



**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



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'Énergie

Résumé du rapport final

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.

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 « EU energy trends to 2030 » 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.

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.

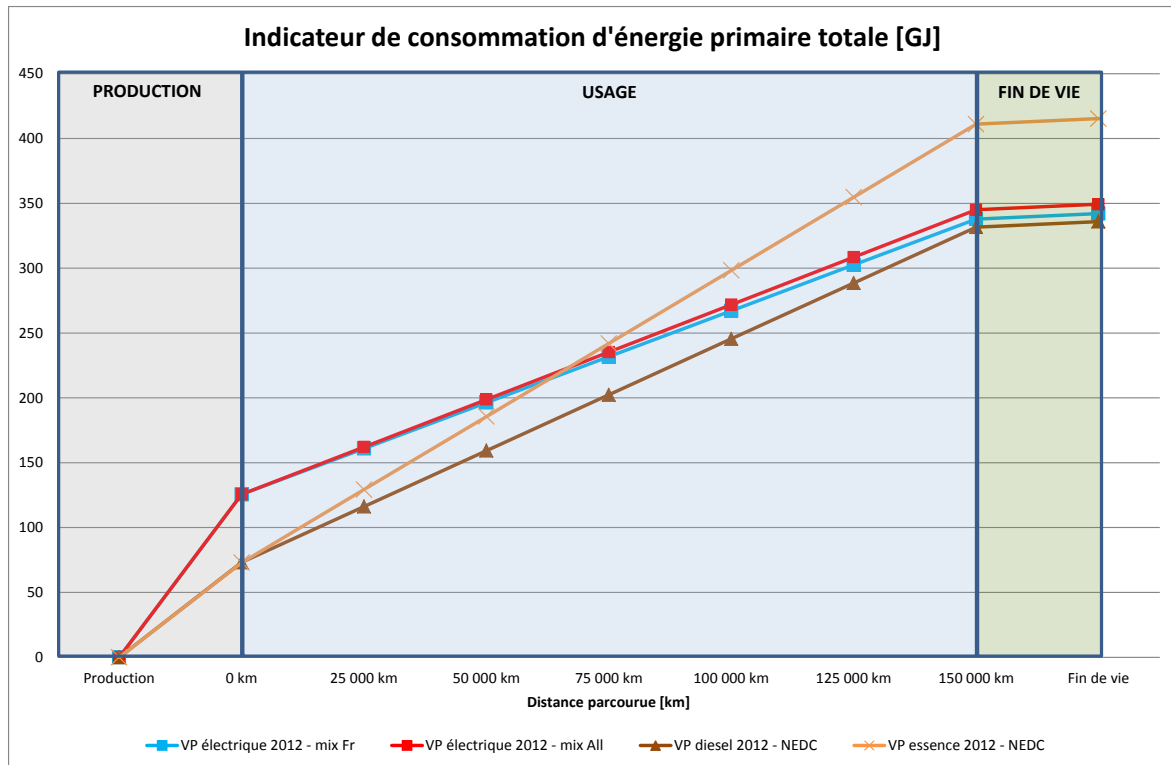


Figure 1-1 : Indicateur de la consommation d'énergie primaire totale pour les véhicules électriques français et allemand et les véhicules thermiques essence et diesel en 2012 selon le scénario de référence

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

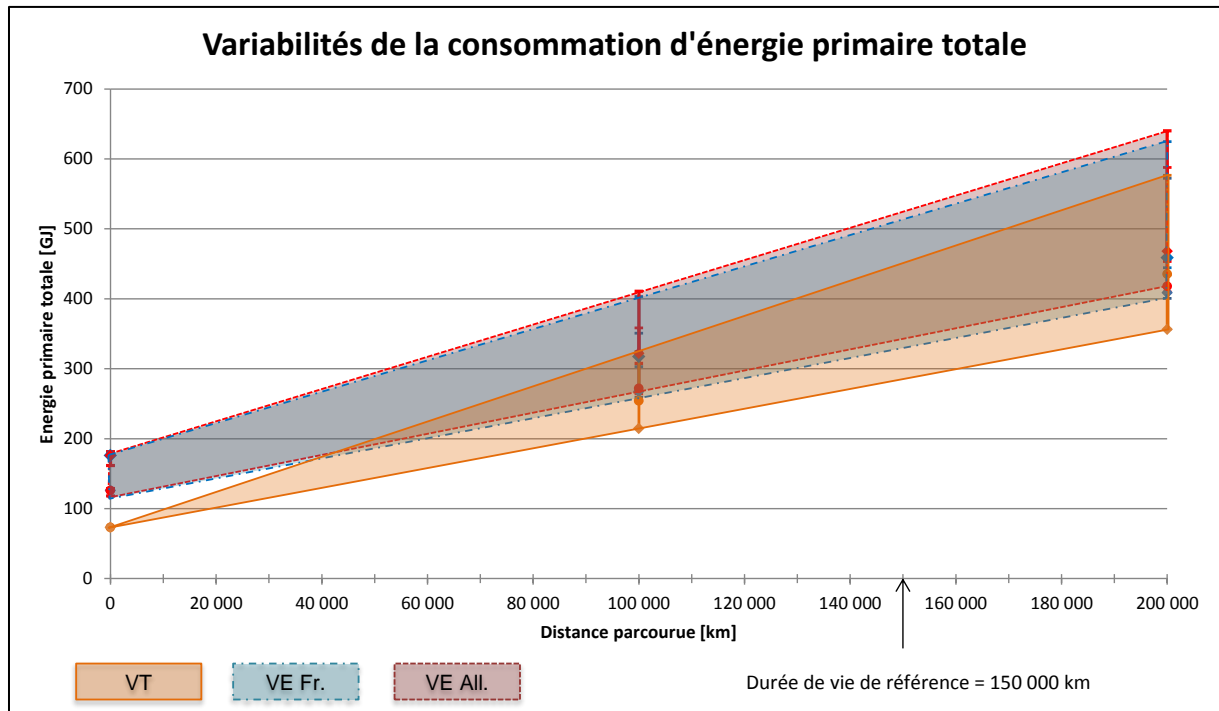


Figure 1-2 : Variabilités de la consommation d'énergie primaire totale pour les véhicules électriques français et allemand et les véhicules thermiques essence et diesel en 2012

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 soit 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

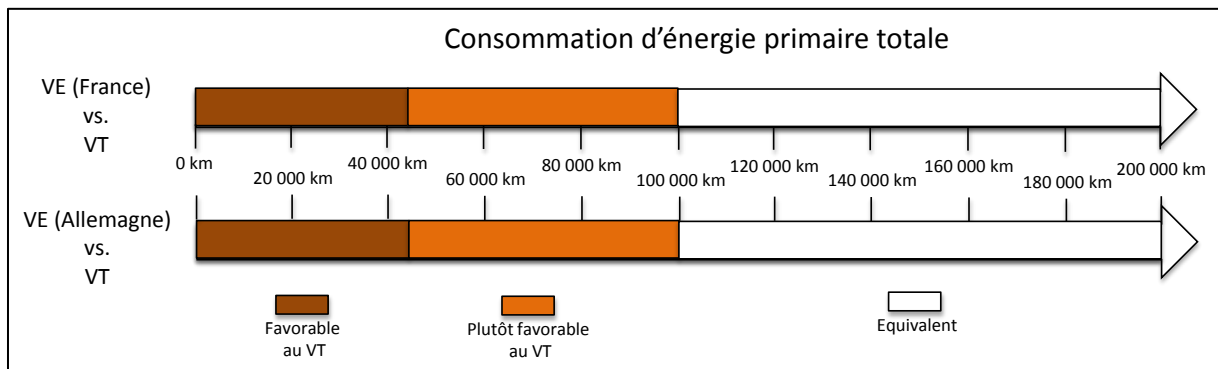


Figure 1-3 : Domaines de pertinence environnementale du véhicule électrique (France et Allemagne) comparés au véhicule thermique pour la consommation d'énergie primaire totale en 2012

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.

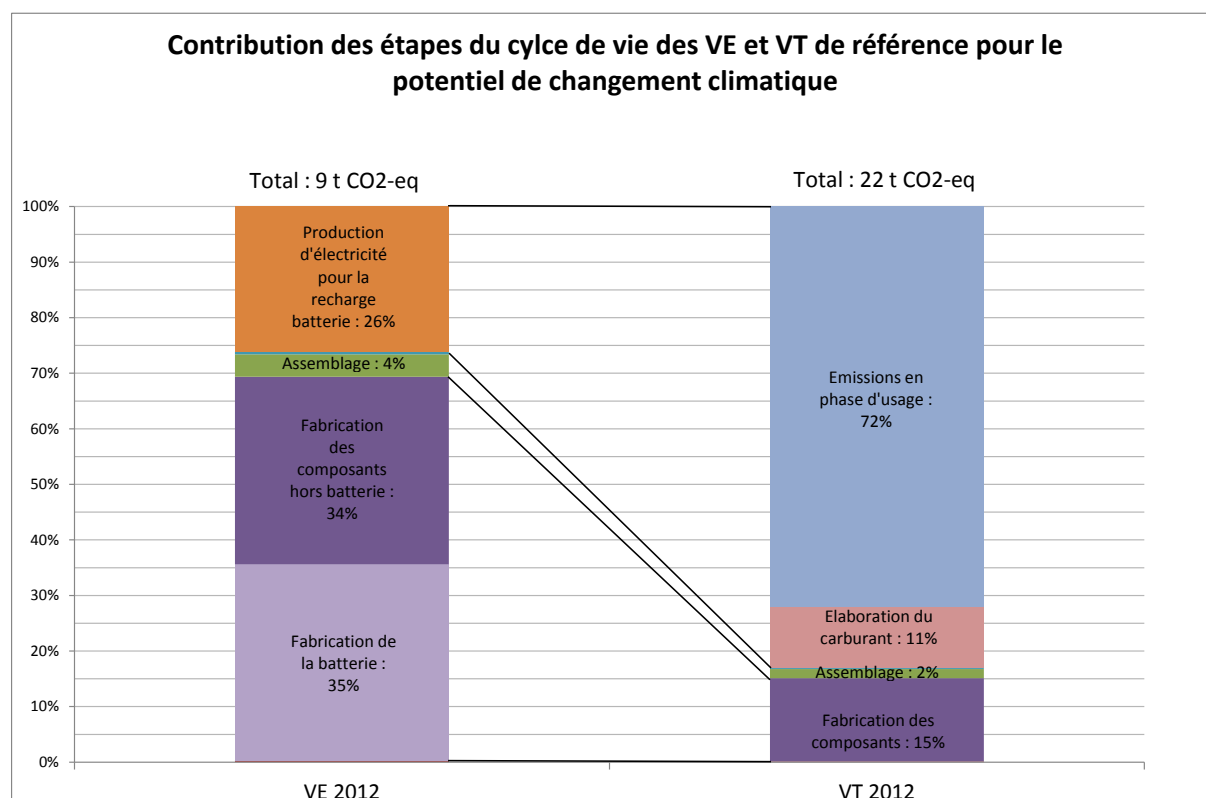


Figure 1-4 : Contributions au potentiel de changement climatique du Véhicule Electrique français et du Véhicule Thermique en 2012

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.

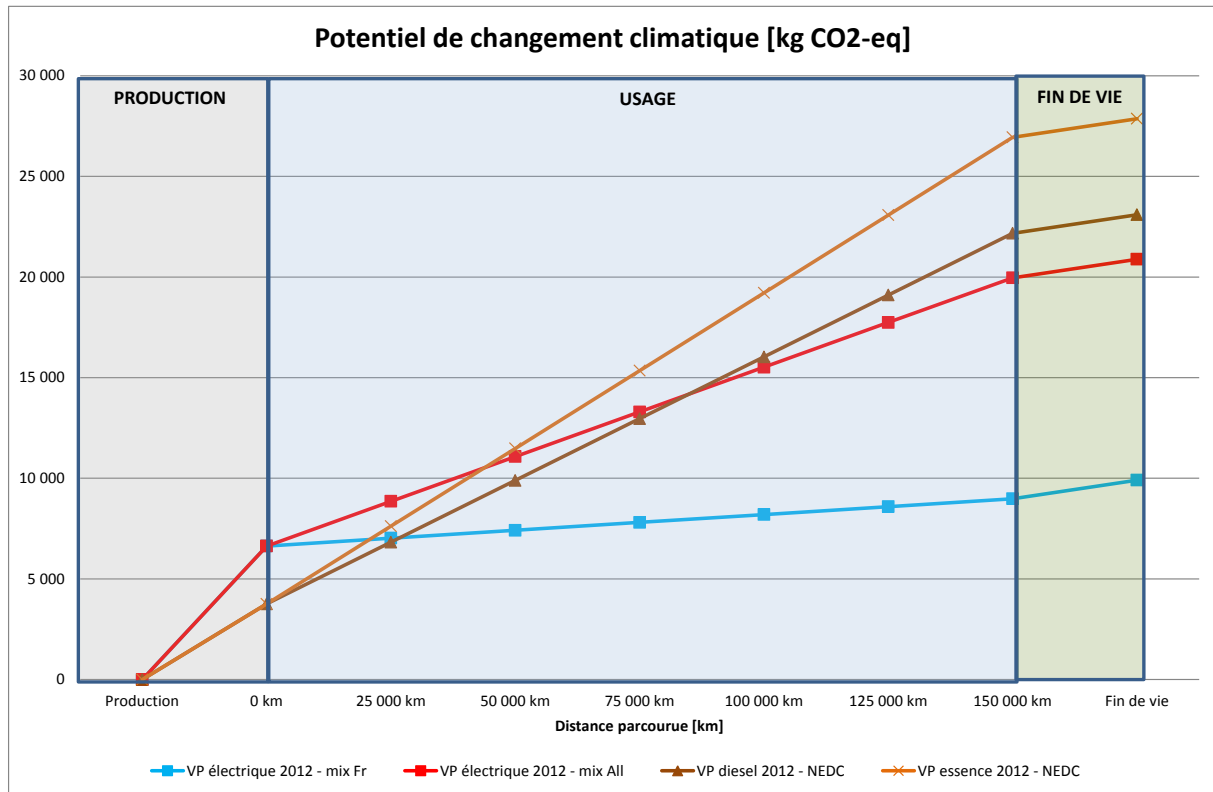


Figure 1-5 : Potentiel de changement climatique pour les véhicules électriques français et allemand et les véhicules thermiques essence et diesel en 2012 selon le scénario de référence

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

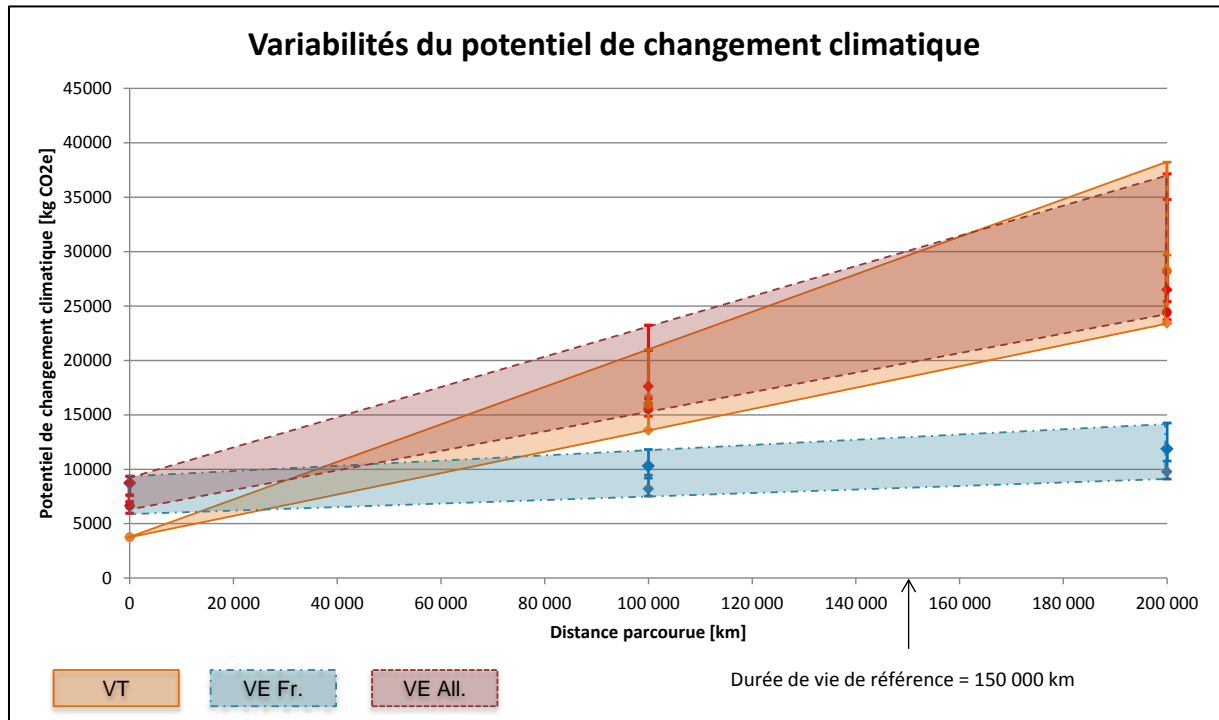


Figure 1-6 : Variabilités du potentiel de changement climatique pour les véhicules électriques français et allemand et les véhicules thermiques essence et diesel en 2012

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.

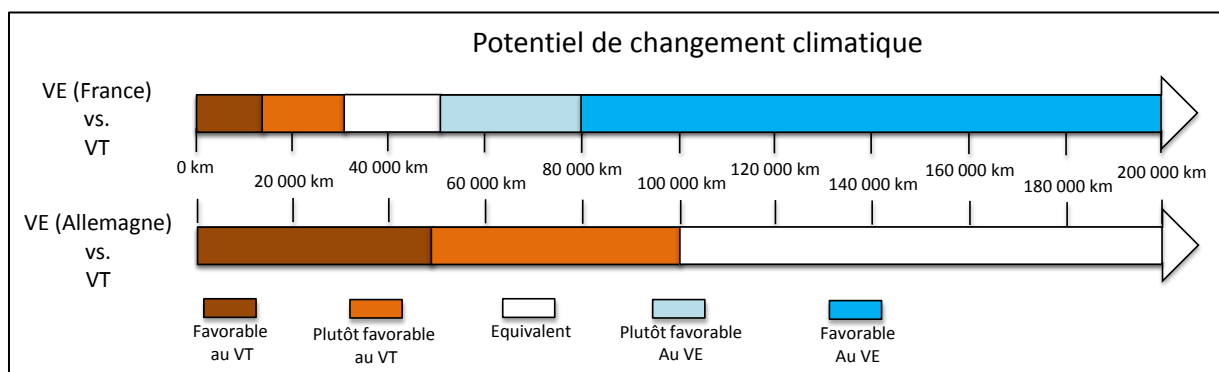


Figure 1-7 : Domaines de pertinence environnementale du véhicule électrique (France et Allemagne) comparés au véhicule thermique pour le potentiel de changement climatique en 2012

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.

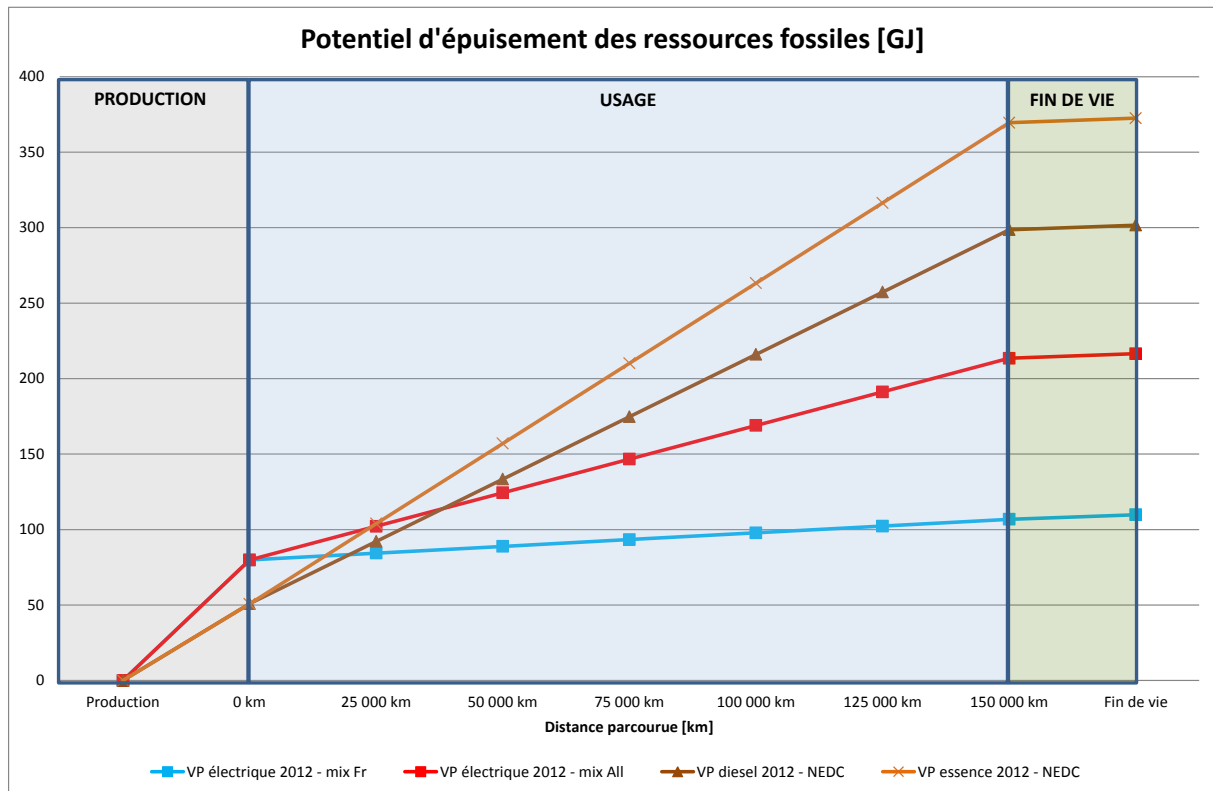


Figure 1-8 : Potentiel d'épuisement des ressources fossiles pour les véhicules électriques français et allemand et les véhicules thermiques essence et diesel en 2012 selon le scénario de référence

Analyse des variabilités

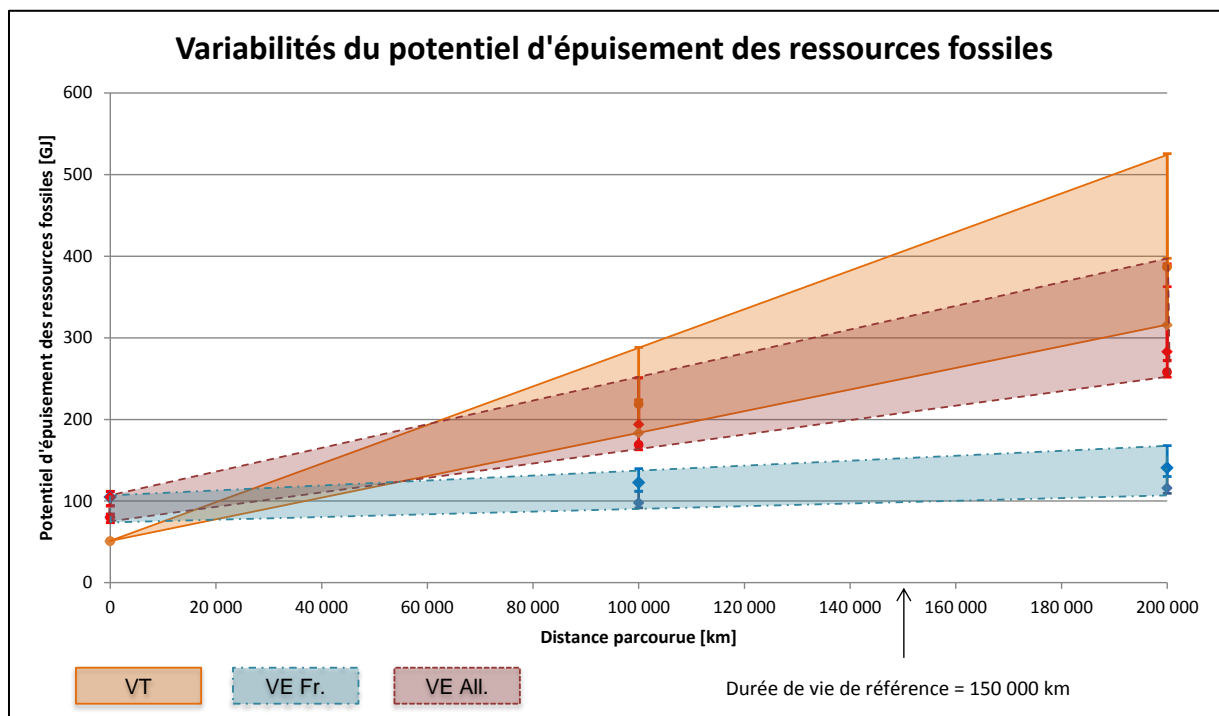


Figure 1-9 : Variabilités du potentiel d'épuisement des ressources fossiles pour les véhicules électriques français et allemand et les véhicules thermiques essence et diesel en 2012

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.

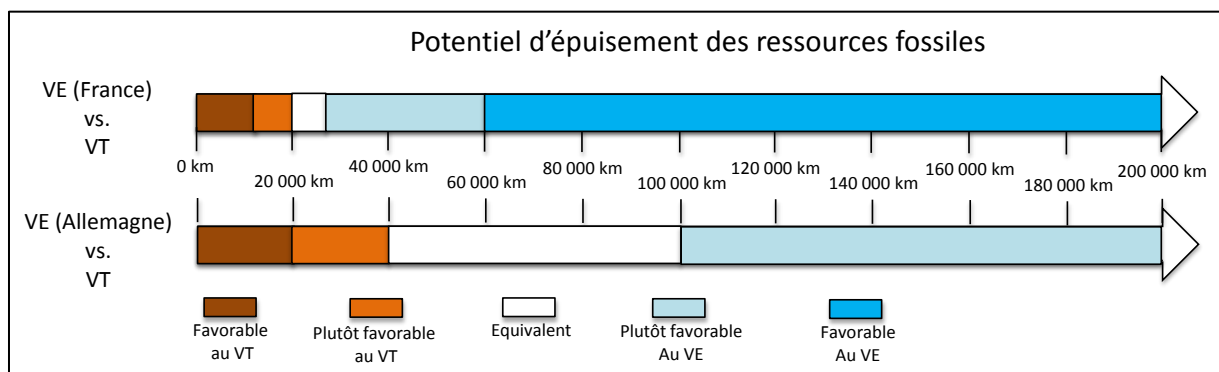


Figure 1-10 : Domaines de pertinence environnementale du véhicule électrique (France et Allemagne) comparés au véhicule thermique pour l'épuisement des ressources fossiles en 2012

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.

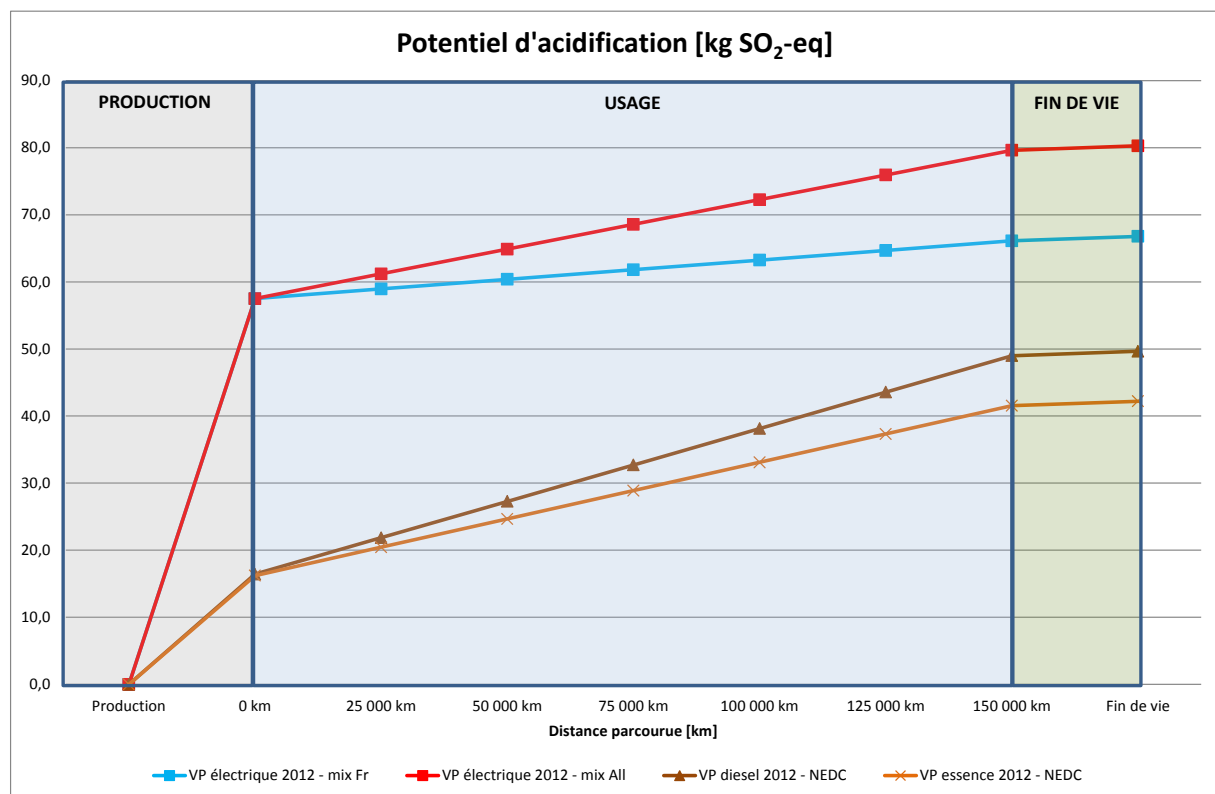


Figure 1-11 : Potentiel d'acidification pour les véhicules électriques français et allemand et les véhicules thermiques essence et diesel en 2012 selon le scénario de référence

Scénario de référence 2020

Cet indicateur est principalement affecté par les émissions de NOx et de SO2 lors de l'extraction du cobalt et du nickel utilisés pour les batteries. Le scénario utilisé à l'horizon 2020 montre une amélioration potentielle.

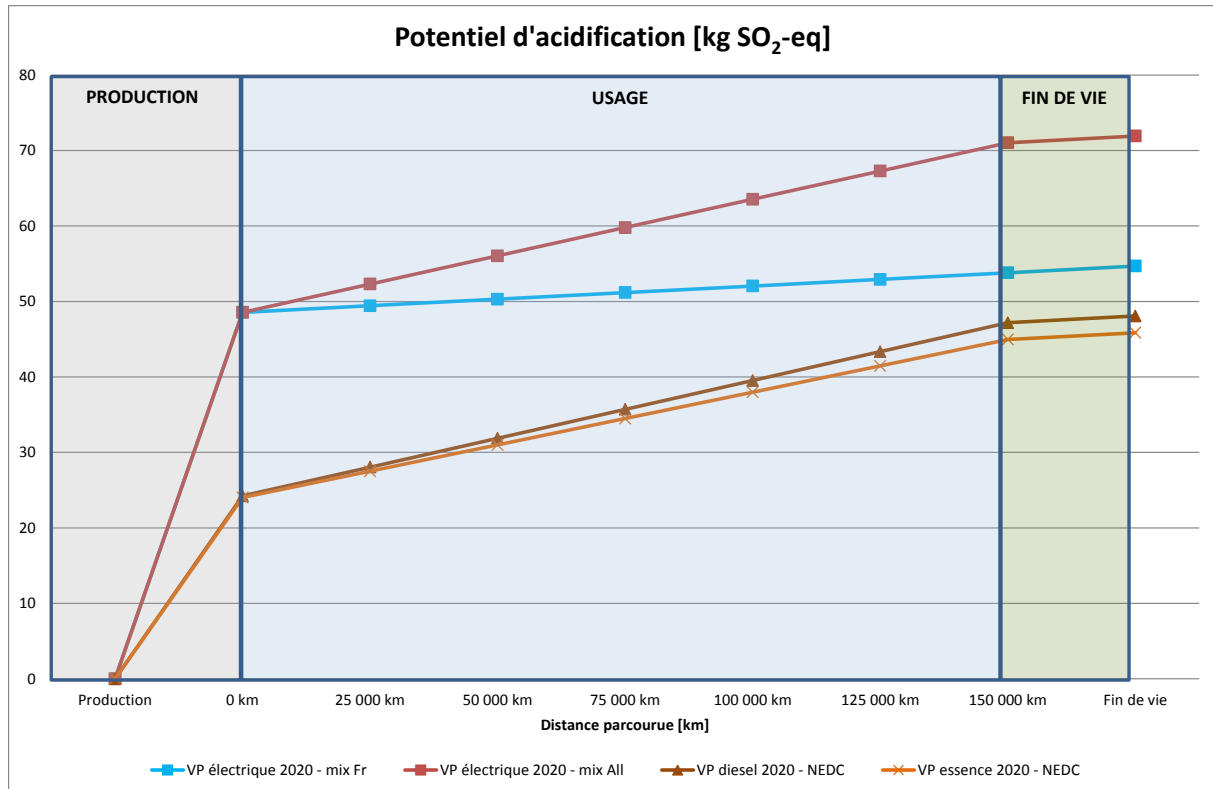


Figure 1-12 : Potentiel d'acidification pour les véhicules électriques français et allemand et les véhicules thermiques essence et diesel à l'horizon 2020 selon le scénario de référence

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.

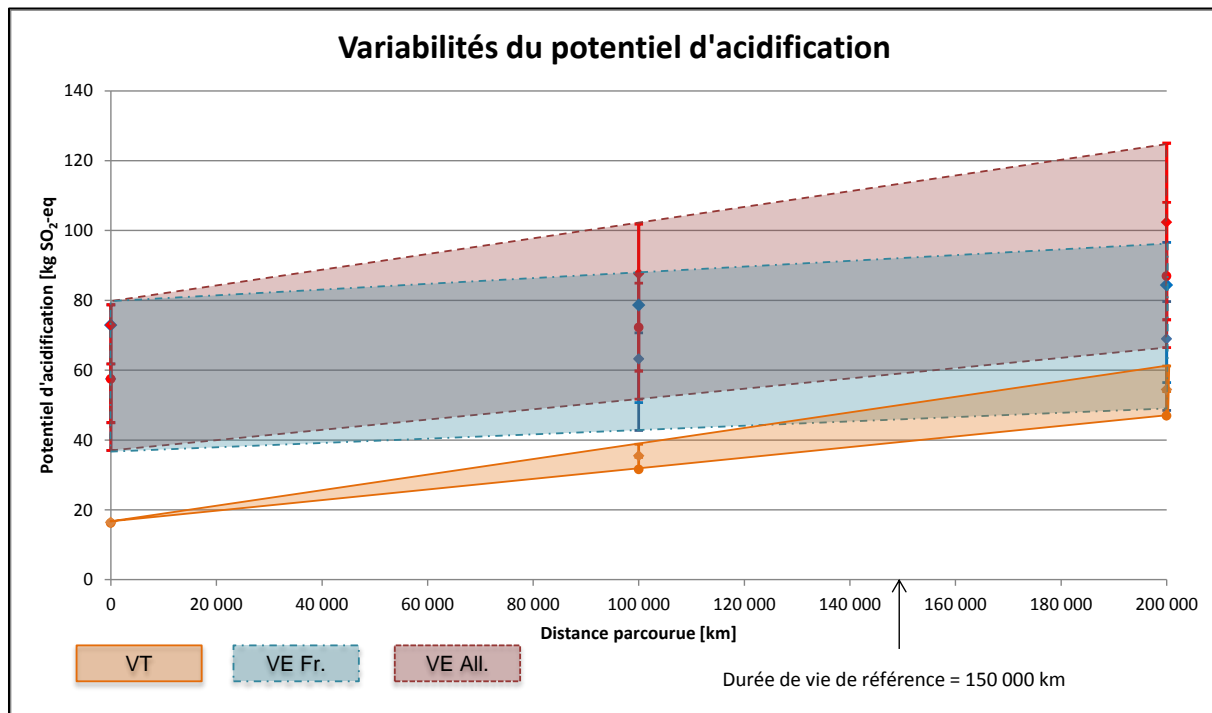


Figure 1-13 : Variabilités du potentiel d'acidification pour les véhicules électriques français et allemand et les véhicules thermiques essence et diesel en 2012

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.

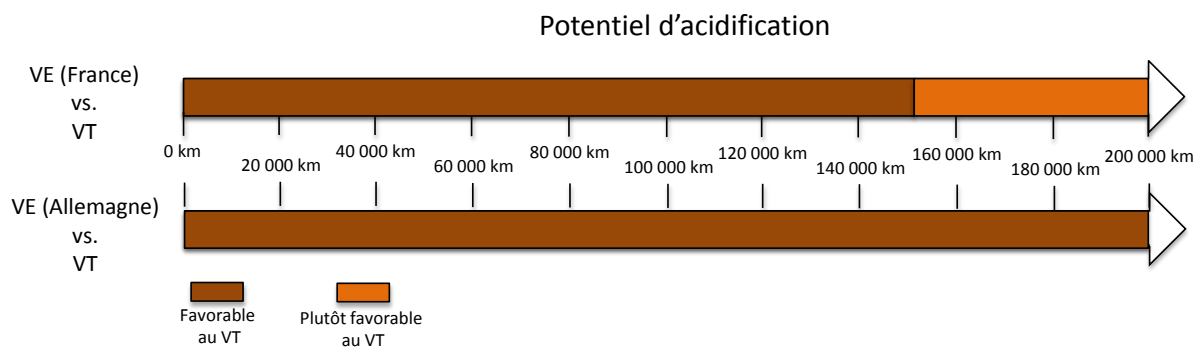


Figure 1-14 : Domaines de pertinence environnementale du véhicule électrique (France et Allemagne) comparés au véhicule thermique pour le potentiel d'acidification en 2012

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.

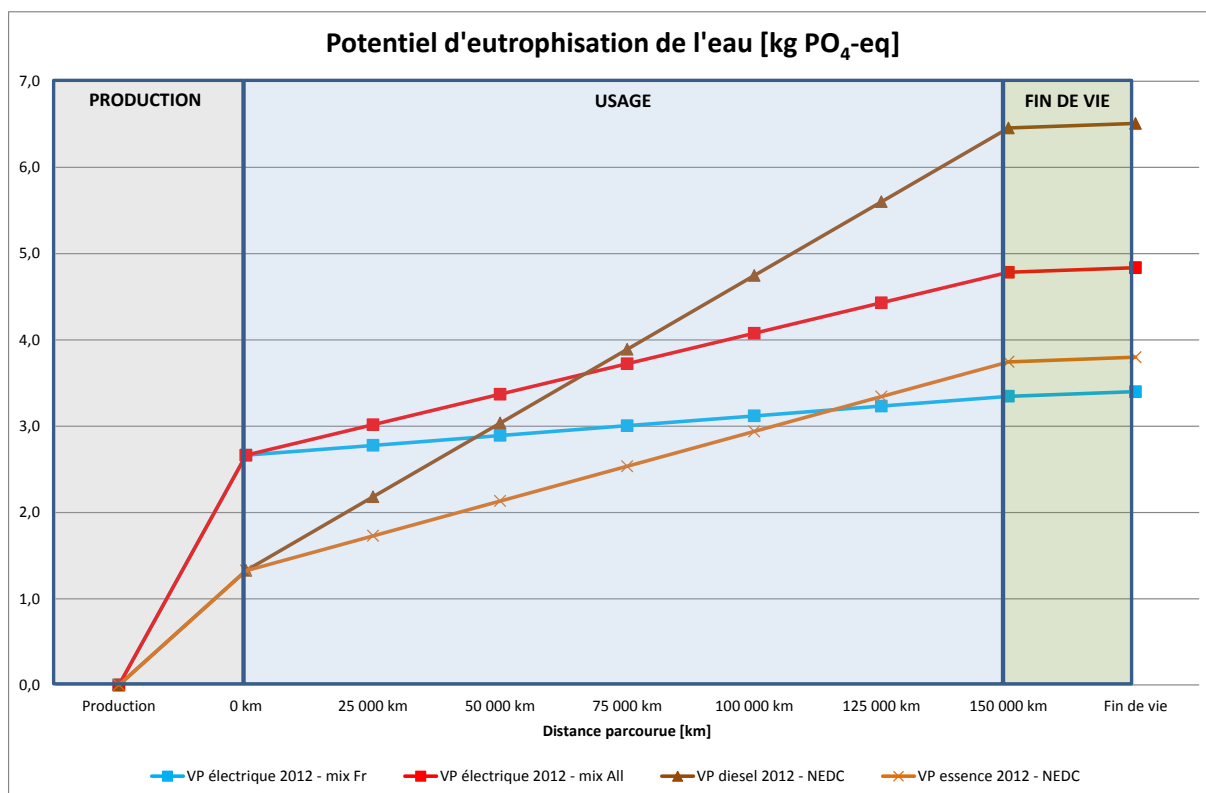


Figure 1-15 : Domaines de pertinence environnementale du véhicule électrique (France et Allemagne) comparés au véhicule thermique pour le potentiel d'eutrophisation en 2012

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.

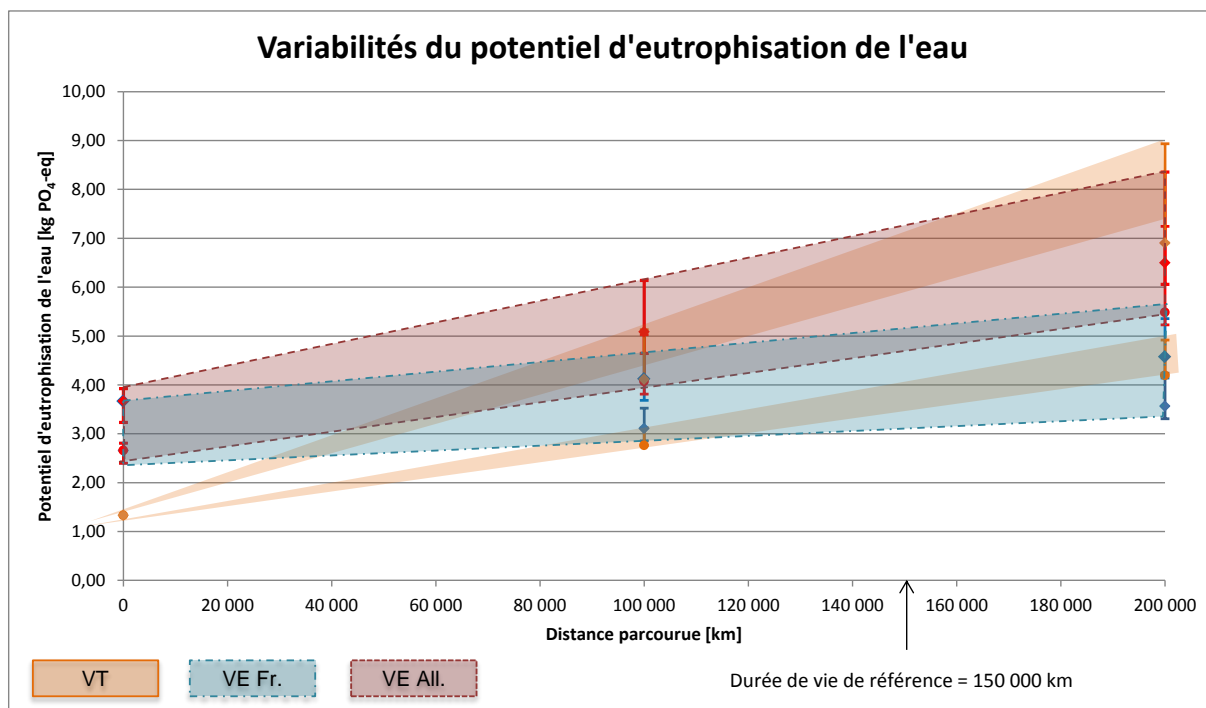


Figure 1-16 : Variabilités du potentiel d'eutrophisation pour les véhicules électriques français et allemand et les véhicules thermiques essence et diesel en 2012

Domaines de pertinence environnementale

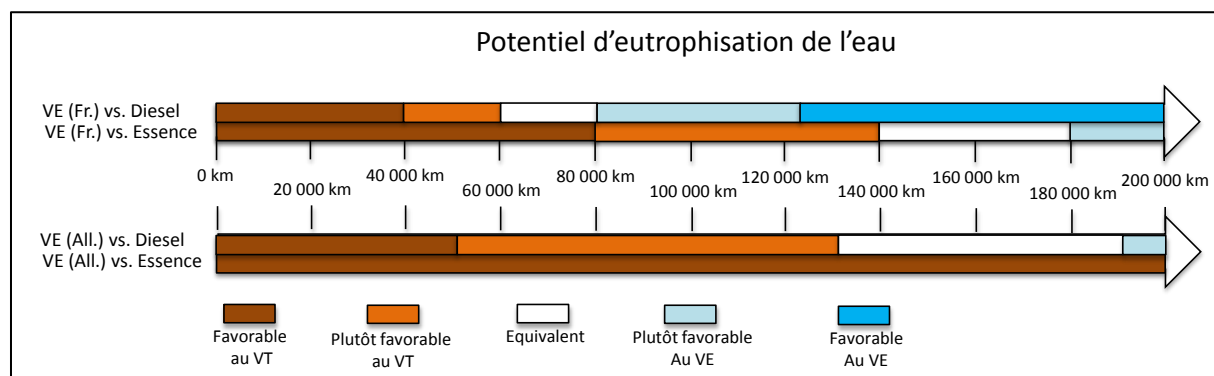


Figure 1-17 : Domaines de pertinence environnementale du véhicule électrique (France et Allemagne) comparés au véhicule thermique pour le potentiel d'eutrophisation de l'eau en 2012

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).

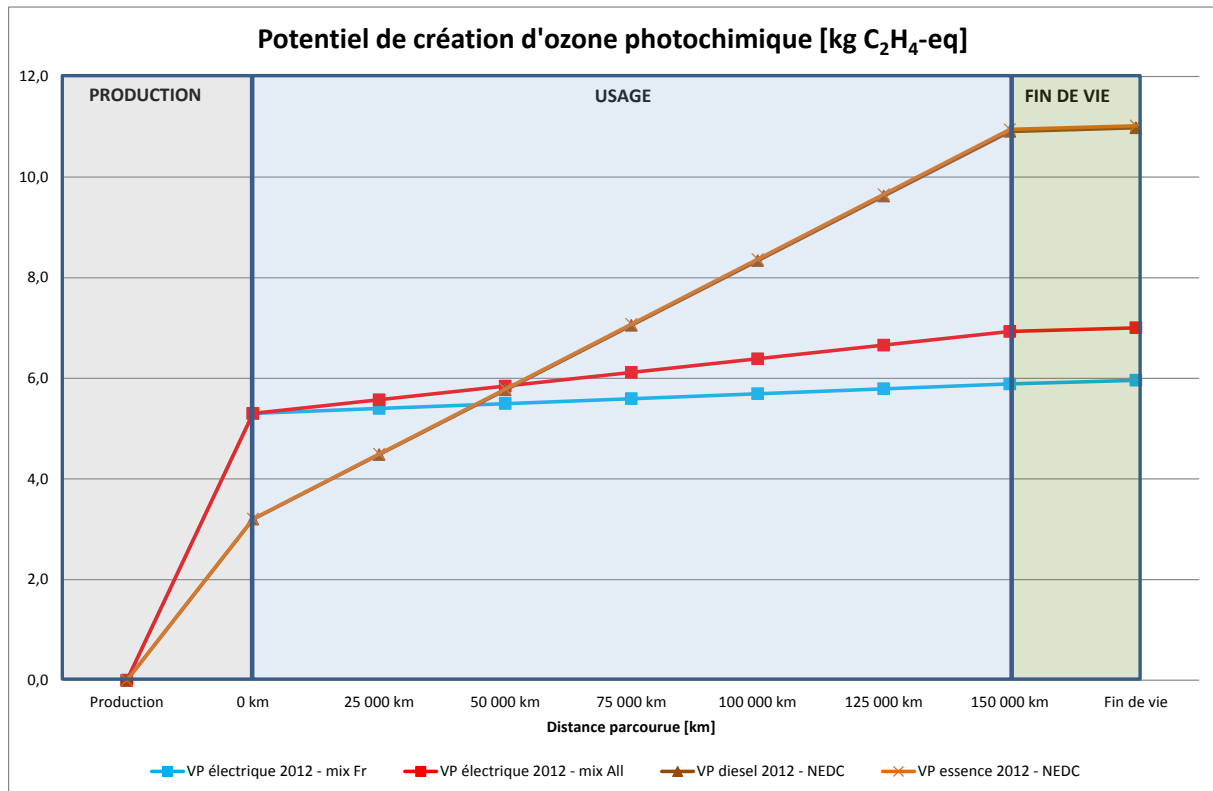


Figure 1-18 : Domaines de pertinence environnementale du véhicule électrique (France et Allemagne) comparés au véhicule thermique pour le potentiel d'eutrophisation en 2012

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.

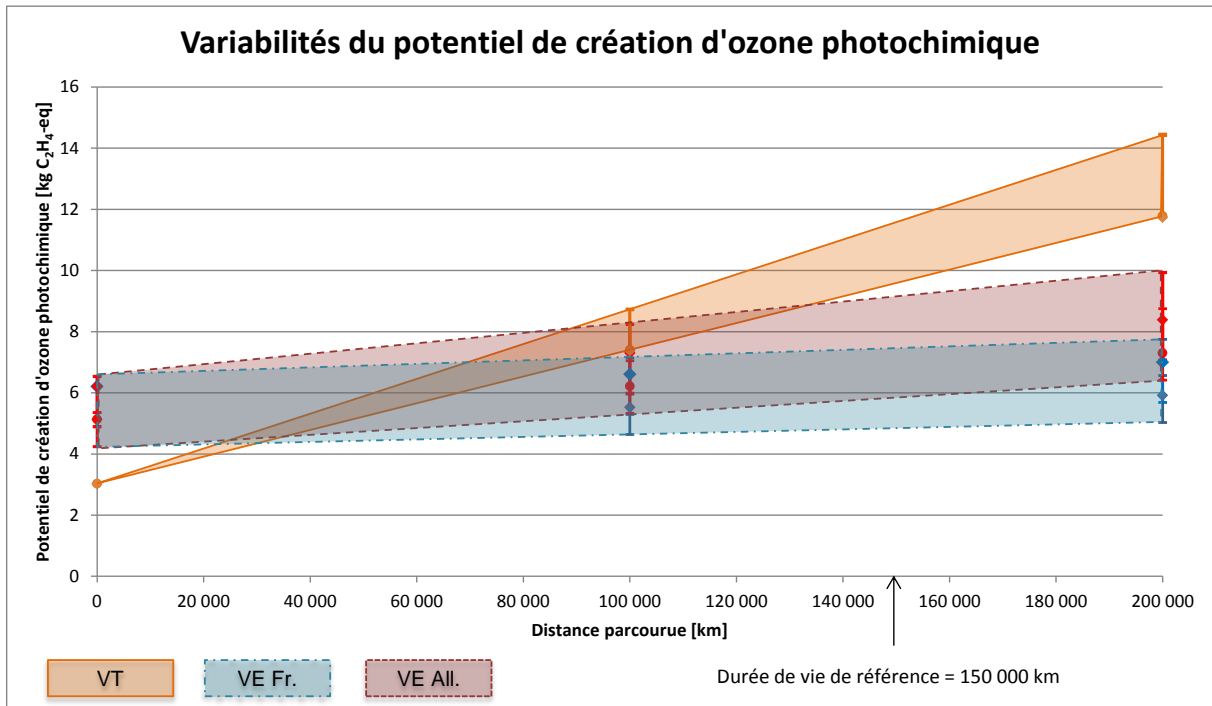


Figure 1-19 : Variabilités du potentiel de création d'ozone photochimique pour les véhicules électriques français et allemand et les véhicules thermiques essence et diesel en 2012

Domaines de pertinence environnementale

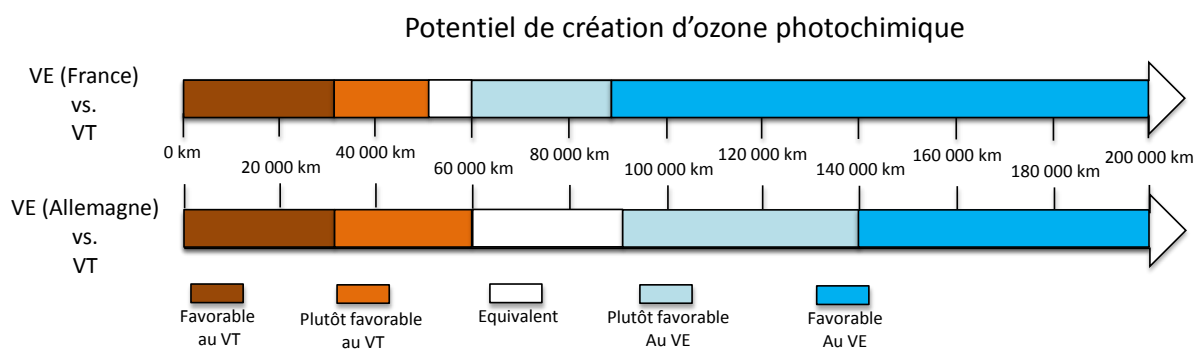


Figure 1-20 : Domaines de pertinence environnementale du véhicule électrique (France et Allemagne) comparés au véhicule thermique pour le potentiel de création d'ozone photochimique en 2012

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 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 VE à partir de 190 000 km vs essence	Plutôt favorable au VE à partir de 60 000 km

Figure 1-21 : 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, le paragraphe suivant 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.

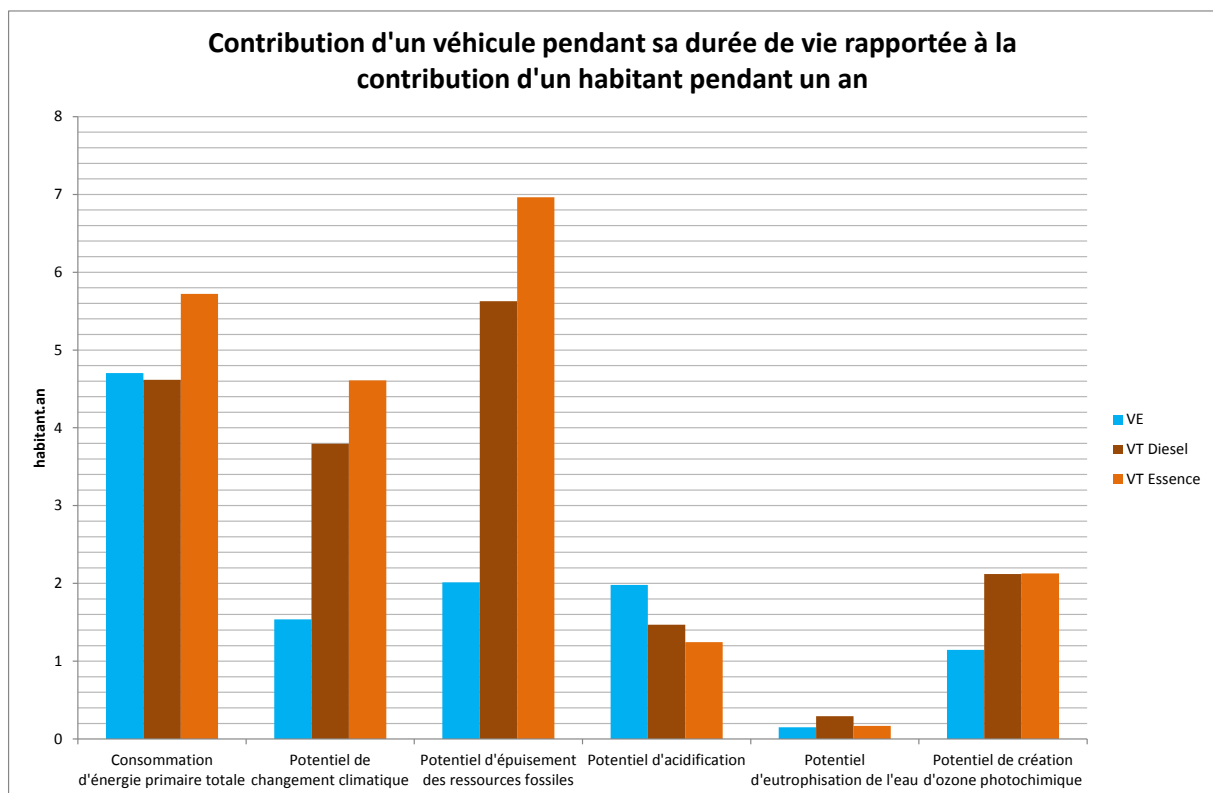


Figure 1-22 : Normation des six impacts potentiels retenus pour le VP en France en 2012

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 la Commission Européenne EU Energy Trends to 2030 (EC 2010)². 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 1-23 : Evolutions attendues à l'horizon 2020 pour les véhicules électrique, thermiques essence et diesel sur les six impacts potentiels retenus

² Les scénarios de base 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 Vert³, 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.

³ 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 :

- 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 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.
- 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.

En complément de la présente étude, il apparaît également souhaitable de consolider les travaux sur les infrastructures de recharge et les conditions d'usage réel du véhicule électrique.

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'environnement⁴

⁴ 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.

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.

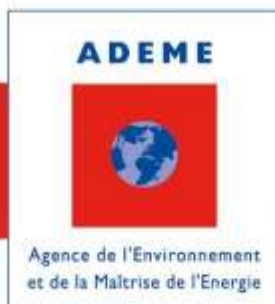


ABOUT ADEME

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