concentration de la production, les possibilités de substitution et le taux de recyclage,
 - la protection de l'environnement : l'évaluation des impacts sur l'approvisionnement en matières premières causés par la mise en œuvre de mesures de protection de l'environnement dans des pays de faible performance environnementale.
- ✓ L'importance économique, définie l'importance de la production du métal en vue du développement des marchés dans lesquels il est utilisé.

On notera que la notion de ressource critique est relativement indépendante de celle de « réserve géologique ». La Commission Européenne a identifié dans son rapport *Critical Raw Material for EU* de juillet 2010 une cartographie de la criticité de 41 métaux.

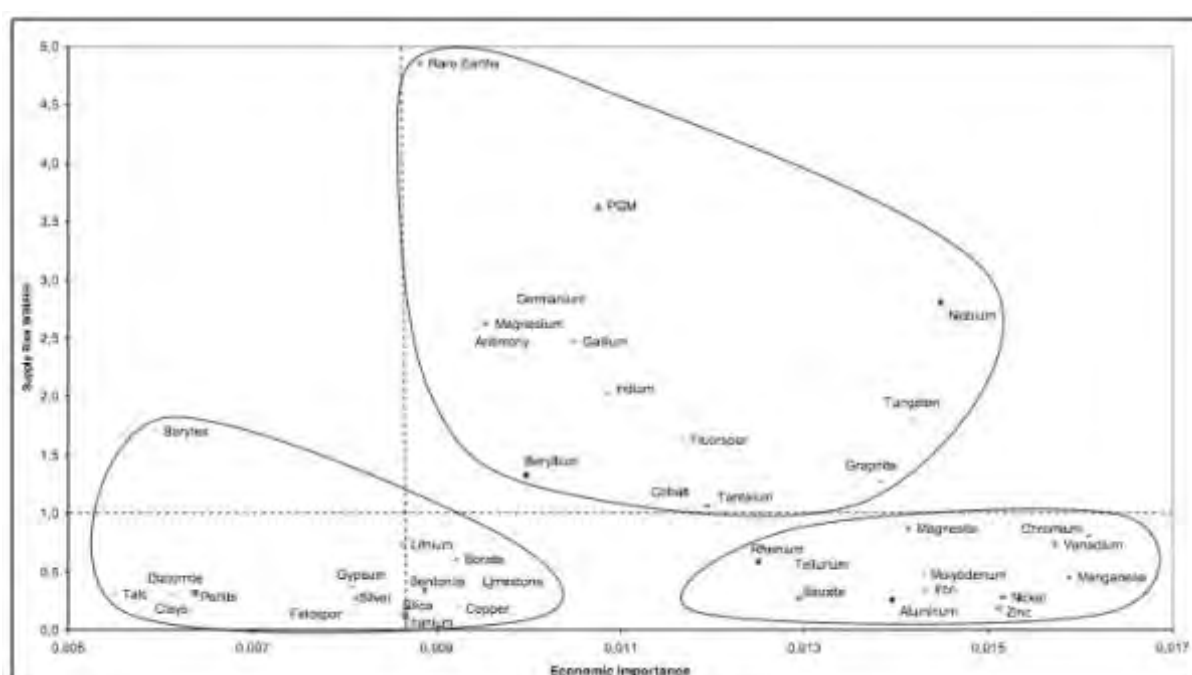


Figure 5-14 Cartographie des matières critiques selon la commission européenne

La criticité relative de différents métaux peut être définie. Ainsi, parmi les 41 métaux étudiés, 14 ont été reconnus comme étant les plus critiques en Europe (Tableau 5-12).

Tableau 5-12 Liste des 14 métaux les plus critiques identifiées par la Commission Européenne

Antimoine	Indium
Béryllium	Magnésium
Cobalt	Niobium
Fluorine	PGM (Platinum Group Metals) ⁷⁰ ou platinoïdes
Gallium	Terres rares ⁷¹

⁷⁰ Regroupe les métaux suivants : Platine, Palladium, Iridium, Rhodium, Ruthénium et Osmium

Germanium	Tantale
Graphite	Tungstène

L'UNEP⁷² s'intéresse également à la criticité des matériaux et donne une définition semblable à celle de la Commission Européenne.

5.2.1.2 Cas du Lithium

La criticité est un sujet sensible car elle confond technique et politique comme en témoigne la matrice de la criticité de la Commission Européenne qui se concentre à la fois sur des aspects techniques (recyclabilité, impact sur l'environnement...) et sur des aspects politiques (concentration des ressources, stabilité politique...).

Depuis plusieurs années il existe une controverse sur le cas du Lithium, matériau nécessaire à la réalisation des batteries Lithium-Ion. Il faut environ 3 kg de lithium (soit entre 1 et 2% en poids de la batterie) pour fabriquer une batterie de 24 kWh pesant 275 kg environ, soit 16 kg de carbonate de lithium.

Le prix du Lithium a été multiplié par trois entre 2004 et 2008. A titre d'exemple, en 2011, le prix du kilogramme de carbonate de lithium atteint 4,5\$/kg⁷³. A 4,5\$ le kg de carbonate de Lithium, le coût total du Lithium dans la batterie représente environ 70\$. Or une batterie coûte près de 9 500 dollars : le Lithium représente donc moins de 1% du prix d'une batterie.

En 2010, la production mondiale globale s'élevait à environ 25 300 t (source USGS), en progression de 6 500 t par rapport à 2009, soit près de 35%. Dans l'ordre d'importance, les principaux pays producteurs sont le Chili (8 800 t), l'Australie (8 500 t), la Chine (4 500 t) et l'Argentine (2 900 t). On notera que les Etats-Unis ne communiquent pas sur leur production de lithium, l'USGS invoquant le refus de divulguer les données privées des entreprises concernées.

Les modes de production actuellement connus sont au nombre de trois (classement par ordre d'importance) :

- ✓ à partir de saumures (lacs salés) : environ 80% de la production mondiale,
- ✓ à partir de minerai : 20% de la production mondiale,
- ✓ à partir d'argiles : pas en exploitation car trop gourmand en énergie à ce jour.

L'estimation des réserves en Lithium est difficile en raison des enjeux politiques liés au contrôle de la rareté. Suivant les sources, les réserves en Lithium oscillent entre 10 et 30 millions de tonnes (selon l'USGS, les réserves mondiales s'élèveraient à 9,8 millions de tonnes en 2010, USGS, Mineral Commodity Summaries, January 2011).

⁷¹ Regroupe les métaux suivants : Yttrium, Scandium, Lanthanes et Lanthanides (Cérium, Praséodyme, Néodyme, Prométhium, Samarium, Europium, Gadolinium, Terbium, Dysprosium, Holmium, Rbium, Thulium, Ytterbium et Lutétium), soit 17 métaux en tout, qualifiés de terres « rares » lors de leurs découvertes, bien que certaines soient exploitables dans plusieurs pays (US, Chine, Australie...) et soient relativement abondant.

⁷² Critical metals for future sustainable technologies and their recycling potential, OkoInstitut- UNEP, 2009

⁷³ Lithium consultants TRU Group Inc : <http://trugroup.com/Lithium-Market-Conference.html>

Ces chiffres ne tiennent pas compte des 0,17g/m³⁷⁴ de Lithium présent dans la mer, soit environ 240 000 milliards de tonnes. Contrairement aux idées reçues, le Lithium présent dans la mer est exploitable mais à un coût supérieur (entre 22 et 32\$ le kg⁷⁵).

Au final la criticité du lithium revient à estimer combien les consommateurs de Lithium sont prêts à payer. Au cours d'une réunion du comité de pilotage, un fabricant de batterie nous a indiqué que si le prix du Lithium était multiplié par 10, le prix de la batterie complète augmenterait de 1%. De ce fait, que ce soit en termes économiques ou de disponibilité, le Lithium n'est pas considéré comme critique pour les batteries Li-Ion utilisées dans la présente étude. Il est d'ailleurs à noter que le lithium n'a pas été retenu comme métaux les plus critiques par la commission européenne.

Au-delà de ce métal particulier, l'étude de la controverse sur le Lithium démontre le rôle majeur des critères économiques dans la criticité des matières premières rares.

5.2.1.3 Les métaux critiques mobilisés par véhicule

L'objectif est d'identifier les métaux critiques mobilisés pour 1 véhicule (VT vs VE) à l'horizon 2020 et de les quantifier sur le cycle de vie de chaque véhicule. Les valeurs unitaires ainsi obtenues seront mises en perspective dans la section suivante sur le parc européen projeté à l'horizon 2020.

Pour cela nous pouvons partir des BOM (Bills Of Materials ou nomenclatures matières) utilisées dans le cadre de l'étude ACV pour identifier les composants critiques. Nous considérons la carrosserie hors champ pour cette analyse. En effet, sur la carrosserie, les différences entre VT et VE ne sont pas significatives. Ainsi les matières critiques surveillées seront :

- ✓ Pour le VT : le platine et ses dérivés présents dans les pots catalytiques (les platines présents dans les catalyseurs des raffineries ne sont pas pris en compte)
- ✓ Pour le VE :
 - Le Cobalt des batteries NMC⁷⁶ - le Nickel et le Manganèse, autres matériaux de la masse active de la cathode, ne sont pas pris en compte car ils n'apparaissent pas parmi les métaux les plus critiques au sens de la Commission Européenne contrairement au cobalt,
 - Les terres rares pour la fabrication des aimants permanents du moteur électrique,
 - Les terres rares présentes dans les filières électriques (principalement solaires et éoliennes).

⁷⁴ Performance analysis of benchmark plant for selective lithium recovery from seawater, faculty of environmental engineering, university of Kitakyushu,

⁷⁵ Bearing point, 2009

⁷⁶ Il a été choisi de se concentrer sur cette technologie de batterie en supposant qu'elle soit représentative à l'horizon 2020

Platine et dérivés :

Palladium, Platine et Rhodium sont des composants des catalyseurs et des filtres à particules pour les moteurs Diesel. Les PGM (Platinum Group Metals) utilisés en Europe proviennent d'Afrique du Sud (60%) et de Russie (30%)⁷⁷.

Tableau 5-13 Production et réserves de platine (et ses dérivés) en 2010, USGS Mineral Commodity Summaries 2011

	Production mondiale en t, 2010	Reserves en t, 2010
PGM	380	66000

Les PGM sont amenés à jouer un rôle important car ils sont mobilisés pour de nombreuses nouvelles technologies (catalyseur, équipement électronique, pile à combustible, LCD).

Les PGM sont recyclables, la filière est d'ailleurs efficace pour les catalyseurs de système industriel⁷⁸ (équipement utilisé dans l'industrie du verre).

Cependant le recyclage des PGM des produits de grande consommation (pot catalytique des véhicules, équipements électroniques, bijouterie...) n'est pas encore opérationnel. En effet malgré les restrictions liées à la directive VHU (Véhicule Hors d'Usage), seuls 50% des PGM utilisés dans les pots catalytiques sont récupérés et valorisés en Europe.

Le taux de recyclage des PGM des matériels électriques en fin de vie représente tout juste 10%, la directive européenne sur les DEEE n'étant pas très contraignante pour cette famille de métaux (les PGM représentent un poids faible par rapport aux équipements, leur valorisation n'est pas encore intéressante au niveau économique).

L'étude du potentiel de recyclage de certains métaux rares, réalisée par l'ADEME en 2010, fournit des informations sur la quantité de PGM utilisée dans les pots catalytiques des véhicules :

⁷⁷ UN comtrade, HS 711011 and HS 711021

⁷⁸ Hagelucken 2006, Precious metals process catalysts

Tableau 5-14 Teneur en platinoïde des pots catalytiques⁷⁹

Norme	Véhicules essence					Véhicules diesel	
	Cylindrée	g/véhicule				Cylindrée	g/véhicule Pt
		Pt	Pd	Rh	Total		
G-Cat 87-90	< 1,4 l	0,95	0,00	0,19	1,14		
	1,4 - 2 l	1,43	0,00	0,29	1,72	< 2 l	
	> 2 l	2,09	0,00	0,43	2,52	> 2 l	
Euro I	< 1,4 l	0,95	0,00	0,19	1,14		
	1,4 - 2 l	1,71	0,00	0,33	2,04	< 2 l	
	> 2 l	2,76	0,00	0,57	3,33	> 2 l	
Euro II	< 1,4 l	0,29	1,14	0,19	1,62		
	1,4 - 2 l	0,38	2,00	0,29	2,67	< 2 l	1,43
	> 2 l	2,09	3,04	0,67	5,80	> 2 l	4,28
Euro III	< 1,4 l	0,10	2,47	0,29	2,86		
	1,4 - 2 l	0,48	2,76	0,29	3,53	< 2 l	4,09
	> 2 l	0,57	3,71	0,67	4,95	> 2 l	8,55
Euro IV	< 1,4 l	0,57	0,95	0,29	1,81		
	1,4 - 2 l	0,67	2,85	0,48	4,00	< 2 l	4,75
	> 2 l	0,48	4,75	0,67	5,90	> 2 l	8,55

A défaut de données pour les normes Euro 5 et Euro 6 pour modéliser un véhicule à l'horizon 2020, les teneurs de la norme Euro 4 seront utilisées. Ainsi pour des véhicules citadins, polyvalents (c'est à dire possédant une cylindrée inférieure à 1,4l), les teneurs en platinoïdes seront :

- ✓ Pour l'essence : **0,57 g** de Pt ; **0,95 g** de Pd ; **0,29 g** de Rh, soit un total de **1,81 g**
- ✓ Pour le Diesel : **4,75 g** de Pt.

Les terres rares présentes dans les pots catalytiques (lanthanés, cérium, néodymes) ne sont pas prises en compte, car elles sont mobilisées en infimes quantités.

Cobalt :

Le Cobalt est utilisé dans la fabrication de batteries rechargeables : Nickel-Cadmium, Nickel-métal hydride et Lithium-Ion (la cathode de la batterie peut contenir près de 60% d'oxyde-lithium-cobalt LiCoO₂).

Historiquement le cobalt était (et est toujours) utilisé comme super alliage, ses performances techniques à haute température permettent de l'utiliser pour des applications dans l'automobile, l'aéronautique et l'aérospatial. Le cobalt est également utilisé pour la fabrication de catalyseurs, d'aimants, de machines-outils et de pigments.

⁷⁹ D'après Öko-Institut et Umicore (2005), Materials flow of platinum group metals

Les plus gros producteurs de cobalt sont la République Démocratique du Congo (41%), le Canada (11%), la Zambie (9%), l'Australie, la Russie et la Chine (8%).

En Europe, le cobalt est surtout utilisé comme super alliage et dans la fabrication de machines, cependant le développement des batteries rechargeables risque d'affecter la consommation future.

Le taux de recyclage du cobalt est estimé à 68% par l'UNEP et le taux de matière recyclée incorporée est de 32%.

Tableau 5-15 Production et réserves de cobalt en 2010, USGS Mineral Commodity Summaries 2011

	Production mondiale en t, 2010	Reserves en t, 2010
Cobalt	88 000	7300000

Dans cette partie, il est considéré que les VE vendus à l'horizon 2020 seront exclusivement équipés de batterie NMC de 24 kWh pesant 238 kg⁸⁰. La batterie étudiée est celle modélisée dans la partie ACV de ce rapport et a été obtenue à partir des données des constructeurs et de la bibliographie disponible.

⁸⁰ A l'horizon 2020, il existera d'autres technologies de batteries qui ne sont pas prises en compte dans le cadre de ce chapitre.

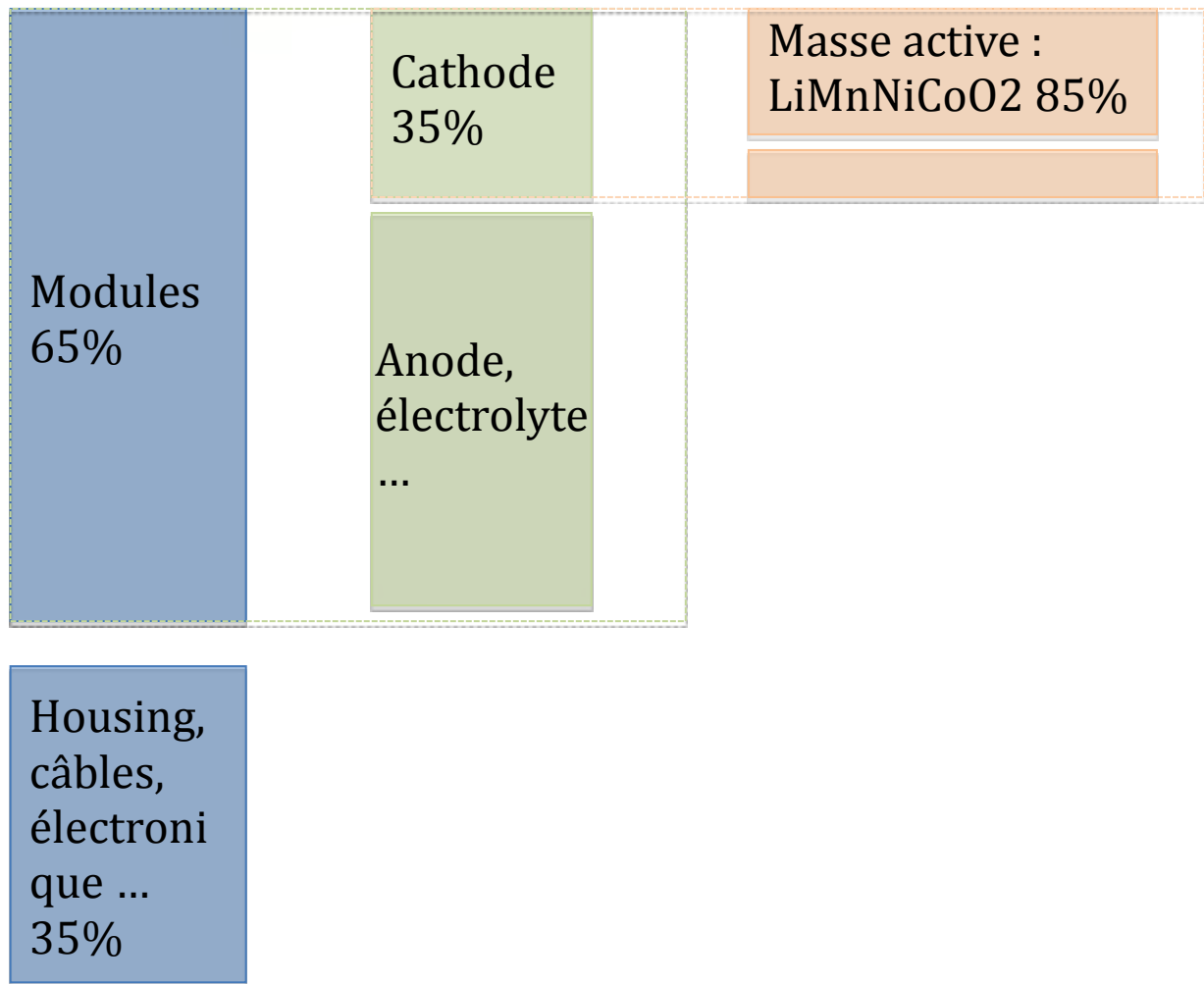


Figure 5-15 Décomposition de la batterie NMC

D'après la figure ci-dessus, la masse active – LiMnNiCoO₂ – représente 85% de la masse de la cathode. Il est supposé que les quantités de manganèse, de nickel et de Cobalt sont identiques soit, LiMn_(0,33)Ni_(0,33)Co_(0,33)O₂. Pour une batterie de 238 kg, la masse active représente 46 kg. Afin de déterminer la quantité de Cobalt nécessaire, la masse molaire de la masse active est calculée :

$M(\text{masse active}) = 1 \cdot M(\text{Li}) + 0,33 \cdot M(\text{Mn}) + 0,33 \cdot M(\text{Ni}) + 0,33 \cdot M(\text{Co}) + 2 \cdot M(\text{O})$,
avec $M(\text{Li}) = 6 \text{ g/mol}$; $M(\text{Mn}) = 55 \text{ g/mol}$; $M(\text{Ni}) = 59 \text{ g/mol}$; $M(\text{Co}) = 59 \text{ g/mol}$ et $M(\text{O}) = 16 \text{ g/mol}$.

$$M(\text{masse active}) = 95,1 \text{ g/mol}$$

D'où,

$$\text{Masse (Co)} = \text{Masse (masse active)} \cdot (0,33 \cdot M(\text{Co}) / M(\text{masse active}))$$

$$\text{Masse (Co)} = 46 \cdot (0,33 \cdot 59 / 95,1)$$

$$\text{Masse (Co)} = 9,42 \text{ kg}$$

La masse totale de Cobalt nécessaire à la production d'une batterie Li-Ion NMC est de **9,42 kg**, soit 4% du poids total de la batterie.

Terres rares :

Les lanthanés sont utilisés dans l'automobile. Le cérium est utilisé dans les pots catalytiques, il assure l'efficacité et la résistance thermique et mécanique des métaux précieux dans les catalyseurs et les filtres à particules (FAP). Grâce à leurs performances magnétiques remarquables, les lanthanés sont utilisés dans la fabrication des aimants (néodyme, praséodyme, dysprosium et terbium). Enfin, nombre de lanthanés, dont le cérium, sont utilisés dans des alliages d'acier ou d'aluminium, afin d'améliorer leurs performances techniques.

La quasi-totalité des terres rares provient de Chine (97%)⁸¹ qui détient 36% des ressources, des prospections sont à l'étude au Etats-Unis, Canada, en Australie, en Inde et au Malawi.

Tableau 5-16 Production et réserves de terres rares en 2010, USGS Mineral Commodity Summaries 2011

	Production mondiale en t, 2010	Reserves en t, 2010
Terres rares	130	110000

A peine 1% des terres rares présentes dans les déchets ont été recyclées⁸², provenant principalement des aimants. La plupart des applications détiennent des solutions alternatives pour remplacer les terres rares, mais à moindre performance. Les terres rares sont utilisées pour le secteur de l'éolien (aimants des rotors) et dans la composition des batteries Nickel métal hydride des véhicules hybrides.

En effet, le néodyme (ou praséodyme) est utilisé majoritairement pour la fabrication d'aimants permanents (Nd-Fe-B) qu'on retrouve dans :

- ✓ Les équipements électriques et électroniques (disque dur, dispositif audio, climatisation...)
- ✓ Les moteurs électriques
- ✓ Les alternateurs d'éoliennes

On peut trouver jusqu'à 1,5 kg d'aimant [Nd-Fe-B] par véhicule⁸³. Pas moins de 13 éléments peuvent en contenir, parmi lesquels :

- ✓ Les moteurs des dispositifs électriques d'aide au pilotage,
- ✓ Le disque dur du système de navigation embarqué,
- ✓ Les haut-parleurs,
- ✓ Les détecteurs d'enclenchement de ceinture,
- ✓ Les compresseurs des dispositifs de climatisation,
- ✓ Les moteurs des véhicules hybrides et électriques.

⁸¹ USGS Mineral Commodity Summaries 2010 : Rare Earths

⁸² UNEP – the recycling of metals

⁸³ Rhodia

Un moteur de véhicule électrique d'une puissance de 45 kW contient environ 900 g d'aimants au néodyme⁸⁴.

D'après le détail des véhicules étudiés (chapitre 2.1.2) le VUL électrique possède un moteur de 45 kW et le VP électrique un moteur de 55 kW. Ainsi il est supposé que le VUL électrique contient 900 g d'aimants au néodyme et que le VP électrique en possède 1100g.

La formule exacte des aimants permanents Nd-Fe-B est $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. Ainsi de la même façon que pour le cobalt de la masse active des batteries, il est possible de déterminer la quantité de terres rares (symbolisée par Nd pour néodyme, mais il peut s'agir de praséodyme, de dysprosium et de terbium) par moteur électrique.

$$\text{Masse}(\text{Nd}) = \text{Masse}(\text{aimant}) * (2 * M(\text{Nd}) / (2 * M(\text{Nd}) + 14 * M(\text{Fe}) + M(\text{B})))$$

Avec $M(\text{Nd}) = 144 \text{ g/mol}$; $M(\text{Fe}) = 56 \text{ g/mol}$ et $M(\text{B}) = 11 \text{ g/mol}$

Donc pour le VP,

$$\text{Masse}(\text{Nd}) = \mathbf{292,5 \text{ g}} \text{ soit environ } \mathbf{290 \text{ g}}.$$

Et pour un VUL,

$$\text{Masse}(\text{Nd}) = \mathbf{239,3 \text{ g}} \text{ soit environ } \mathbf{240 \text{ g}}.$$

Dans le cadre de notre étude, nous nous concentrerons uniquement sur les terres rares présentes dans les aimants permanents des moteurs électriques. En effet, il est considéré que les autres éléments cités plus haut contenant des terres rares sont les mêmes pour le VE et le VT.

Des terres rares sont également utilisées dans les technologies génératrices d'électricité. L'étude de la Commission Européenne « Critical Metals in Strategic Energy Technologies » montre les consommations de matières critiques par kWh et identifie 5 terres rares particulièrement critiques :

- ✓ Dysprosium,
- ✓ Neodymium,
- ✓ Tellurium,
- ✓ Gallium,
- ✓ Indium

Le tableau ci-dessous montre les consommations (en kg) de ces 5 terres rares par MW produit pour les 2 filières électriques qui contribuent le plus à la consommation des terres rares :

Tableau 5-17 demande en terres rares en kg/MW

	Eolien	Solaire
Dysprosium	2,8	/

⁸⁴ Certaines technologies de moteurs électriques des VE ne contiennent pas de terres rares (moteur asynchrone à rotor bobiné)

Neodymium	40,6	/
Tellurium	/	4,7
Gallium	/	0,12
Indium	/	4,5

Le détail pour chaque technologie est disponible en annexe. Les sources éolienne et solaire présentent l'avantage de pouvoir être mises en place rapidement et donc d'installer de la puissance supplémentaire pour répondre à une croissance de la demande. Dans la suite de l'étude, uniquement les terres rares (dysprosium, néodyme et tellurium) seront prises en compte.

5.2.1.4 Perspectives à l'échelle européenne

L'objectif de cette partie est d'appliquer les consommations de métaux critiques obtenues au chapitre précédent aux prévisions du parc européen à l'horizon 2020. Dans un deuxième temps, les consommations totales de matières critiques, seront comparées aux productions annuelles et aux réserves de ces matières.

Hypothèses :

- ✓ La flotte européenne de VE est équipée de batterie LI-ION NCM (1,1,1)
- ✓ La flotte européenne de VE est équipée de moteur électrique à aimants permanents
- ✓ La flotte européenne est estimée à partir de l'étude JRC « Plug-in Hybrid and Battery Electric Vehicles Market penetration scénarios of electric drive vehicles »

Les hypothèses utilisées (concernant les technologies de batteries et de moteurs électriques) illustrent volontairement un scénario défavorable en termes de performance environnementale (les quantités de cobalt dans la batterie et de terres rares dans les aimants permanents sont importantes) pour donner une estimation maximisée des impacts de la flotte européenne de VE sur les stocks de métaux critiques.

Des prévisions de ventes du VE à l'échelle européenne (UE 27) sont disponibles dans l'étude JRC « Plug-in Hybrid and Battery Electric Vehicles Market penetration scénarios of electric drive vehicles ». Le JRC a identifié 4 scénarios de déploiement du véhicule électrique aux horizons 2020 et 2030 en fonction de la performance des batteries et des infrastructures mises en place. Les scénarios hauts et bas de déploiement du VE en Europe ont été extraits et sont présentés dans les tableaux suivants⁸⁵ :

Tableau 5-18 nouvelles immatriculations en Europe à l'horizon 2020 des véhicules conventionnels et électrifiés

Nouvelles immatriculations (22 Mvh/an) ⁸⁶	Min	Max	Min	Max
---	-----	-----	-----	-----

⁸⁵ Le scénario « Min » correspond à un faible déploiement des véhicules électrifiés (VHR et VE) à l'horizon 2020, à l'inverse, le scénario « max » considère des hypothèses favorables au déploiement des véhicules électrifiés à l'horizon 2020.

⁸⁶ Plug-in Hybrid and Battery Electric Vehicles Market penetration scénarios of electric drive vehicles, JRC, 2010

conventionnel	94,5%	85,7%	20 790 000	18 854 000
VHR	5%	11,4%	1 100 000	2 508 000
VE	0,5%	2,9%	110 000	638 000

Tableau 5-19 parc en Europe à l'horizon 2020 des véhicules conventionnels et électrifiés

Parc (270 Mvh)	Min	Max	Min	Max
conventionnel	99,3%	97,9%	268 110 000	264 330 000
VHR	0,4%	0,9%	1 080 000	2 430 000
VE	0,3%	1,2%	810 000	3 240 000

Consommations évitées par le déploiement du VE

Cette partie vise à estimer la quantité de platine et de ses dérivés, présents dans les pots catalytiques, qui ne serait pas consommée du fait du déploiement du VE.

Les quantités de métaux issues du groupe des PGM ont été identifiées et sont reprises dans le tableau suivant :

Tableau 5-20 Quantités de PGM mobilisées dans les VT essence et Diesel

Part à l'échelle du parc européen ⁸⁷		Pt	Pd	Rh	Total
Essence	57,14%	0,57	0,95	0,29	1,81
Diesel	42,86%	4,75	0	0	4,75

Tableau 5-21 Consommation et Stock évités de PGM à l'horizon 2020 lié au déploiement du VE

	Consommation annuelle en t	Comparé à la production annuelle mondiale de 2009	Comparé à la réserve mondiale en 2010
Quantité de PGM			
Min en t	0,34	0,09%	0,00%
Quantité de PGM			
Max en t	1,96	0,52%	0,00%
	Stock à l'horizon 2020 en t	Comparé à la production annuelle mondiale de 2009	Comparé à la réserve mondiale en 2010
Quantité de PGM			
Min en t	2,49	0,65%	0,00%
Quantité de PGM			
Max en t	9,95	2,62%	0,02%

⁸⁷ Les pourcentages des véhicules essence et Diesel (pour les petits et moyens véhicules) à l'échelle du parc sont différents que ceux utilisés pour la France. Ces valeurs proviennent de l'étude de la Commission Européenne : Plug-in Hybrid and Battery Electric Vehicles Market penetration scénarios of electric drive vehicles, JRC, 2010

On observe dans les tableaux ci-dessus que dans un cas favorable au déploiement du VE, près de 2t de PGM seraient économisées chaque année à l'horizon 2020 (soit 0,5% de la production annuelle de 2009). Sur l'ensemble du parc de VE à l'horizon 2020, c'est près de 10t de PGM économisé, soit 2,62% de la production annuelle de 2009 et 0,02% des réserves estimées en 2010.

Consommations supplémentaires induites par le déploiement du VE

Cobalt

D'après les calculs effectués au chapitre précédent, la quantité moyenne de Cobalt par VE est de 9,4 kg. Ainsi au regard des estimations d'implantation du VE à l'échelle européenne à l'horizon 2020 on observe pour les scénarios « Min » et « Max » les consommations annuelles et les stocks suivants :

Tableau 5-22 Consommation et Stock de cobalt liés au déploiement du VE à l'horizon 2020

	Consommation annuelle en t	Comparé à la production annuelle mondiale de 2010	Comparé à la réserve mondiale en 2010
Quantité de Co Min	1034	1,2%	0,01%
Quantité de Co Max	5997	6,8%	0,08%
	Stock à l'horizon 2020 en t	Comparé à la production annuelle mondiale de 2010	Comparé à la réserve mondiale en 2010
Quantité de Co Min	7614	8,7%	0,10%
Quantité de Co Max	30456	34,6%	0,42%

On observe que dans un cas favorable au déploiement du VE (équipé de batterie NMC exclusivement), 5997 t de Cobalt seraient consommées chaque année à l'horizon 2020 (soit 6,82% de la production annuelle de 2010). Sur l'ensemble du parc de VE à l'horizon 2020, c'est 30456 t additionnelles de Cobalt qui seraient consommées, soit 34,60% de la production annuelle de 2010 et 0,42% des réserves estimées en 2010.

Terres rares

Tableau 5-23 Consommation et Stock de terres rares liés au déploiement du VE à l'horizon 2020

	Consommation annuelle en t	Comparé à la production annuelle mondiale de 2010	Comparé à la réserve mondiale en 2010
Quantité de terres rares Min	31,2	0,03%	0,00%
Quantité de terres rares Max	181	0,15%	0,00%
	Stock à l'horizon 2020 en t	Comparé à la production annuelle	Comparé à la réserve

		mondiale de 2010	mondiale en 2010
Quantité de terres rares Min	230	0,19%	0,00%
Quantité de terres rares Max	920	0,74%	0,00%

On observe dans les tableaux ci-dessus que dans un cas favorable au déploiement du VE, 181 t de terres rares seraient consommées chaque année à l'horizon 2020 pour fabriquer les aimants permanents des moteurs électriques (soit 0,15% de la production annuelle de 2010). Sur l'ensemble du parc de VE à l'horizon 2020, c'est 920 t additionnelles de terres rares qui seraient consommées, soit 0,74% de la production mondiale annuelle de 2010. Cette quantité est négligeable comparée à la réserve estimée en 2010.

Cependant, des terres rares sont également consommées dans la production d'énergies alternatives (éolien et solaire). Dans la partie qui suit, la puissance nécessaire à l'alimentation des VE du parc européen sera calculée. A l'horizon 2020, la flexibilité de la puissance installée dépendra principalement des énergies renouvelables (surtout l'éolien) et du gaz, car ces filières sont rapides à installer. Dans le cadre du présent exercice, nous supposons que cette puissance supplémentaire sera assurée par 50% d'électricité éolienne et 50% de photovoltaïque, car :

- ✓ nous ne disposons d'aucune information sur les quantités de terres rares mobilisées pour la filière gaz (s'il y en a),
- ✓ ce scénario permet de maximiser la quantité de terres rares consommée.

Il est supposé que seule la charge lente est utilisée (16A monophasé soit 2,816 kW⁸⁸). Dans cet exercice, il est supposé que l'ensemble des VE charge en même temps, afin d'estimer la puissance maximum requise pour ce scénario critique. Ainsi la puissance supplémentaire maximum est détaillée dans le tableau ci-dessous.

Tableau 5-24 Puissance supplémentaire nécessaire pour le déploiement du véhicule électrique à l'horizon 2020

	Puissance en MW	Comparé à la puissance total installée en Europe en 2020 ⁸⁹
Min	2281	0,24%
Max	9124	0,97%

Dans le cas défavorable au déploiement du VE, il faudrait installer 1140,5 MW d'électricité éolienne et 1140,5 MW de photovoltaïque.

Dans le cas favorable au déploiement du VE, il faudrait installer 4562 MW d'électricité éolienne et 4562 MW de photovoltaïque. Ces scénarios sont fictifs mais constituent un cas intéressant au regard des consommations de terres rares liées à ces installations.

Tableau 5-25 Consommations de terres rares liées à l'installation de filières électriques supplémentaires dans le cadre du déploiement du VE en Europe

⁸⁸ $16 * 220 * 0,8 = 2,816$

⁸⁹ « EU energy trends », commission européenne, 2008

Terres rares	Consommation en t	Comparé à la production annuelle mondiale de 2010	Comparé à la réserve mondiale en 2010
Min	55	0,04%	0,00%
Max	219	0,18%	0,00%

On observe dans les tableaux ci-dessus que dans un cas favorable au déploiement du VE, près de 220 t de terres rares seraient consommées afin de répondre à l'appel de puissance supplémentaire lié au déploiement du VE en Europe (soit 0,18% de la production annuelle de 2010). Cette quantité est négligeable comparée à la réserve estimée en 2010.

5.2.1.5 Conclusion

Le déploiement du VE en Europe à l'horizon 2020 ne constitue pas une menace pour l'approvisionnement des matériaux critiques identifiés, sauf peut-être pour le cobalt dont la consommation annuelle liée au VE représenterait 6,82% de la production annuelle mondiale. On comprend ainsi l'intérêt du recyclage du cobalt qui permettrait de constituer un stock européen. Pour les terres rares en revanche, les consommations ne sont pas significatives par rapport à la consommation annuelle.

Ces résultats reposent sur de nombreuses hypothèses qui restent discutables et présentent donc une forte incertitude. Il convient de les interpréter avec prudence.

6. Conclusion et perspectives

Rappel des objectifs

L'objectif de cette étude était d'évaluer, selon la méthodologie des ACV, la pertinence environnementale relative du véhicule électrique par rapport au véhicule thermique, sur le segment B des véhicules particuliers et sur les VUL, en 2012 et à l'horizon 2020, à l'échelle française et européenne, pour des véhicules dédiés à des déplacements de proximité.

Le développement des véhicules automobiles électriques est un sujet particulièrement délicat à traiter en ACV car il combine de grandes incertitudes (choix technologiques en particulier sur les batteries, usages, évolution des bouquets électriques...) à d'importantes conséquences en termes de politique publique (politique énergétique et performance nationale en termes de GES, politique de la ville, éventuel enjeu d'indépendance sur les matières critiques).

Pour éclairer cette question en situation d'incertitude, l'étude s'appuie sur :

- un mode de gouvernance élaboré (cf. section 1.5),
- la restriction du champ de l'étude à l'aide de scénarios probables, qui laissent cependant le champ ouvert à d'autres investigations,
- des calculs d'incertitudes dans le champ défini pour l'étude.

Rappel des hypothèses

- L'étude considère uniquement des trajets de proximité,
- Les véhicules (et batteries) sont assemblés en France pour une utilisation sur le territoire français,
- Des scénarios sur les 4 autres plus gros marchés européens (Allemagne, Royaume-Uni, Espagne et Italie) et un scénario européen moyen seront étudiés pour le VE,
- Une batterie Li-Ion est utilisée pour les horizons 2012 et 2020. Ces données restent incertaines car les technologies de batteries évoluent très vite et il est difficile de prévoir l'état de l'art à l'horizon 2020. La chimie de la batterie Li-Ion modélisée à l'horizon 2020 est différente de celle de 2012,
- Les mix électriques utilisés sont des mix moyens par pays (pour les 5 pays étudiés) ainsi qu'un mix moyen européen (EU27). A l'horizon 2020, un scénario moyen européen ainsi que 3 scénarios prospectifs du mix français sont modélisés,
- En phase d'usage, le cycle NEDC a été utilisé. Le chauffage et la climatisation ne sont pas pris en compte conformément à la définition du cycle NEDC. Un scénario utilisant un autre cycle de conduite pour le VT, ainsi qu'un scénario intégrant chauffage et climatisation pour les VT et VE ont été réalisés,
- Il est considéré qu'une seule batterie est utilisée sur la durée de vie du véhicule, ce qui constitue un scénario optimiste (un scénario probable envisage 1,2 batteries et un scénario lourd 2 batteries),
- Les crédits du recyclage ne sont pas intégrés dans le scénario de référence, mais sont présentés dans un scénario séparé.

Atouts et limitations

Cette étude apporte des éléments solides d'appréciation, du fait des facteurs de qualité suivants :

- contribution d'un large éventail de parties prenantes à la réalisation de l'étude, via le comité technique et ses sous-comités thématiques,
- collecte de données primaires, notamment auprès des constructeurs automobiles et des fabricants de batteries,
- utilisation des données secondaires de la base de données GaBi, qui bénéficie d'une grande reconnaissance à l'international, et particulièrement dans le monde de l'automobile. Le travail nécessaire pour adapter ces données d'inventaire à certaines conditions (différents mix électriques, facteurs d'allocation) est relativement conséquent et n'a pas pu être réalisé au sein de ce projet,
- expertise des prestataires en ACV de l'automobile.

Avant de commenter les résultats de l'étude, il importe d'en rappeler les limites :

- les impacts liés à l'installation des infrastructures de charge n'ont pas été pris en compte, du fait du périmètre initial de l'étude – une annexe éclaire en partie cette question ;
- la modélisation des batteries repose sur des données parcellaires : les données de deux fournisseurs ont été moyennées avec une source bibliographique.
- les chutes de production de la batterie n'ont pas été prises en compte, faute de données disponibles ;
- les impacts liés à la construction des usines de production des batteries n'ont pas été pris en compte : les impacts des infrastructures de production sont en général négligés en ACV, mais il aurait été intéressant de vérifier que c'est bien pertinent ici, malheureusement les données n'ont pas pu être collectées ;
- les données disponibles sur la performance de la batterie - consommation en usage réel de charge et décharge incomplètes, vieillissement, durée de vie, consommation sous différentes conditions climatiques - sont encore très parcellaires, du fait du faible développement du parc électrique en 2012. De ce fait, la durée de vie de la batterie a probablement été surestimée dans le cas de base. Une simulation a été réalisée sur ce point. Plus généralement, l'étude se fonde, pour les véhicules électriques comme pour les véhicules thermiques, sur des données d'homologation sur cycles normalisés - notamment pour la consommation – données qui peuvent être significativement éloignées des valeurs constatées en usage réel ;
- les segments des véhicules, et donc leur taille, sont définis par le cadre de l'étude, les effets d'un changement de type de véhicule n'ont donc pas été explorés ;
- les hypothèses sur les conditions d'usage et les caractéristiques des véhicules à l'horizon 2020 restent par nature discutables. L'évolution des performances des batteries notamment reste un sujet largement ouvert ;
- les impacts liés à la toxicité et à l'éco-toxicité n'ont pas été évalués dans cette étude faute de données fiables et d'indicateurs pertinents⁹⁰, alors que l'automobile contribue notablement à ces impacts ;

⁹⁰ Par ailleurs, certains indicateurs d'impact dépendent l'un de l'autre (CO₂ pour le potentiel de changement climatique ; SO₂ et NO_x pour les potentiels d'eutrophisation et d'acidification), c'est la raison pour laquelle nous utilisons le terme « impact potentiel ».

- le bruit n'est pas pris en compte dans le calcul consolidé sur le cycle de vie. Il est cependant appréhendé au niveau de la phase d'usage, dans un chapitre dédié ;
- les aspects d'échelle (impact d'une flotte de VE, bouquet électrique, infrastructure) n'ont pas été étudiés ici, cependant, des informations sur l'impact potentiel d'une flotte de VE à l'horizon 2020 sont disponibles dans le Module 2. Des études complémentaires sont nécessaires afin d'évaluer avec précision l'impact de ce scénario.

Résultats

L'étude permet de conforter l'intuition selon laquelle le mode de production de l'électricité impacte fortement le bilan environnemental du véhicule électrique qui se révélerait particulièrement performant avec un mix électrique 100% renouvelable. Elle met par ailleurs en évidence l'importance des impacts liés à la fabrication de la batterie.

Les conclusions suivantes sont issues des résultats de l'ACV et de l'analyse d'incertitude présentée dans le Chapitre 4.3.8. Les principales catégories d'impact sont présentées: changement climatique, acidification, consommation totale d'énergie primaire, épuisement des ressources fossiles, eutrophisation et création d'ozone photochimique.

- Pour le potentiel d'acidification, les scénarios modélisés montre que la contribution du VE est plus importante que celle du VT. Le potentiel d'acidification représente un désavantage de l'électromobilité. D'un autre côté, l'analyse d'incertitude montre l'importance des matériaux rentrant dans la composition de la batterie, offrant un levier d'amélioration potentiel important. Le scénario utilisé à l'horizon 2020 valide cette amélioration potentielle,
- Pour le potentiel de création d'ozone photochimique, le VE affiche un bénéfice par rapport au VTs. Le potentiel de création d'ozone photochimique est principalement dû aux émissions de composés organiques volatiles (VOC) des VTs en phase d'usage (conduite), émissions inexistantes pour les VE durant cette phase. Comme le POCP est un problème de pollution locale, le VE favorise la diminution de cet impact potentiel à l'endroit où le véhicule est utilisé (par exemple en milieu urbain),
- Le potentiel d'épuisement des ressources fossiles révèle que le VE tend à réduire la consommation de ressources fossiles, même pour le scénario du VE allemand. Le VE est donc plus indépendant des ressources fossiles, notamment pour le VE français (utilisant de l'électricité principalement nucléaire) et pour un VE utilisant des énergies renouvelables pour se charger,
- La consommation totale d'énergie primaire montre que le VE n'est pas plus efficace énergétiquement qu'un VT sur l'ensemble de son cycle de vie. La plage d'incertitude du VE pour cet indicateur est plus grande pour le VE que pour le VT, ainsi le VE tend vers une efficacité énergétique moindre par rapport au VT,
- Les déchets/émissions radioactives n'ont pas été calculées dans l'analyse d'incertitude, mais les résultats pour ces flux sont disponibles dans ce rapport. Un chapitre dédié aux bouquets électriques montre que les flux radioactifs (déchets et émissions) du VE sont logiquement plus importants que ceux des VTs, quelques soit le bouquet électrique utilisé pour la charge,
- Pour les autres indicateurs d'impact potentiel, les résultats dépendent du bouquet électrique utilisé pour la charge du VE. Un bouquet basé sur des énergies fossiles entrainera un bénéfice faible pour le VE. Un bouquet basé sur des énergies

renouvelables représentera une meilleure alternative pour l'ensemble des indicateurs d'impact potentiel à l'exception de l'acidification.

Des résultats similaires ont été obtenus pour le véhicule utilitaire léger (VUL). Les écarts entre le VE et le VT pour les indicateurs d'impact potentiel montrant un avantage pour le VE sont encore plus marqués pour le VUL que pour le VP.

Des résultats similaires ont été obtenus pour l'horizon 2020, mais les différences entre VE et VT sont moins importantes. De plus, la technologie de batterie utilisée (avec 50% de LiFePO4) réduit les impacts potentiels de la batterie de 20 à 40% à l'exception de la consommation de ressources minérales.

Interprétation et recommandations

L'industrie automobile fait aujourd'hui face à de multiples enjeux environnementaux, dont les principaux sont⁹¹ :

- le changement climatique ;
- la pollution atmosphérique locale ;
- le bruit, notamment en agglomération ;
- la consommation de ressources.

Le véhicule électrique peut apporter des réponses à certains de ces problèmes, et c'est l'enjeu de cette étude que d'éclairer les décideurs publics sur la pertinence environnementale du véhicule électrique dans différents contextes.

Comme l'étude publiée récemment en Allemagne par Öko-Institut⁹², la présente étude montre que la comparaison des performances environnementales entre véhicules électriques et thermiques reste délicate et dépend de nombreux facteurs.

En France, les véhicules électriques étudiés affichent un avantage sur de nombreux indicateurs, dont l'effet de serre : on observe une réduction d'environ 65% sur les émissions de gaz à effet de serre par rapport à un véhicule thermique⁹³ comparable en 2012, en raison du pourcentage élevé d'énergie nucléaire. Cette performance dépend fortement du mode de production de l'électricité : en revanche, à l'horizon 2020, le véhicule électrique modélisé pour une utilisation en Allemagne affiche une contribution à l'indicateur de changement climatique aussi élevée que celle d'un véhicule Diesel.

Par ailleurs, le gain potentiel en pollution atmosphérique locale représenté par le développement du véhicule électrique en milieu urbain dépend fortement de la taille du parc : à horizon 2020, la taille projetée du parc (1,8%) s'avère encore trop faible pour qu'un impact significatif sur la qualité de l'air d'une ville de 500 000 habitants puisse être validé (gain de 0,07% sur les émissions totales de VOC hors méthane).

De même, si le véhicule électrique représente un bénéfice en termes de nuisances sonores, la taille du parc envisagé en 2020 ne permet pas de conclure à un effet sensible sur une ville de 500 000 habitants, sauf si des zones sont dédiées au VE.

⁹¹ Source : rapport du Sénat, 2001 pour les trois premiers problèmes, communication avec les constructeurs pour le dernier.

⁹² OPTUM : Optimierung des Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen, Oktober 2011.

⁹³ 71% de gain par rapport au véhicule essence, et 64%, par rapport au véhicule Diesel.

L'importance cruciale du mix électrique souligne la nécessité, en cas de déploiement significatif du véhicule électrique, de mettre en place un système incitatif de « réseau intelligent » ou « smart grid », afin d'éviter de surajouter aux pics de consommation existants, et de recourir aux modes de production d'électricité « de pointe », plus coûteux économiquement et souvent plus impactant en termes d'environnement⁹⁴. Nécessaire pour éviter la surcharge du réseau dans l'hypothèse d'un parc important de véhicules électriques, un tel réseau permettra en outre d'éviter la recharge des VE avec de l'électricité carbonée.

Par ailleurs, la forte contribution de la fabrication de la batterie au bilan environnemental global du véhicule souligne :

- l'intérêt d'explorer des technologies alternatives de batteries – par exemple LiFeP04 ou LiMn2O4 LMO,
- le bénéfice environnemental futur lié au recyclage des batteries et à la réutilisation des métaux qu'elles contiennent lorsqu'elles arriveront en fin de vie,
- l'intérêt d'une utilisation intensive des véhicules électriques : soit dans une flotte d'entreprise, soit dans un système urbain d'auto-partage. En effet, le schéma classiquement considéré d'une seconde voiture du foyer pose question, car un tel véhicule roule peu⁹⁵, et a donc du mal à « amortir » les impacts liés à la fabrication de la batterie. Toujours dans l'optique d'une utilisation intensive du véhicule, les applications en minibus pourraient s'avérer intéressantes⁹⁶. Toutefois, une évaluation complémentaire devrait être menée, car une utilisation intensive du VE conduit à le charger en cours de journée, ce qui peut avoir des conséquences à la fois sur la nature du mix électrique, et sur le rendement de charge et la durée de vie des batteries, ces deux paramètres étant probablement plus faibles en charge rapide.
- l'intérêt d'explorer les performances environnementales des véhicules hybrides⁹⁷, exclus du champ de l'étude, et qui sont équipés d'une batterie de taille réduite, les impacts étant réduits quasiment en proportion de la masse. L'utilisation d'un « range extender⁹⁸ » pourrait aussi permettre de réduire la taille de batterie, en la dimensionnant pour un usage quotidien minimal.
- le bénéfice à concevoir des véhicules électriques très légers, aux performances adaptées à la ville (accélération, vitesse max, mais aussi encombrement) ce qui permettrait de réduire la taille de la batterie⁹⁹.

De plus, les bénéfices du véhicule électrique en ville, en termes de pollution atmosphérique et de bruit, ne devenant sensibles qu'à partir d'un taux d'électrification de la flotte bien plus élevé que celui actuellement projeté, des politiques sélectives privilégiant les VE sur certaines zones urbaines pourraient faire sens¹⁰⁰.

Enfin, la mise en perspective des résultats de l'ACV sur la question des matières dites critiques montre que seul le cobalt semble susceptible de poser un problème. Du fait de

⁹⁴ Les moyens dits « de pointe » couvrent la production d'électricité thermique, qui est plus impactante que la production d'électricité nucléaire (de base) en termes de gaz à effet de serre, d'acidification atmosphérique, d'eutrophisation, et dans une moindre mesure l'hydraulique, qui affiche en revanche des impacts moindres.

⁹⁵ Nous avons considéré 15 000 km par an, l'étude d'Öko-Institut retient un peu plus de 8 000 km/an.

⁹⁶ voir par exemple le Zeus Electrocitry.

⁹⁷ Cette option nécessite une étude complémentaire, afin d'explorer le coût et la performance environnementale.

⁹⁸ Dont l'impact environnemental devrait être également évalué.

⁹⁹ Là aussi, une étude complémentaire serait à mener, car des véhicules thermiques ou hybrides allégés pourraient également être imaginés.

¹⁰⁰ Voir par exemples les ZAPA, Zones d'Actions Prioritaires pour l'Air

son coût, les fabricants de batteries cherchent d'ores et déjà des substituts¹⁰¹. Notons aussi qu'une forte incertitude pèse aujourd'hui sur les technologies de batteries qui domineront le marché à l'horizon 2020 : si le Lithium-ion semble faire consensus, la chimie de l'électrode reste incertaine, notamment pour des raisons réglementaires : cela accroît la difficulté de l'exercice de prospective sur les matières critiques. L'éclairage apporté par l'étude tend, sans minimiser la question, à montrer que cet élément ne devrait pas constituer un frein majeur au développement du véhicule électrique.

A l'issue de cette analyse, des approfondissements et des prolongements de l'étude ont été identifiés. Ils concernent notamment :

- l'étude des impacts environnementaux de véhicules « hybrides rechargeables » ; la modélisation plus poussée des usages et des modes de charge,
- l'étude de véhicules électriques plus légers, à comparer à des véhicules thermiques ou hybrides également allégés ;
- l'étude des impacts environnementaux probables des différentes technologies de batteries en cours de développement ;
- une approche conséquentielle de l'ACV, visant à prendre en compte les effets induits par une décision de basculement significatif vers une électrification du parc.

¹⁰¹ Notamment avec les batteries LiFePO₄ et LiMn₂O₄.

7. Rapport de revue critique

FINAL CRITICAL REVIEW REPORT

of the study

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF THE ENERGY, GLOBAL WARMING, AND OTHER ENVIRONMENTAL IMPACTS OF ELECTRIC VEHICLES AND COMBUSTION ENGINE VEHICLES, FOR A SEGMENT B PASSENGER CAR AND A LIGHT UTILITY VEHICLE IN 2012 AND 2020

Final Report of the study produced for ADEME by Gingko21 and PE
INTERNATIONAL

Chairman of the critical review panel

Dr. PAYET Jérôme

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne - CYCLECO

Members of the critical review panel

Pr.Dr FINKBEINER Matthias Chair of Sustainable Engineering, TUB

Dr. CIROTH Andreas GREENDELTA

The members of the committee were partly not engaged or contracted as official
representatives of their organizations but acted as independent expert reviewers.

Date of publication: 23rd of October, 2012

1- Organization and management of the expert review

The review panel was invited to follow the study from its beginning to its end. The review process was organized throughout three face to face meetings, where the review panel was invited to give critical feedback on the methodology and the LCI development. These meetings were organized by ADEME with the participation of the LCA consultants – Gingko 21 and PE international- under the control of ADEME. Further exchanges were performed by email in order to ensure the indications given by the review panel are clear and applicable. A first version of the study report was finalized in April 2012, a first review report was sent to ADEME. A second study report was finalized in June 2012. Based on this report, the review panel was invited to write down a detailed second review report identifying in detail all the questions which were still open to the discussion, and all the points requiring further clarification. This review process finally ended with a final study report, and this final critical review report.

It shall be noticed that the review statement is based on the English version of the LCA report.

2- Aim of the review

The last step of the review process was based on the review of the final study report. Results are presented in the present review report and cover three aspects:

- a- Does the report fulfill ISO 14040 and ISO 14044 requirements?
- b- Does the study provide clear and reliable answers to the expectations of its mandate as requested in the goal and scope definition?
- c- Are there some limitations which restrict the interpretation of the results?

These three questions will be treated in detail in the present review report.

The review was performed according to paragraph 6.3 of ISO 14044, because the study is intended to be used for comparative assertions intended to be disclosed to the public.

This review statement is only valid for this specific report dated *23rd of October, 2012*

The analysis of individual datasets and the review of the LCA software models used to calculate the results are outside the scope of this review.

3- Compliance with ISO 14040 and 14044

The report in its final version is compliant with ISO 14 040 and 14 044. The report explores in depth key environmental aspects of the quantification of the environmental performances of electric vehicles versus diesel or petrol vehicle both for a passenger car and for a light utility vehicle. The technical committee and the consultants in charge of the study have provided interesting insights, resolving most of the questions asked during the study. The study has been made with regards to the state-of-the-art methodologies of Life Cycle Assessment at the date of the beginning of the work. Results produced are interesting and conclusions are presented clearly without bias.

4- Coherence with the scope of the study

As stated in the report, the study aims at comparing “the environmental performance of an electric vehicle and a combustion engine vehicle in the case of a passenger car and a light utility vehicle. .../... in order to identify the areas of environmental relevance for each vehicle.” The final purpose is “to allow government departments to examine the environmental importance of electric vehicles in relation to combustion engine vehicles through two examples: a small sedan and a light utility vehicle.” Because “Public authorities need to make decisions regarding the development of regarding infrastructure, the support of research and development, and systems to encourage uptake.” In order to ensure that the report satisfies the goal of the study, the external review ensures that any bias in favour of one or another alternative is avoided.

This requirement of the scope was checked in depth by reviewers questioning the assumptions made in the study which could lead to a bias in favor of electric vehicle, diesel or petrol cars. Numerous points of discussion were revealed all along the study and the consultants have provided transparent and additional insight in order to work with reliable assumptions. Where it was not possible to find a solution (typically when facing

methodology or data gaps), the choice made in the report was aiming at being transparent in order to clearly present the study limitations. Main limitations are thus presented in the core of the report.

One objective of the study was to compare environmental performances of electric vehicles in five different European countries. This objective is not fully reached because the assumptions and the results obtained are not on the same level of accuracy for each country. While for France, results and assumptions are very clear; this is not the case for other studies for which simply general tendencies are presented.

5- Need of clarifications and modifications (need of modifications in the report)

- Langage : Tables, figures and some footnotes are in French in the English report and make results hard to understand.

- Need of an improved reference: The automobile industry in general does not encourage the calculation of recycling credits/ Mercedes-Benz models with environmental certificates it refers to (Daimler website: <http://www.daimler.com/dccom/0-5-1312394-1-1312442-1-0-0-0-0-0-16158-876574-0-0-0-0-0-0-0.html>.) you mention a general positioning of the automotive industry while you are referring to a company website where the relation with the reference is not obvious.

- Inadapted assertion: P25: "In line with the ISO 14040 and 14044 guidelines, end-point indicators are not used in this study". ISO does not restrict the use of endpoint indicators as it does not require it. Replace this sentence by "end-point indicators are not used in this study".

- Data coherence: The issue related to the car weight need to be clarified all along the report (values and unit) :

EV without battery is given at 1310 kg (p7),

For the PC, the weight of the EV without the battery is 1306 t, (p.8 pb of unit)

For the EV, the calculated weight is 1 200 kg excluding the battery (p 34)

the weight of the electric engine and the gear box is 110 kg. (p32)

The weight of the electric engine and gears is around 140 kg. (p 32 line after)

Diesel combustion engine vehicle (1 150 t) p8, pb of unit)

petrol combustion engine vehicle (1 110 t). (idem)

- Presentation: Is the title complete in figure 4-29?
- Results in a figure: For ADP elements and ADP fossil, the credit given to the EoL of diesel and Gasoline vehicle seems still too large (Fig 4-42 and 4-43)
- Wrong assertion: “Results are clearly in favour of EV for Climate change” is not true and this sentence as an interpretation of the figure is too strong and shall be modified. This is not that clear, focusing on the energy mix of the main considered countries in the study, results indicate that the overall benefit of about 4500 Kg CO₂ equivalent over the whole life Cycle would be cancelled out simply adding a realistic energy use for auxiliaries and a 1.2 battery per life cycle instead of 1.
- Presentation: Figures in French with errors such as “electricité” all along the report

6- Need to mention explicitly the limitations recalled by reviewers at the end of the report (Need modifications of the report)

- Toxicity is not considered as impact category although there are relevant impacts expected → *this shall be mentioned as a limitation.*
- Noise is also not considered → *this shall be mention as a limitation.*
- F.u. One single vehicle → questions of scale are not addressed by main results of the study (→ grid, infrastructure, ..) but some aspects of scale have been analysed (contribution of EV to inner city pollution reduction for certain air pollutants, etc.) → *this shall be mentioned as a limitation.*
- Large data gaps in battery modeling, because 2 suppliers have provided data for battery and large data gaps remains. → *this shall be mentioned as a limitation.*

7 Need to better present references (report modification)

- Section 5-2: better present the sources of the reference highlighted in red
- Problem of reference in section 4-3-2 (highlighted in red)
- The reference JEC 2011 A and B need to be better described
- Still a problem in the reference (highlighted in red in the section REERENCE and in section 8-1-3 also a need to better present the reference (highlighted in red)
- For all the references, need to mention a link with the document such as a website, or an editor name or a postal address where it is possible to get the document for each reference.

Additional recommendations to ADEME further the critical review of the study:

**LIFE CYCLE ASSESSMENT OF THE ENERGY, GLOBAL WARMING,
AND OTHER ENVIRONMENTAL IMPACTS OF ELECTRIC VEHICLES
AND COMBUSTION ENGINE VEHICLES, FOR A SEGMENT B
PASSENGER CAR AND A LIGHT UTILITY VEHICLE IN 2012 AND 2020**

Final Report of the study produced for ADEME by Gingko21 and PE INTERNATIONAL

Date : 23rd October 2012

Recommendations for further investigations and updates:

Current results correspond to the state-of-the-art practice that can be applied to LCA at that time, and possible limitations are identified. In that context, results produced in this study can be used to support decisions and to building up a strategy for planning implementation of electric vehicles in the current mobility network. Nevertheless, considering the identified limitations, the review committee suggests to ADEME to update the study results, refining the assumptions of the studies, the inventories and the characterization models after three to five years in order to strengthen some results of the current study.

Three sources of limitations have been identified: methodology gaps at the beginning of the study; missing information for modeling the system, and missing inventory data.

a/ Methodology gaps:

- Complexity in comparing the different systems: When results are that close to each other, as is the case for numerous results in the study, it is more relevant to identify thresholds which can help to define conditions in which the use of electric vehicles has

more chances to be environmentally beneficial. For practical constraints, this was not done in this study but further investigations can be made during a study update.

- Choice of impact categories: from the beginning of the study, the choice was to assess impacts on the basis of CML method. This method is partly outdated and the new framework defined by the ILCD handbook/ EU Product Environmental Footprint methodology differs from this choice. Using ILCD impact categories and characterization models from level 1 and 2 can improve the results.

- Resource depletion: the characterization model used for resources depletion does not make consensus and will be improved in the coming years. Further update of the study could give different results due to using new characterization models. This can be for example the case for rare earth metals, lithium, or uranium.

- Nuclear waste: Impact of the long term storage of nuclear waste is not considered. This is due to a lack of methods for such an assessment but it remains a point of improvement as it obviously neglects a larger impact of the electric vehicles.

- Toxic impact (particle and NOx and organic substances): this issue is not addressed in the work, but strong efforts have been made during the last years to consolidate the different methods to assess these impact categories. New characterization models available can produce interesting results, both at midpoint and endpoint.

- Uncertainty calculation: first results in the study assess uncertainty in the comparison of the different alternatives. Nevertheless, new approaches enabling the calculation of uncertainty, including the assumptions, inventories and impacts assessment uncertainties can be used to support robust decisions.

b/ Data gaps for system modeling

- Multi functionality of the functional unit: In the report, the electric car replaces completely a diesel or petrol car. Nevertheless, electric cars have a limited autonomy compared to

conventional vehicles, and the life duration of the car and especially the overall driving distance (150 000 km) seems smaller than those of a conventional car (typically 200 to 250 000 km). Concerning the life duration of the car, the limitation of EV is mainly due to the battery life span, and so an assumption of 1.2 or 2 batteries per car can resolve this question. Concerning the car substitution, the assumption of the full replacement of a conventional car by an electric vehicle for a small car is an acceptable assumption at that time but this will have to be confirmed by studying the behavior of EV users.

- Charging assumptions: the study is based on the conclusions of the slow charging for EV's as described in the "livre vert", and the electric mix for charging in France is assumed to be the average French mix. These two issues are linked together and will need to be confirmed over time. Due to the cost of the batteries, it is possible that the owners try to optimize their use by using fast charging solution. At the same time, charging EV during peak electricity hours is likely to increase the impact of the EV for some impact categories. Data are missing at that time but results show that these two points will need further studies.

- Battery efficiency: this issue concern mainly the life duration of the batteries, the decrease in battery capacity over time, and the seasonal decrease of battery capacity over time. These issues are likely to affect EV car efficiency. Assumptions made for this study are based on the knowledge available at that time, but we are missing large scale feedback from actual use of batteries. The assumptions in this study could be confirmed by a real case feed back after few years.

- Heating and cooling: Energy consumption of auxiliaries functions such as heating and cooling are modeled with available current data. These data are justified but remain theoretical data. These data will need to be revised in the future on the basis of actual (and not estimated) data.

c/ Life Cycle Inventory data gaps

For Life Cycle Inventories, most of the assumptions concern the batteries. The main points will have to be confirmed over time are mainly the efficiency of processes for

battery production and recycling, the location of those processes (which define the electricity mix used).

8. Bibliographie

ADEME, 2008	ADEME, Le mix électrique gagnant pour 2020, 2008
ADEME, 2009	ADEME, ADEME&Vous, Electric transport in France, 2009
ADEME, 2010	Etude du potentiel de recyclage de certains métaux rares, BIOIS 2010
ADEME 2011	Etude de la seconde vie des batteries des véhicules électriques et hybrides rechargeables
BIOIS, 2010	BIO Intelligence Service, Analyse de Cycle de Vie appliqués aux biocarburants de 1ère génération consommés en France, Mars 2010
C4-1 ENR 2011	C4-1 Energies renouvelables, Un réseau intelligent pour véhicules électriques, 2011
CCFA, Nov. 2011	Tableau de bord de l'automobile, statistiques trimestrielles CCFA, Novembre 2011 : http://www.ccfa.fr/spip.php?article103082
Centre d'analyse stratégique	Centre d'analyse stratégique, Les nouvelles mobilités, Adapter l'automobile aux modes de vie de demain, Novembre 2010
CGDD – 2010	CGDD, La mobilité des français, panorama issu de l'enquête nationale transports et déplacements 2008, 2010
Panorama	
CGDD 2010	CGDD, Bilan coûts-avantages des véhicules électriques par rapport à différents véhicules thermiques, 2010
Bilan Coût	
Avantage	
CGDD, 2011	CGDD, Les véhicules électriques en perspective, Analyse coûts-avantages et demande potentielle, Etudes & documents n°41, Mai 2011
Citepa, Format SECTEN, 2011	CITEPA, Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France - Séries sectorielles et analyses étendues, Format SECTEN, Avril 2011
CITEPA, Optinec 4, 2011	CITEPA, OPTINEC 4 – Scénarii prospectifs climat-air-énergie - Evolution des émissions de polluants en France - Horizons 2020 et 2030, Juin 2011
CML 2001	Guinee, Jeroen (2001): "Handbook on Life Cycle Assessment"; Operational Guide to the ISO Standards; Kluwer Academic Publishers; ISBN 1-4020-0557-1
Daimler-Chrysler, 2005	Daimler-Chrysler, Environmental Certificate Mercedes-Benz S-Class, 2005
DG Energy, 2010	Commission Européenne, Directorate-General for Energy, EU energy trends to 2030, Update 2009, 2010
Directive Européenne - Fin de Vie, 2005	Official Journal of the European Union, Directive 2005/64/EC of the European Parliament and of the Council of 26 October 2005 on the type-approval of motor vehicles with regard to their reusability, recyclability and recoverability and amending Council Directive 70/156/EEC
DIRECTIVE 70/156/CEE	Conseil des communautés européennes, Directive 70/156/CEE concernant le rapprochement des législations des États membres relatives à la réception des véhicules à moteur et de leurs remorques,

Avril 1970

EMPA, Facteurs d'émissions, 2009	EMPA, Facteurs d'émission des particules d'abrasion dues au trafic routier, Août 2009
European Commission, critical raw materials, 2010	European Commission Enterprise and Industry, Annex V to the Report of the Ad-hoc Working, July 2010 Disponible sur http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/critical/index_en.htm
EC, Memo critical raw materials, 2010	Group on defining critical raw materials, European Commission Enterprise and Industry, Memo/10/263, Report lists 14 critical mineral raw materials, June 2010
Fischer a. all	Fisher, K. and all, Battery Waste Management Life Cycle Assessment, 2011
Frischknecht, 2010	International Journal of Life Cycle Assessment, 15:806–816 (2010), Frischknecht, R. et Stucki, M.: "Scope-dependant modeling of electricity supply in life cycle assessments"
Frost&Sullivan	Frost&Sullivan, Reuse and Recycling to Ensure the Completion of the «Green Car»,
GaBi 2011	GaBi 4: Software und Datenbank zur Ganzheitlichen Bilanzierung. IKP, Universität Stuttgart und PE Europe GmbH, Leinfelden-Echterdingen, April 2011."
Global Chance, 2009	Association Global Chance, Les cahiers de Global Chance, Vers la sortie de route ? Les transports face aux défis de l'énergie et du climat, 2009
Global Chance, 2010	Association Global Chance, Du gâchis à l'intelligence, Le bon usage de l'électricité, Janvier 2010.
Global NEST Journal, 2006	Global NEST Journal, Vehicle Emissions and Driving Cycles: Comparison of the Athens Driving Cycles (ADC) with ECE-15 and European Driving Cycle (EDC), Vol 8, No 3, pp 282-290, 2006
IFEU, 2006	IFEU, TREMOD: Transport Emission Model, Energy Consumptions and Emissions of Transport in Germany 1930-2030, 2006
Internoise 2001	Passenger cars. Power unit and tyre-road noise, driving behaviour : what are the stakes, Inrets, 2001
ISO 14040 : 2006	ISO 14040 Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework, 2006
ISO 14044 : 2006	ISO 14043 Environmental Management – Life Cycle Assessment – Requirements and guidelines, 2006
JRC, 2010	ILCD (International Reference Life Cycle Data System), Handbook 2010
JRC, Technical note, 2010	Plug-in Hybrid and Battery Electric Vehicles Market penetration scénarios of electric drive vehicles
JRC, 2011	JRC, Critical Metals in Strategic Energy Technologies, 2011
Kreissig & Kümmel 1999	Kreißig, J. und J. Kümmel (1999): Baustoff-Ökobilanzen. Wirkungsabschätzung und Auswertung in der Steine-Erden-Industrie. Hrsg. Bundesverband Baustoffe Steine + Erden e.V
LIRECAR, 2004	INTERNATIONAL JOURNAL OF LIFE CYCLE ASSESSMENT 9 (6) 405 – 416 (2004): W. Schmidt, E. Dahlqvist, M. Finkbeiner, S. Krinke,

	S. Lazzari, D. Oschmann, S. Pichon & C. Thiel: " Life Cycle Assessment of Lightweight and End-of-Life Scénarios for Generic Compact Class Passenger Vehicles"
Livre Vert, 2011	Negre, L., Livre Vert sur les infrastructures de recharge ouvertes au public pour les véhicules « décarbonés », Avril 2011
Lucas et al, 2011	Lucas et al, Life cycle analysis of energy supply infrastructure for conventional and electric vehicles, 2011
PE International, 2011	PE International, GaBi Database and Modelling Principles, Novembre 2011 Disponible sur http://www.pe-international.com/fileadmin/gabi/documentation5/GaBiModellingPrinciples.pdf
Rechs et al, 2002	Rechs, M. et al., „Torque Boost“ – Drehmomenterhöhung und Verbrauchsreduzierung im realen Fahrbetrieb, 23. Int. Wiener Motorensymposium, 25./26. April 2002
Sétra, émissions routières, 2009	Sétra, Emissions routières de polluants atmosphériques – Courbes et facteurs d'influence, Novembre 2009
Syndicat des énergies renouvelables, 2011	Syndicat des énergies renouvelables, Etat des lieux et perspectives de développement des énergies renouvelables, Focus sur l'électricité, 2011
UNEP, 2009	Critical metals for future sustainable technologies and their recycling potential, Oko-institut 2009
USGS 2011	Mineral commodity Summaries 2011
Van Haaren, 2011	Van Haaren, R., Assessment of Electric Cars" Range Requirements and Usage Patterns based on Driving Behavior recorded in the National Household Travel Survey of 2009, 2011
Vidalenc, 2009	Vidalenc, E., Foresight of electric transports in France in 2020, October 2009
WTT Report, 2007	JEC, Well-to-Tank Report, Well-To-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context, Report Version 2c, March 2007

8.1 Etat de la littérature en août 2011 (rapport bibliographique extrait du rapport intermédiaire)

8.1.1 Méthodologie

L'étude bibliographique a été réalisée afin de recueillir des connaissances sur les points clé méthodologiques des ACV du véhicule électrique (VE) comparé au véhicule thermique (VT), et d'identifier les données pertinentes qui seront, soit incluses dans les calculs, soit utilisées dans le cadre de vérifications croisées. Gingko 21 et PE International ont analysé une sélection d'études disponibles (pas nécessairement des études ACV) sur des sujets pertinents (véhicules, batteries, électricité...).

Il existe certaines études ACV réputées sur le thème du véhicule – par exemple l'ACV des biocarburants de première génération, de BIO I.S. par lesquelles nous avons commencé. Toute nouvelle étude intéressante est ajoutée à la « liste bibliographique ».

Il a été demandé aux membres du comité technique de proposer des études qui semblaient faire sens. A cet effet, une plateforme web « BaseCamp » fut ouverte, les membres du comité technique ont été invités afin qu'ils puissent télécharger leur propre étude. Un mois après le lancement du projet (en Mai 2011) la plateforme comptait plus d'une vingtaine d'études. Plutôt que de limiter l'étude bibliographique à quelques semaines, il a été décidé de la prolonger tout au long du projet pour bénéficier des dernières mises à jour et des études à venir.

Gingko 21 et PE International ont réalisé des résumés des études les plus pertinentes – certains de ces résumés sont disponibles en Annexe A. Ces résumés ont aidé à la préparation et à l'animation des réunions de sous-comité.

Le présent rapport détaille la bibliographie pour les thèmes suivants :

- ✓ Véhicules, moteurs et composants,
- ✓ Batteries,
- ✓ Carburants,
- ✓ Electricité,
- ✓ Cycles d'usage et de recharge,
- ✓ Recyclage.

Avant d'approfondir ces différents thèmes, nous nous sommes intéressés aux impacts utilisés dans les études disponibles. Il y a plusieurs méthodes de calculs d'impacts disponibles pour réaliser l'ACV d'un véhicule.

Tableau 8-1 Liste des méthodes d'impact des études existantes

Thema/Name	Year	Source / author	impacts method
Analyse de Cycle de Vie appliqués aux biocarburants de 1ère génération consommés en France	2010	Bio IS, ADEME	CML + Land Use Changes
Transport and air pollution (EN)	2010	18th International Symposium EMPA Helms, Pehnt, Lambrecht, Liebich - Ifeu	CO2, SO2, Nox, Energy
LCA of NiMH and Li-Ion	2010	NTNU	ReCiPe
Life cycle of a swiss passenger car	2006	LEA- ETHZ	Nox, PM2,5, CO2, Eco-Indicator (EI) 99
Preparing for a Life Cycle CO2 Measure	2011	LowC - Ricardo	GHG emissions
A Review of Battery Life-Cycle Analysis: State of Knowledge and Critical Needs	2010	Argonne	Air and Water pollutant, energy

La méthode de calcul d'impacts la plus usuelle est la CML 2001 de l'université de Leyde, utilisée notamment pour l'ACV des biocarburants de 1ère génération, car elle représente bien les impacts globaux de l'ACV (changement climatique, épuisement des ressources naturelles, acidification, eutrophisation, création d'ozone photochimique...) en Europe. D'autres études se concentrent sur les émissions de CO2 et/ou la consommation d'énergie. Les indicateurs de la pollution de l'air sont également bien représentés (COV, CO, NOx, PM...) car ils caractérisent l'impact local du véhicule.

8.1.2 Véhicules, moteurs et composants

Il est demandé à ce que les résultats de l'étude en cours de réalisation puissent être comparés avec les résultats de l'ACV des biocarburants de 1ère génération.

Durant les recherches bibliographiques, plusieurs études ACV sur les motorisations alternatives ont été trouvées (VE, véhicule hybride rechargeable, véhicule hybride, véhicule hydrogène).

Les études relatives aux véhicules hybrides et hybrides rechargeables peuvent être considérées hors périmètre. Cependant il est intéressant de se pencher sur les choix méthodologiques de ces études.

Thema/Name	Year	Source / author	time scope	geograph- ical scope	technology scope	boundaries/life cycle stages neglected
Analyse de Cycle de Vie appliqués aux biocarburants de 1ère génération consommés en France	2010	Bio IS, ADEME	2010 & 2015	France	E10 and B10 for 2010 and E85 and B30 for 2015, of kind of biofuel	Cradle to wheel
Hybride drive trains evaluation in actual use (EN)	1996	Inrets and PSA (from Maxime)				
Comparison between motorized 2-wheels and cars	2008	Ducreux (Ademe from Maxime)				
Tremod (Transport Emission Model)	2006	IFEU (from Michael)				
Elektromobilität (G)	2007	Pehnt, Hoepfner (IFEU) (from Michael)				
EV Plug and play (Brussel) (EN)	2010	PRTM (from HT)				
Temp.LCA studies on Hydrogen						
Plug-in Hybrid		EMPA	2010	Germany	PHEV, BEV, ICEV based on Golf 4	Tank to Wheel
Elektromobilität vs konventionelle Mobilität mit Bio- umweltschonenden Treibstoffen	2010	EMPA				
Life cycle of a swiss passenger car	2006	LEA- ETHZ	2000 to 2010	Switzerland	Diesel and Petrol vehicle based on Golf4	vehicle travel' (exhaust and abrasion emissions), fuel chain' (supply of fuels) and car infrastructure' (manufacturing, maintenance and disposal of cars)
E-Mobil-Studie: Plug-in-Hybride am besten	2011	EMPA				
Preparing for a Life Cycle CO2 Measure	2011	LowC - Ricardo	2011	Europe	ICEV, HEV, PHEV, EV, FCV	Cradle to Grave
Impact of EV		Consortium US, Dutch, DE				

Tableau 8-2 Liste des études les plus pertinentes relatives aux véhicules

La grande majorité des ACV étudiées prennent en considération la phase de fabrication du véhicule. Les valeurs des émissions et des consommations des sites de fabrication des véhicules n'apparaissent que très rarement dans les études ACV étant donné qu'elles garantissent la confidentialité des constructeurs.

Points clé:

- ✓ Nomenclature des matières,
- ✓ Flux intrants et sortants de la fabrication,
- ✓ Durée de vie, taille de la voiture...

8.1.3 Batteries

Un intérêt tout particulier a été accordé à l'étude des batteries, qui représentent dans le cas du véhicule électrique, une part importante des impacts environnementaux au regard de la bibliographie (25 à 50% des impacts de la phase de fabrication est due à la fabrication de la batterie).

Il a été décidé au cours de la réunion de sous-comité « Véhicules et composants » de se concentrer sur la famille de batterie Lithium Ion, étant donné que cette famille de batterie correspond le plus à la réalité industrielle. Il n'existe cependant aucune étude ACV publique comparant les impacts environnementaux des différentes batteries issues d'une même famille.

Au regard de la bibliographie disponible, les impacts environnementaux de la fabrication de la batterie peuvent varier suivant la chimie ou les procédés de fabrication utilisés. En effet, l'étude « Review of Battery Life-Cycle Analysis: State of Knowledge and Critical Needs » parue en 2010 par le laboratoire américain Argonne montre que la demande énergétique pour les phases de mise à disposition des matériaux et de fabrication d'une batterie Li-Ion va de 125,3 MJ/kg (Ishihara et al.) à 224 MJ/kg (Rydh and Sanden 2005) (de 96 à 144 MJ/kg juste pour la fabrication).

Ainsi, il semble évident que la qualité des informations sur les émissions et consommations lors de la phase de fabrication des batteries sera un point clé.

Un autre point important, discuté au cours des réunions de sous-comité, est la confidentialité des données. Afin d'assurer la confidentialité des données des fabricants de batteries, il convient d'agréger les données entre elles et de vérifier que ces mêmes données ne sont pas accessibles à partir des résultats par retro-ingénierie. L'étude « LCA of NiMH and Li-Ion Battery Electric Vehicles » réalisé par le NTNU propose une décomposition intéressante de la batterie :

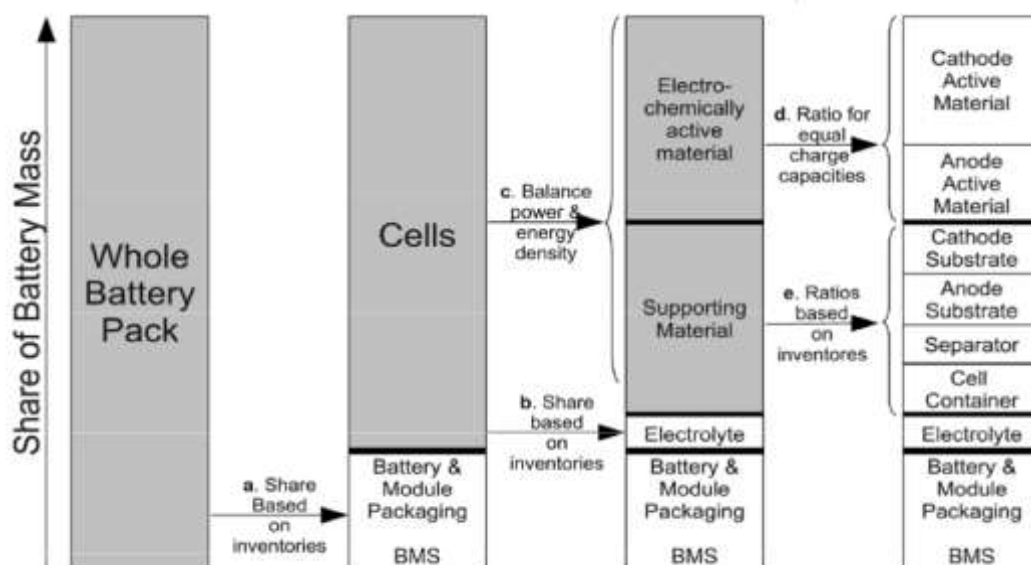


Figure 8-1 Exemple de décomposition d'une batterie

Durant la présentation de la bibliographie des batteries au cours de la réunion de sous-comité « Véhicules et composants », un des membres fit la remarque que les résultats préliminaires de l'étude « LCA of NiMH and Li-Ion battery » n'étaient pas pertinents. En effet le nombre de cycles de recharge de la batterie Li-Ion était clairement surestimé (et donc sa durée de vie par la même occasion).

Il est important de rappeler que l'étude bibliographique offre une bonne approche globale du problème, mais les résultats ou données disponibles ne doivent pas être utilisés sans l'aval des membres du comité technique.

Thema/Name	Year	Source / author	chemistry	battery manufacturing process	energy efficiency	energy density	cycles
Confidential	2012	Confidential					
LCA of NiMH and Li-Ion	2010	NTNU	NiMH, NCM, Li-Ion (LFP)	27 MJ electricity and 27 MJ heat for Li-Ion, 31 MJ electricity and 29 MJ heat for NiMH	80% (NiMH) 90% (Li-Ion) with a 80% depth of discharge	From 55 Wh/kg (NiMH) to 112 Wh/kg (NCM)	3000 cycles (NiMH & NCM) and 6000 cycles (LFP)
LCA of Nickel Metal Hydride Batteries for HEV Application	2009	Oko-Institut (from Umico)					
LCA of NiMH and Li-Ion	2010	NTNU					
Confidential	2010	Confidential					
MIC Trouble with lithium	2007	Meridian Int. Research					
Subat - Project		Avere					
A Review of Battery Life-Cycle Analysis: State of Knowledge and Critical Needs	2010	Argonne	PbA, NiCd, NiMH, Li-Ion	74-139 MJ/kg (NiMH), 96-144 MJ/kg (Li-Ion)	from 70 to 95%		
Li-Ion batteries : examining material demand and recycling issues	2009?	Argonne	Li-Ion : NCA-G, LFP-G, LMO-TiO, LMO-G				

Tableau 8-3 Etudes les plus pertinentes relatives aux batteries

Le tableau ci-après montre les différentes études concernant les batteries des VE, avec leurs différentes valeurs clés : chimie des batteries, fabrication, rendement énergétique, densité, nombre de cycles de recharge. L'étude NTNU montre la pertinence de ces différents critères au travers d'une étude de sensibilité.

FU : charge and discharge 50 MJ	NCM	LFP	NiMH
Control values (kg eq CO2)	1,9	1,4	3,5
- 5% efficiency	16%	29%	9%
+ 5% efficiency	-21%	-21%	-9%
- 25% density	5%	7%	11%
+ 25% density	-5%	0%	-9%
- 33% lifetime	26%	29%	31%
+ 33% lifetime	-16%	-7%	-14%
- 33% manufacture energy	-5%	0%	-6%
+ 33% manufacture energy	5%	7%	9%

Tableau 8-4 Etude de sensibilité pour les batteries des VE du NTNU

Points clé :

- ✓ Chimie des batteries et compositions,
- ✓ Flux intrants et sortants de la fabrication des batteries,
- ✓ Assurer la confidentialité des données des fabricants de batteries,
- ✓ Durée de vie (nombre de cycles de charge) et densité énergétique.

8.1.4 Carburants

Il s'agit ici de 2 points :

- ✓ Les carburants dits classiques (Essence et Diesel).
- ✓ L'électricité,

Pour les carburants dits classiques, les hypothèses utilisées pour l'ACV des biocarburants de première génération peuvent être utilisées pour modéliser le VT.

Une étude réalisée par le JEC, collaboration entre le Joint Research Centre de la commission Européenne, le Concawe et Eucar, met en avant la multitude de produits dérivés du pétrole et donne des clés d'allocation pour obtenir l'impact environnemental du carburant.

Afin de modéliser la filière carburant, les valeurs du JEC pourront être comparées avec les valeurs utilisées dans la modélisation des données GaBi.

Points clé :

- ✓ Données de raffinerie et allocations.

8.1.5 Electricité

Dans la plupart des ACV disponibles sur le VE, plusieurs bouquets énergétiques sont pris en compte, soit en tant que scénario alternatif, soit dans le cadre d'une analyse de sensibilité.

Par exemple pour l'étude « Electric vehicle and plug-in hybrid energy efficiency and life cycle emissions » réalisée par l'Ifeu, les bouquets considérés sont :

- ✓ Bouquet allemand moyen,
- ✓ Vieille centrale thermique à charbon,
- ✓ Centrale thermique à charbon moderne,
- ✓ Energie renouvelable (énergie éolienne).

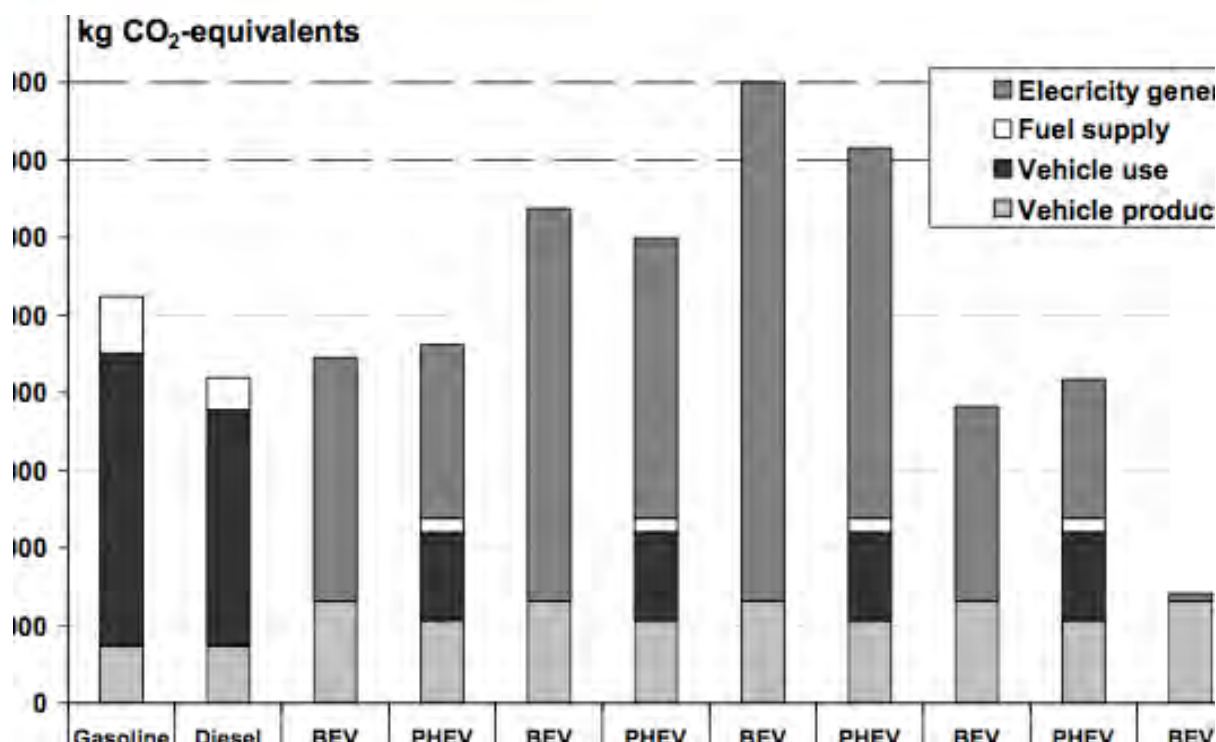


Figure 8-2 Emissions GES du cycle de vie d'un véhicule compact avec différents groupes motopropulseurs (120 000 km, 70% route de ville)

Sur le graphique ci-dessus, la pertinence du choix du bouquet est frappante. En effet les émissions de gaz à effet de serre varient de 7t CO₂ eq (pour le bouquet d'énergie renouvelable) à 40t CO₂ eq (pour l'ancienne centrale thermique à charbon). Ainsi le bouquet énergétique utilisé dans la phase d'usage pour effectuer la recharge de la batterie du véhicule s'avère être un point critique.

Il a été décidé au sein du comité technique de concentrer l'étude sur 5 pays, représentant les plus grandes flottes européennes :

- ✓ Allemagne.
- ✓ Italie.
- ✓ France.
- ✓ Royaume-Uni.
- ✓ Espagne,

Car Fleet by Country (in units and % share) | 2008

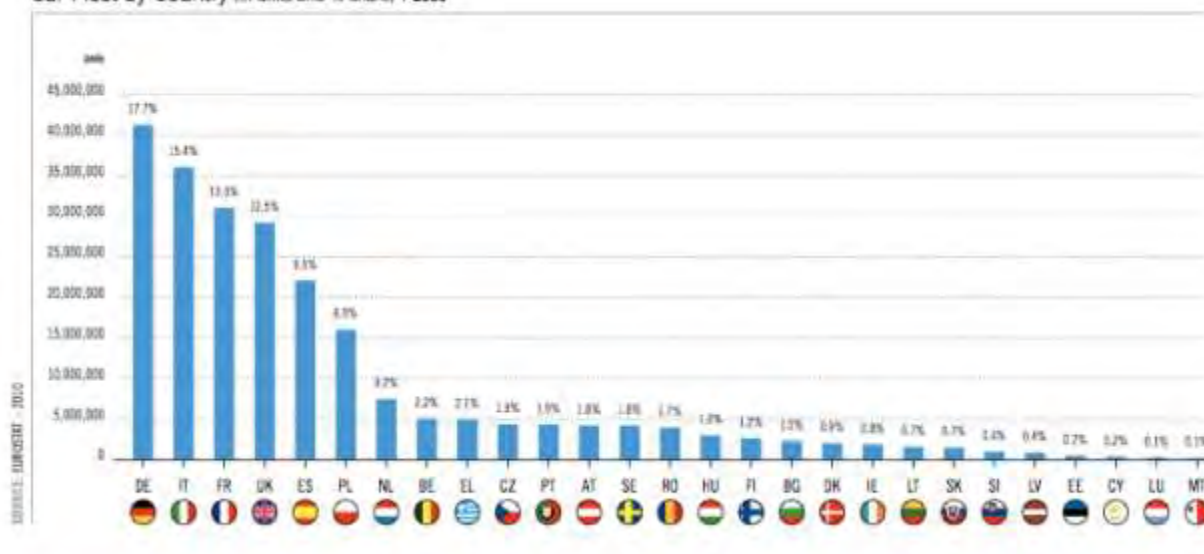


Figure 8-3 Répartition des véhicules en Europe

La composition des bouquets énergétiques de ces 5 pays sont disponibles dans la sphère publique, et les données nécessaires à la modélisation de ces bouquets sont disponibles dans GaBi (pour 1 kWh obtenu à partir de charbon, pétrole, gaz, nucléaire, éolien...).

De plus, il serait intéressant d'étudier l'évolution de l'impact environnemental du VE en fonction de mix dits « horaires », par exemple le bouquet de nuit, permettrait de simuler la charge nocturne du véhicule.

Le rapport "le contenu en CO2 du kWh électrique" réalisé par RTE et l'ADEME, montre 2 méthodes permettant de déterminer 1g de CO2/kWh spécifique :

- ✓ Méthode des contenus saisonnalisés par usages : cette méthode repose sur une méthodologie explicite, qui distingue deux régimes de fonctionnement du système de production d'électricité : un régime dit « saisonnalisé », reflet de l'adaptation du système électrique aux variations de consommations de chauffage et d'éclairage, avec un contenu en carbone élevé. Un régime fixe avec un contenu en carbone faible (chauffage = 180 gCO2/kWh, éclairage = 100 gCO2/kWh, usage intermittent = 60 gCO2/kWh, usage en base = 40 gCO2/kWh),
- ✓ Méthode du contenu marginal. Elle repose sur le principe suivant : chaque incrément de consommation entraîne la sollicitation supplémentaire de moyen de production marginal. Elle affecte donc à cet incrément les émissions générées par ce surcroît de production selon la règle du « merit order » c'est-à-dire d'optimisation du mix de production par empilement successif selon un coût de production croissant. Les échanges d'électricité entre pays étant considérés totalement fluides, notamment sur la plaque continentale européenne, les chiffres qui en ressortent tiennent compte de la composition du parc de production européen. Aujourd'hui 25% de la consommation énergétique « marginale » est satisfait par le nucléaire (nuit

et weekend principalement), 75% l'est par des centrales thermique (entre 400 et 1000 gCO₂/kWh).

Au delà du bouquet énergétique, il est important de se concentrer sur l'évolution du(des) bouquet(s) à l'horizon 2020. La directive européenne sur les énergies renouvelables nous guidera à établir ces scénarios.

Tableau 8-5 Etudes les plus pertinentes relatives aux bouquets énergétiques

Thema/Name	Year	Source / author
Foresight of electric transports in France in 2020 (EN)	2010?	Ademe (Eric Vidalenc)
Ademe Journal : Electric in France	Juil.2009	Ademe (Morchoine/Vidalenc)
JEC Biofuels Program (EN)	2010	JRC- Eucar (from Michael)
Gaz Petrole et mineraux (Fr)	2008	Le Monde (from HT)
Scope-dependent modelling of electricity supply in life cycle assessments	2010	Frischknecht
CO ₂ emissions from nuclear electricity	2011	CEA (from AREVA)
Global chance - du gâchis à l'intelligence - le bon usage de l'électricité	2010	Association Negawatt
Global chance - les transports face aux défis de l'énergie	2009	
Les véhicules électriques en perspective Analyse coûts-et avantages et demande potentielle	2011	
Contenu en CO ₂ du kwh électrique	2007	ADEME - RTE
GHG from solar and nuclear energy	2006	Fthenaki - Kim
Bilan Carbone - Guide des facteurs d'émmissions v5.0	2007	Ademe
Perspectives ENR 2010 et 2020	2011	Syndicat des energies renouvelables
Mix électrique gagnant pour 2020		Ademe

Points clé:

- ✓ Qualité des données des sources électriques,
- ✓ Bouquets européens et nationaux,
- ✓ Bouquets à l'horizon 2020,
- ✓ Mix horaires (de nuit).

8.1.6 Cycle d'usage et de recharge

La majeure partie des études ACV de véhicules utilise le cycle normalisé NEDC (New European Driving Cycle) pour caractériser les émissions et consommations en phase d'usage selon une certaine typologie de conducteur. Cependant, il existe d'autres cycles (cycles réels de l'IFSTTAR par exemple). L'étude « electric vehicle and plug-in hybrid energy efficiency and life cycle emissions » réalisée par l'Ifeu, préconise 3 types d'usage du véhicule :

- ✓ Urbain,

- ✓ Extra-urbain,
- ✓ Autoroute.

Pour chacune de ces typologies, l'énergie (ou les consommations) nécessaire est différente. L'étude "Influence du cycle de conduite sur les émissions unitaires de polluants des voitures particulières » présente différents cycles d'usage :

- ✓ INRETS : 10 cycles correspondant à 4 utilisations du véhicule:
 - Urbain lent : 2 cycles de 4 à 7 km/h représentent 1% du kilométrage,
 - Urbain fluide : 3 cycles de 10 à 24 km/h représentent 16% du kilométrage,
 - Route : 3 cycles de 32 à 57 km/h représentent 42% du kilométrage,
 - Autoroute : 2 cycles de 74 à 95 km/h représentent 41% du kilométrage.
- ✓ Modem : 14 cycles représentent la diversité des conditions urbaines européennes. Chaque cycle est pondéré par son kilométrage moyen (de 130 m à 11,3 km). La vitesse moyenne varie de 6 à 33 km/h,
- ✓ Modem Hyzem : Amélioration de la méthode Modem avec plus de véhicules étudiés,
- ✓ Standards : NEDC pour l'Europe et EPA pour les USA (FTP72, FTP 75, Highway).

Le plan national pour le véhicule électrique et hybride rechargeable, commandité par le ministère de l'environnement, donne également des informations pertinentes sur :

- ✓ Les utilisations possibles du VE,
- ✓ Les modes de charge.

Il existe 3 modes de charge envisagés :

- ✓ Recharge standard (notamment de nuit) permettant de satisfaire la grande majorité des besoins. Puissance de 3 à 6 kVA pour une recharge comprise entre 4 et 8 heures,
- ✓ Recharge rapide pour des besoins spécifiques. Puissance de 24 kVA pour une recharge d'environ 20 minutes. La puissance pourrait être portée à 43 kVA,
- ✓ L'échange de batterie : durée prévisible de 5 minutes. Il est possible d'atteler derrière le véhicule une remorque tender portant des batteries rechargées pour les longs trajets.

Tableau 8-6 Etudes les plus pertinentes relatives aux cycles d'usage et de recharge

Thema/Name	Year	Source / author
Les véhicules électriques en perspective -analyse des coûts et avantages	2011	SEEIDD et SGDD (from GDF Suez)
CONSOVEx - Methodologie de choix des cycles de conduite		IFP - Zaccardi
CAS Nouvelles Mobilites Annexes	2010	CAS Centre d'Analyse Strategique
CAS Nouvelles Mobilites Rapport	2010	CAS Centre d'Analyse Strategique
Livre vert sur les infrastructures de recharge ouvertes au public pour les vehicules "decarbones"	2011	
Le point sur- evaluation prospective des VE	2011	CGDD
Influence du cycle de conduite sur les émissions unitaires de polluants des voitures particulières	1999	INRETS (IFSTTAR)

Points clé:

- ✓ Consommations et émissions des différents cycles choisis (normalisés ou pas),
- ✓ Définition des modes de charge.

8.1.7 Recyclage

Dans les études ACV réalisées pour le secteur automobile, la méthode la plus utilisée pour caractériser les impacts en fin de vie est la méthode des impacts évités. Ainsi les bénéfices liés au recyclage des matières composants le véhicule sont exprimés en crédits. D'une manière générale, définir les impacts en fin de vie d'un véhicule thermique ne constitue pas une difficulté, d'autant que ces impacts sont très nettement inférieurs à ceux de la fabrication et surtout de la phase d'usage du véhicule. Dès lors, les hypothèses de cette phase du cycle de vie ne sont que rarement sensibles.

Cependant, très peu d'études renseignent les impacts environnementaux de la fin de vie des batteries. L'étude « LCA of 5 batteries for EV under different charging régime », Michail Rantik, Chalmers, donnent des valeurs de consommations énergétiques lors de la fin de vie de différents types de batterie. Cependant cette étude en plus d'être vieillissante (1996) ne s'intéresse pas aux technologies Lithium Ion.

Une étude ACV réalisée par Umicore identifie les impacts des batteries en fin de vie, les données ne sont pas publiques, mais ils communiquent sur une diminution de 70 % des émissions de gaz à effet de serre pour le recyclage des batteries LiCoO₂.

Tableau 8-7 Etudes les plus pertinentes relatives au recyclage

Thema/Name	Year	Source / author
Study on Rare Earths and Their Recycling	2011	Oeko-insitut
Battery Waste Management Life Cycle Assessment		ERM
Recycling rechargeable lithium ion battery	2009	Envoc, Umicore
Life Cycle Assessment of Lightweight and End-of-Life Scenarios for Generic Compact Class Passenger Vehicles	2004	LIRECARE

Points clé:

- ✓ Pourcentage de matières recyclables,
- ✓ Chaîne de recyclage,
- ✓ émissions et consommations du recyclage des batteries (Umicore).

L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) est un établissement public sous la triple tutelle du ministère de l'Ecologie, du Développement durable, des Transports et du Logement, du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche et du ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie. Elle participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable.

Afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale, l'agence met à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, ses capacités d'expertise et de conseil. Elle aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

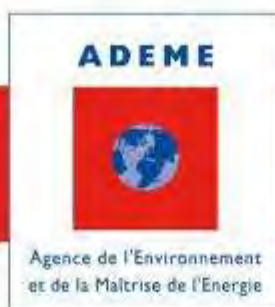


ABOUT ADEME

The French Environment and Energy Management Agency (ADEME) is a public agency under the joint authority of the Ministry for Ecology, Sustainable Development, Transport and Housing, the Ministry for Higher Education and Research, and the Ministry for Economy, Finance and Industry. The agency is active in the implementation of public policy in the areas of the environment, energy and sustainable development.

ADEME provides expertise and advisory services to businesses, local authorities and communities, government bodies and the public at large, to enable them to establish and consolidate their environmental action. As part of this work the agency helps finance projects, from research to implementation, in the areas of waste management, soil conservation, energy efficiency and renewable energy, air quality and noise abatement.

www.ademe.fr.



ADEME
20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

www.ademe.fr