

Impact énergétique et climatique des véhicules électriques

Comparaison avec les véhicules thermiques, une étude « ouverte » de [Xavier Marichal](#) (SONTERRA sprl) et [Jean Snoeck](#) (XRGY Consulting)

1. Introduction

Bon nombre d'articles de presse récents vantent sans nuances les mérites de la voiture électrique. Dans ces études, deux biais peuvent être aisément observés : d'une part la relativement grande incertitude quant aux données quantitatives, liée à la difficulté de suivre les coûts énergétiques des très nombreuses étapes de transformation impliquées dans tout processus industriel, et d'autre part la manière dont chaque publication se focalise sur un aspect particulier du problème, et intègre souvent comme hypothèse des données tout aussi partielles d'autres articles sans forcément en conserver les autres hypothèses. Malgré cette double insuffisance, les différents auteurs tirent des conclusions tranchées.

Face à ce constat, seule une étude systémique exhaustive est de nature à produire des résultats factuels qui pourront être commentés objectivement et améliorés. C'est dans cet esprit que le présent document a été rédigé et qu'il attend les commentaires du lecteur.

L'analyse porte sur un large éventail de véhicules :

- Électriques tout d'abord, avec
 - D'une part les trois voitures électriques mises à l'essai dans le Tests-Achats n°625 de 2017, à savoir : Nissan Leaf, Opel Ampera et Renault Zoé ;
 - D'autre part trois modèles de Tesla, firme emblématique des véhicules électriques, à savoir : Tesla Model 3 50D, Tesla S 90D, Tesla X P100D
 - Ainsi que la Renault Twizy pour inclure un véhicule électrique léger.
- Thermiques, avec des modèles relativement équivalents aux véhicules électriques ci-dessus (certains véhicules sont plus anciens car leurs données de consommation proviennent d'essais réalisés par des magazines en 2008) :
 - Diesel : Audi A4, BMW Serie 3, Fiat Panda, Honda Accord Tourer, Mini Clubman, Nissan Pulsar, Opel Zafira, VW Passat ;
 - Essence : Renault Captur, Smart Fortwo, Subaru Impreza, Toyota Yaris ;
 - Et un seul modèle CNG, faute de plus de données sur ce type de motorisation moins courante : Skoda Octavia Combi G-tec.

Afin d'établir une comparaison la plus structurée possible, nous avons choisi de suivre la méthodologie « du puits aux roues » (*Well-to-Wheels*) préconisée par le Centre commun de recherche européen¹. Nous l'avons appliquée de la manière la plus rigoureuse et transparente possible tant sur son aspect « du puits aux réservoir » (*Well-to-Tank*) que « du réservoir aux roues » (*Tank-to-Wheels*), et y rajoutons explicitement l'énergie grise de production des véhicules car les données ne corroborent pas l'hypothèse selon laquelle le coût énergétique et climatique de production d'un véhicule est identique pour tous les véhicules.

¹ CCR, [Joint Research Centre](#) (JRC) en anglais - laboratoire de recherche scientifique et technique de l'Union européenne. Une partie de ses publications liées à la méthodologie WTW sont accessibles ici : <https://ec.europa.eu/jrc/en/jec/activities/wtw>

Il en résulte une analyse selon les trois grandes étapes représentées sur le schéma de la Figure 1 : Schéma de principe des besoins en énergie d'un véhicule thermique ou électrique.

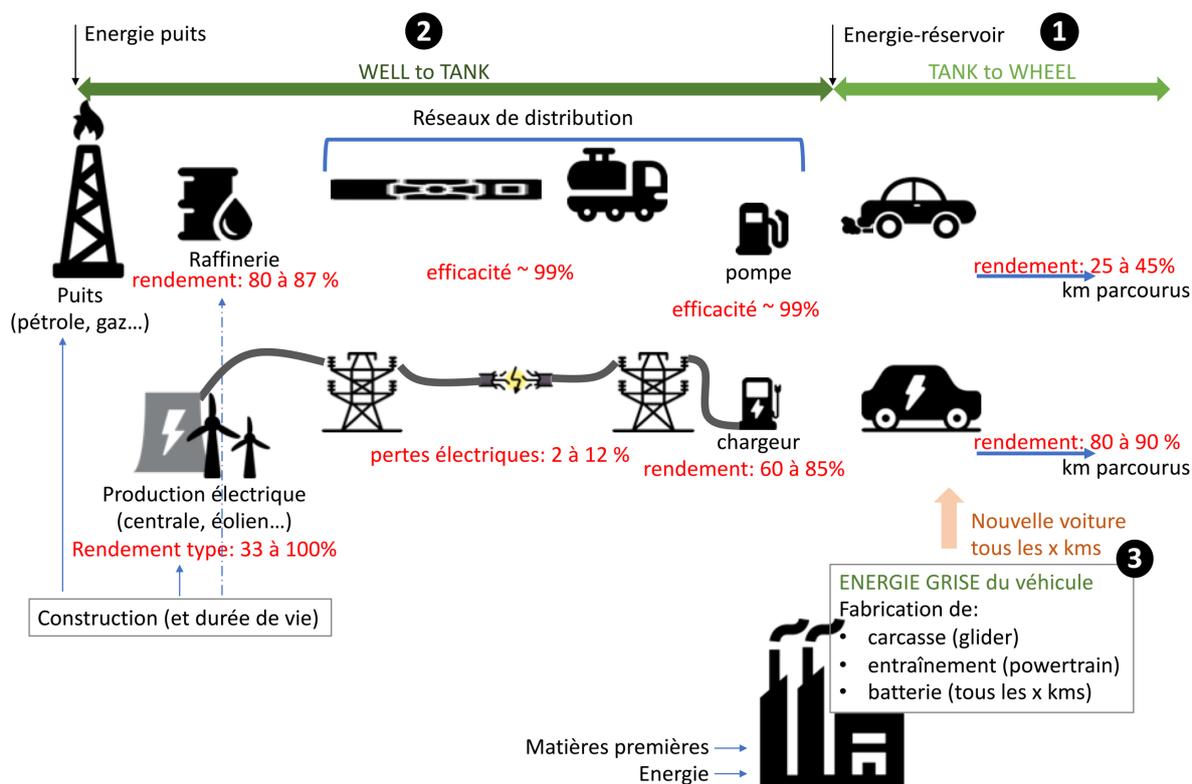


Figure 1 : Schéma de principe des besoins en énergie d'un véhicule thermique ou électrique

La section 2 analysera donc systématiquement de manière quantitative chacune des trois grandes étapes :

- 2.1 : Du réservoir aux roues (*tank-to-wheels*)
- 2.2 : Du puits au réservoir (*well-to-tank*)
- 2.3 : Énergie grise (fabrication) du véhicule

Bien que certains premiers résultats auront été présentés préalablement, ce sera principalement la section 3 qui dressera un bilan complet de la comparaison entre les différents véhicules étudiés. Cela nous permettra ensuite de tirer un certain nombre de conclusions en section 3.2. Et finalement, la section 5 terminera l'article par une méta-conclusion argumentée en guise d'appel à plus de transparence tant méthodologique qu'à propos des données de base utilisées par les uns et les autres.

2. Analyse

Pour faire avancer un véhicule, il lui faut de l'énergie, selon la bonne vieille loi de l'énergie cinétique qui vaut la moitié de la masse du véhicule multipliée par sa vitesse au carré ($E=mv^2/2$). Il faut donc remplir son réservoir de carburant pour un véhicule dit « thermique » (qui utilise un moteur à combustion), ou ses batteries pour un véhicule électrique. Selon l'efficacité avec laquelle le véhicule utilise cette *énergie-réservoir*, il parcourra un nombre plus ou moins élevé de kilomètres pour 100 kWh d'*énergie-réservoir* fournie². C'est la conversion du réservoir aux roues, qui permet par exemple

² Toute énergie peut effectivement s'exprimer en kilowatts.heures, ce que nous retiendrons ici comme unité centrale. Si l'énergie électrique s'exprime habituellement sous cette forme, cette pratique est moins courante

à un véhicule de parcourir 100 km avec 6 litres de carburant (on dit alors que ce véhicule consomme 6 l aux 100 km).

Mais avant cela, il aura fallu amener cette *énergie-réservoir*, quelle que soit sa forme jusque dans le réservoir, en partant du champ de pétrole pour les combustibles, tandis que pour l'énergie électrique il peut également s'agir de charbon, de pétrole, de gaz ou d'uranium alimentant une centrale thermique, ou encore de champs d'éoliennes ou de fermes photovoltaïques. De ces moyens de production (qu'il a fallu également construire en utilisant de l'énergie – dite *énergie grise* des infrastructures), un réseau de distribution amène l'*énergie-puits* jusqu'à la pompe (essence ou diesel) ou jusqu'à la prise électrique à laquelle est branché le chargeur de la batterie du véhicule électrique. C'est la conversion du puits au réservoir.

Enfin, fabriquer un véhicule requiert également de l'énergie : entièrement consommée pour permettre au véhicule d'exister, elle impactera le coût énergétique au kilomètre selon la durée de vie pendant lequel le véhicule sera vraiment utilisé. Si le véhicule n'est plus utilisé au bout de 100.000 km, cette *énergie grise* aura un impact double par km que si le véhicule est « amorti » sur 200.000 km.

Quant à la fin de vie d'un véhicule, son démontage et son recyclage, elle requiert aussi son lot d'énergie. N'étant toutefois pas parvenu à identifier des données fiables à cet égard, en particulier pour les véhicules électriques, cette étape n'est pas incluse dans la présente analyse.

2.1. Du réservoir aux roues (*tank-to-wheels*)

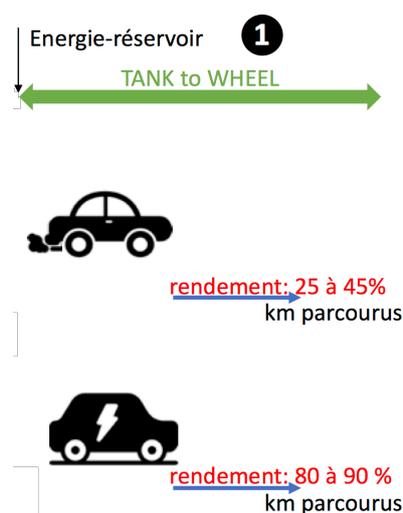


Figure 2 : Utilisation de l'énergie-réservoir par un véhicule thermique ou électrique pour parcourir des kilomètres

Plusieurs facteurs entrent en jeu pour modéliser l'efficacité d'un véhicule :

- il y a bien entendu le rendement de son moteur (de l'ordre de 25 à 45% pour les moteurs à combustion, d'où la dénomination de véhicules « thermiques », le reste de l'*énergie-réservoir* consommée étant converti en chaleur; de l'ordre de 80 à 90% pour le moteur électrique),
- mais également la résistance au roulement,
- la résistance aérodynamique à l'avancement (avec le produit du coefficient de traînée C_x et de la surface frontale),
- la récupération (ou non) de l'énergie de freinage,
- la consommation des divers auxiliaires...

pour les combustibles. Toutefois, la conversion existe et est constante. Ainsi, un litre de diesel fournit 9,7396 kWh tandis qu'un litre d'essence fournit 8,89 kWh, et un kg de CNG pauvre 10,28 kWh.

In fine, la méthode la plus commune consiste à simplement connaître la consommation réelle en *énergie-réservoir* dudit véhicule. Celle-ci se démarque typiquement³ par une autonomie très inférieure aux valeurs annoncées par les constructeurs (obligatoirement annoncé en Europe sur base du test normalisé NEDC⁴): le véhicule est par exemple annoncé comme consommant 5 l aux 100 kms, mais dans la réalité son conducteur constate plutôt une consommation de l'ordre de 6,5 l / 100 km. Le test étant le même pour les véhicules électriques, leur autonomie annoncée est donc également surévaluée, comme peuvent en attester la plupart des propriétaires de ces engins et comme cela a été démontré par Test-Achats dans son [n°625 de décembre 2017](#) : les essais témoignent en moyenne d'une autonomie inférieure de 42% aux valeurs annoncées pour les Nissan Leaf, Renault Zoé et Opel Ampera.

L'analyse se basera sur ces consommations réelles pour ces véhicules. La même constatation s'applique aux données de consommation des véhicules Tesla pour lesquelles nous utilisons les consommations en situation réelle telles que rapportées sur le site www.fueleconomy.gov de l'US Environment Protection Agency (EPA). Pour la Renault Twizy, faute de tests officiels, nous nous sommes appuyés sur l'avis de blogs⁵.

Pour les véhicules thermiques, nous nous référons à l'étude Touring Magazine n°245 pour les véhicules les plus récents : Nissan Pulsar 1.5 dci, Renault Captur TCE 120, Opel Zafira 1.6CDTI. Pour ces véhicules, la consommation réelle en cycle mixte est de 15 à 18% supérieure à celle annoncée par le constructeur. Les données des autres véhicules proviennent d'essais réalisés dans le Test-Achats n° 522 et 525 de 2008, et du Touring Magazine 245 de mai/juin 2018. Finalement, faute d'analyse externe, la consommation de la Skoda Octavia Combi G-tec est évaluée sur base de 8 mois (13 500 km) de relevés de consommation d'un des auteurs.

Le Tableau 1 expose les différentes consommations ainsi constatées pour les véhicules étudiés, en nombre de kilomètres parcourus pour une charge complète de batterie pour les véhicules électriques, et en nombre de litres par 100 km pour les véhicules thermique. Sur la base des équivalences exposées en note de bas de page #2, il montre également les équivalents en kWh d'énergie-réservoir. On y constate que les voitures électriques consomment nettement moins de kWh « réservoir ». Cependant, il s'agit de la consommation d'une énergie électrique, qui a déjà subi une transformation relativement importante. Pour pouvoir vraiment comparer, il faut connaître la consommation en *énergie-puits* de chaque véhicule, et donc remonter la chaîne d'approvisionnement jusqu'à l'extraction des ressources, ce qui sera effectué en section 2.2.

³ Fontaras G., Zacharof N., Ciuffo B. Fuel consumption and CO2 emissions from passenger cars in Europe – Laboratory versus real-world emissions. Progress in Energy and Combustion Science 60, pp 97-131, 2015

⁴ New European Driving Cycle - Nouveau cycle européen de conduite : norme européenne déterminant les vitesses et parcours à effectuer pour ensuite afficher le résultat sur les catalogues des véhicules, définir dans la [directive européenne 70/220/CEE](#).

⁵ Dont <https://blogautomobile.fr/une-semaine-renault-twizy-196730>

Véhicule	Type	Consommation NEDC		Consommation réelle	Différence	Source	# kWh réservoir / 100 km
Nissan Leaf 2015 SL	Elec.	250	km pour 30 kWh	144	42%	TA 628	20.83
Renault Zoé	Elec.	400	km pour 40 kWh	232	42%	TA 628	17.24
Opel Ampera 2015	Elec.	520	km pour 60 kWh	304	42%	TA 628	19.74
Tesla Model 3 50D	Elec.	354	km pour 50 kWh	298	16%	EPA	16.78
Tesla Model S P90D	Elec.	508	km pour 90 kWh	414	19%	EPA	21.74
Tesla Model X P100D	Elec.	542	km pour 100 kWh	413	24%	EPA	24.21
Renault Twizy Urban 80(b)	Elec.	100	km pour 6,1 kWh	80	20%	blog	7.63
Audi A4 2.0 TDI	Diesel	5.5	l / 100 km	6.13	11%	TA 525	59.70
BMW 318d Touring	Diesel	4.8	l / 100 km	5.38	12%	TA 525	52.40
Fiat Panda 1.3 Mjet Cross 4x4	Diesel	5.3	l / 100 km	5.3	0%	TA 522	51.62
Honda Accord Tourer 2.2 i-DTEC	Diesel	5.9	l / 100 km	6.61	12%	TA 525	64.38
Mini Clubman Cooper D	Diesel	4.1	l / 100 km	4.8	17%	TA 522	46.75
Nissan Pulsar 1.5dci	Diesel	3.6	l / 100 km	4.11	14%	TM245	40.03
Opel Zafira 1.6 CDTI	Diesel	4.5	l / 100 km	5.35	19%	TM245	52.11
VW Passat 1.9 TDI Blue Motion	Diesel	5.1	l / 100 km	5.21	2%	TA 525	50.74
Renault Captur TCE 120	Ess.	5.4	l / 100 km	6.42	19%	TM245	57.07
Smart Fortwo Coupé 1.0 mhd71	Ess.	4.3	l / 100 km	5.8	35%	TA 522	51.56
Subaru Impreza 2.0R	Ess.	8.4	l / 100 km	8.95	7%	TA 525	79.57
Toyota Yaris 1.3 VVT-i	Ess.	6	l / 100 km	6.8	13%	TA 522	60.45
Skoda Octavia Combi G-tec	CNG	n.a.	kg / 100 km	5.03	n.a.	partic.	51.71

Tableau 1 : Consommation réelle d'énergie-réservoir des différents véhicules de l'étude

2.1.a. De l'effet de la masse du véhicule sur sa consommation

Mais avant cela, une analyse intéressante consiste à considérer la masse (exprimé dans les catalogues comme le poids total du véhicule, rapporté en kg) de chaque véhicule, comme indiqué dans le Tableau 2, et de rapporter sur un diagramme la consommation de chaque véhicule en fonction de celle-ci. C'est ce que propose la Figure 3.

Véhicule	Masse (kg)
Nissan Leaf 2015 SL	1518
Renault Zoé	1393
Opel Ampera 2015	1600
Tesla Model 3 50D	1610
Tesla Model S P90D	2250
Tesla Model X P100D	2509
Renault Twizy Urban 80(b)	474
Audi A4 2.0 TDI	1619
BMW 318d Touring	1530
Fiat Panda 1.3 Mjet Cross 4x4	1113
Honda Accord Tourer 2.2 i-DTEC	1682
Mini Clubman Cooper D	1466
Nissan Pulsar 1.5dci	930
Opel Zafira 1.6 CDTI	1626
VW Passat 1.9 TDI Blue Motion	1525
Renault Captur TCE 120	1059
Smart Fortwo Coupé 1.0 mhd71	903
Subaru Impreza 2.0R	1500
Toyota Yaris 1.3 VVT-i	1151
Skoda Octavia Combi G-tec	1269

Tableau 2 : Masse des différents véhicules de l'étude

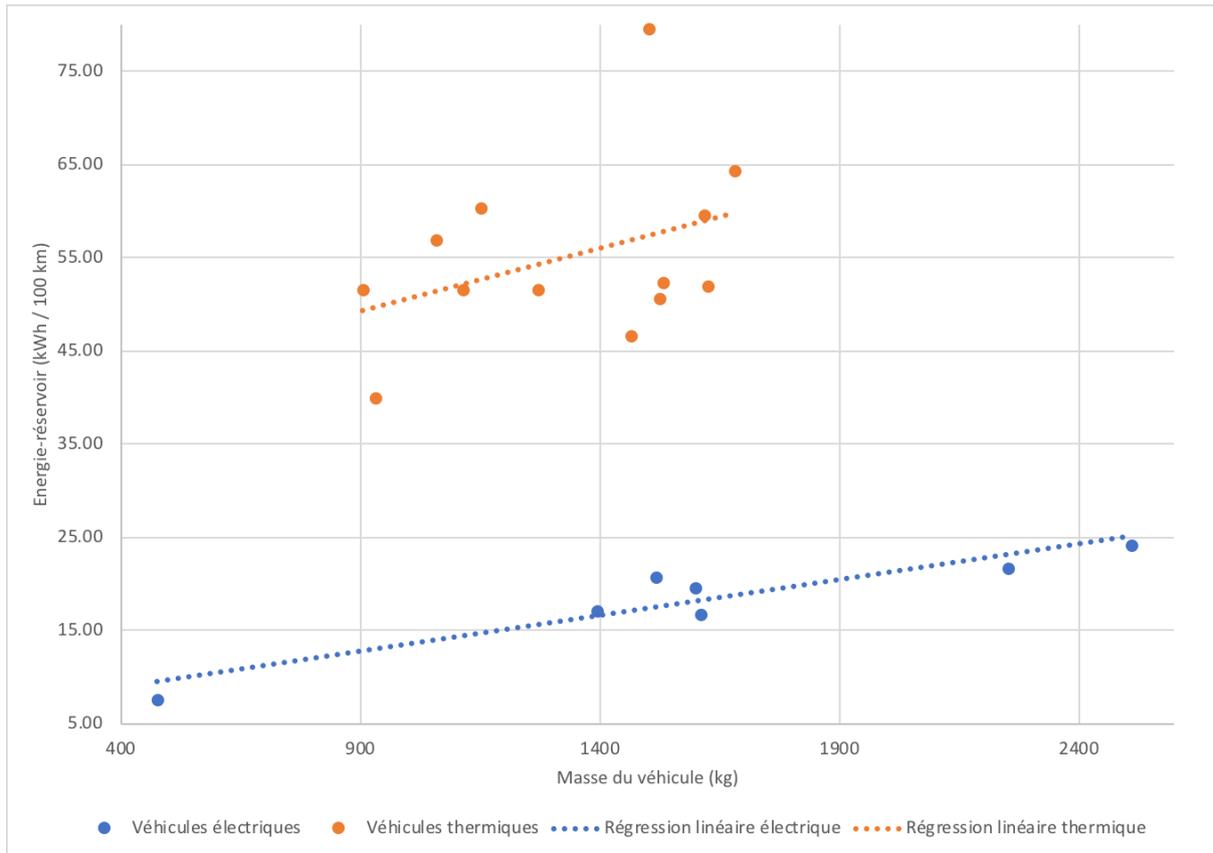


Figure 3 : Comparaison entre masse et consommation des différentes véhicules

L'allure des diagrammes montre clairement l'influence de la masse du véhicule : à type de combustion équivalent, la masse du véhicule (souvent supérieure à une tonne, pour 80 kilos de « masse utile » de passager) joue clairement un rôle essentiel⁶.

⁶ A des vitesses inférieures à 50 km/h, la masse du véhicule est d'ailleurs le facteur principal influant sur la consommation du véhicule. Au-delà de 50 km/h, la perturbation de l'air, et le coefficient Cx, devient prépondérant, mais la masse reste le second facteur d'influence.

2.2. Du puits au réservoir (*well-to-tank*)

Les différentes étapes de cette chaîne sont schématiquement représentées ici, avec leur rendement type :

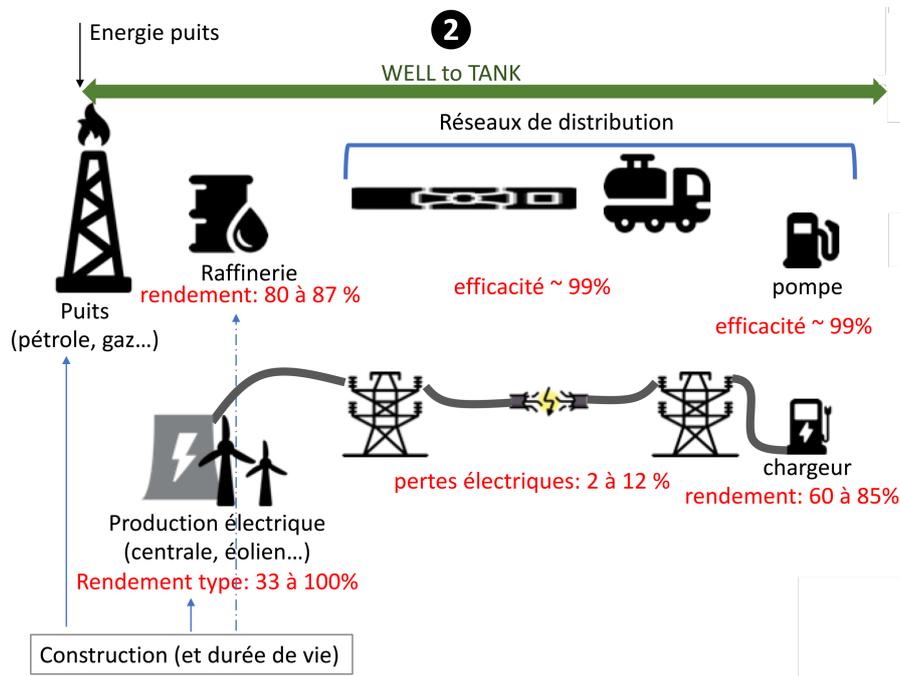


Figure 4 : Transformation de l'énergie-puits en énergie-réservoir : combustibles fossiles vs électricité

Il s'agit dès lors de modéliser chaque aspect de ces chaînes. Cela se réalise en une étape (trouvée dans la littérature) pour les carburants fossiles tandis que cela nécessite d'assembler trois étapes distinctes pour l'électricité.

2.2.a. WTT carburants fossiles

Dans le cas des carburants fossiles, peu de pertes ont lieu pendant la distribution et lors de la « livraison » depuis la pompe jusque dans le réservoir d'un véhicule diesel ou essence. Les raffineries ont également un rendement relativement élevé. C'est ainsi que l'agence française de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) et l'association bilan carbone (ABC)⁷ estiment des ratios entre *énergie-réservoir* et *énergie-puits* de :

- 79% pour le diesel,
- 81% pour l'essence (SP 95),
- 86% pour le gaz naturel (CNG).

⁷ Chiffres inférés des impact amont des carburants tels qu'utilisés dans la base carbone (www.basecarbone.fr). Le document de source (nécessitant de créer un login gratuit pour y accéder sur http://www.basecarbone.fr/fr/accueil/documentation-gene/index/page/New_liquides) fait lui-même référence à des études du JRC.

2.2.b. WTT électricité

Rendement des centrales

Du côté de l'énergie électrique, le rendement⁸ d'une centrale dépend fortement de la technologie et du combustible mis en œuvre. De plus, il varie selon l'endroit d'approvisionnement en électricité car chaque pays utilise un mix de production électrique (proportion de l'électricité fournie par différents types de centrales) différent. On peut toutefois utiliser les rendements-types suivants qui ont été retenus pour la présente étude⁹ :

- 33% pour les centrales nucléaires ;
- 36% pour les centrales au charbon et au lignite ;
- 40.5% pour les centrales au fioul ;
- 58.4% pour les cycles combinés ;
- 100% pour les énergies renouvelables. La conversion a été supposée parfaite parce que les énergies renouvelables sont gratuites et qu'il n'y a pas de pertes à proprement parler (le système a utilisé ce qu'il pouvait de l'énergie solaire, du vent ou du barrage).

A cela, il faut rajouter le rendement lié à l'énergie nécessaire pour extraire et transformer la ressource avant son usage en centrale :

- 97% pour le combustible nucléaire ;
- 92% pour le charbon ou le lignite ;
- 86% pour le fioul ou le gaz naturel.

Les pertes associées à ces rendements représentent l'énergie consommée pour transformer la ressource naturelle en combustible disponible à la centrale.

Pour calculer l'*énergie-puits* dans le cadre électrique, il nous faut donc poser des hypothèses quant au mix énergétique utilisé. Or celui-ci varie de pays en pays, et d'année en année. Afin de couvrir un panel représentatif, nous allons dans un premier temps présenter les chiffres pour les mix effectifs en 2017 tant en Belgique¹⁰ (BEL2017) que dans l'Union européenne¹¹ (EU2017). Nous complétons ensuite cette information avec quatre mix de pays fictifs, correspondant à des orientations marquées telles qu'on peut les voir dans certains pays européens : NUCLAND, COALAND, GASLAND et GREENLAND. Les hypothèses sous-jacentes à la production électrique de chacun de ces pays fictifs sont présentées dans le tableau ci-dessous.

⁸ I.e. l'efficacité avec laquelle la centrale transforme les kWh présents dans le combustible utilisé en kWh électriques.

⁹ Valeurs "habituelles" dans l'industrie, et également utilisées par le GIEC dans ses études sur les centrales. Cf. notamment la table « A.III.1 (continued) | Cost and performance parameters of selected electricity supply technologies » en page 1333 du rapport « IPCC 2014, IPCC Working Group III : [Mitigation of Climate Change, Annex III: Technology - specific cost and performance parameters](#) »

¹⁰ Tel que [publié par le Forum Nucléaire forum nucléaire belge](#) sur base des chiffres d'ELIA.

¹¹ Agora Energiewende and Sandbag (2018): [The European Power Sector in 2017](#). State of Affairs and Review of Current Developments.

Rendement puits		BEL 2017	EU 2017	NUCLAND	COALAND	GASLAND	GREENLAND
Nucléaire	32.0%	58.00%	25.60%	75.00%		5.00%	
Gaz	50.2%	32.00%	19.70%	5.00%	15.00%	65.00%	15.00%
Charbon	33.1%		11.00%		35.00%	20.00%	
Lignite	33.1%		9.60%		35.00%		
Fossile autre	34.8%		4.10%				
Renouvelable	100.0%	10.00%	30.00%	20.00%	15.00%	10.00%	85.00%
Rendement moyen		44.64%	56.34%	46.52%	45.72%	50.87%	92.53%

Tableau 3 : Mix de production électrique considérés dans l'étude

Pertes en ligne

Une fois l'électricité produite, il faut l'acheminer à son lieu de consommation. C'est le réseau de transmission et distribution électrique, sur lequel il est notoire que des « pertes en ligne » surviennent. Celles-ci varient à nouveau selon les pays, mais le dernier rapport européen fait état d'un taux moyen de pertes de 6,39%¹².

Chargeur des véhicules électriques

Le rendement des chargeurs est un élément important de la chaîne énergétique électrique et leurs pertes influencent significativement le bilan intégré. Faute d'études ou d'informations des constructeurs à ce sujet, les valeurs appliquées dans cette étude sont reconstituées à partir d'une notice de montage de l'équipement pour les modèles S et X de Tesla¹³. Un tableau y mentionne pour ces deux séries de véhicule et pour différents types de raccordement, l'autonomie « chargée par heure » en fonction de l'intensité du courant. A partir de la consommation électrique mentionnée par le constructeur, il est possible de calculer la charge correspondante en kWh et d'en déduire le rendement du dispositif. Les résultats présentés sur le diagramme ci-dessous sont en accord avec des valeurs pour d'autres types de chargeurs électriques. On retiendra pour la suite de l'étude une valeur moyenne de 80%. Il convient de noter que ce rendement est optimiste puisqu'il est relatif à l'intensité maximale du courant, donc en cas de batterie vide (au fur et à mesure que la batterie se recharge, le rendement diminue).

¹² Il s'agit là d'une moyenne européenne (simplifiée) sur base du dernier rapport du conseil de régulateurs européens d'énergie : [CEER Report on Power Losses](#), Council of European Energy Regulators, Ref: C17-EQS-80-03, Octobre 2017. Il y est fait état de pertes sur les réseaux nationaux allant de 2,24 à 10,44%. D'où une « moyenne » de 6,39%. Pour la Belgique, le chiffre de , mais le rapport considère explicitement que la Belgique (comme d'autres pays) améliore ses chiffres en comptabilisant des importations électriques. Nous appliquons donc la même valeur de 6,39% à tous les mix de production électriques étudiés. Un spécialiste de Tractebel cite spontanément 7% comme valeur typique du réseau belge. A titre de comparaison, en France où le réseau est moins densément maillé qu'en Belgique (plus longues distances de distribution, et donc logiquement plus de pertes), l'ADEME et l'association Bilan Carbone considèrent d'habitude des pertes de l'ordre de 10%.

¹³ [Installatie details voor TESLA WALL CONNECTOR](#), Tesla Motor Inc., March 2017, version 1.3

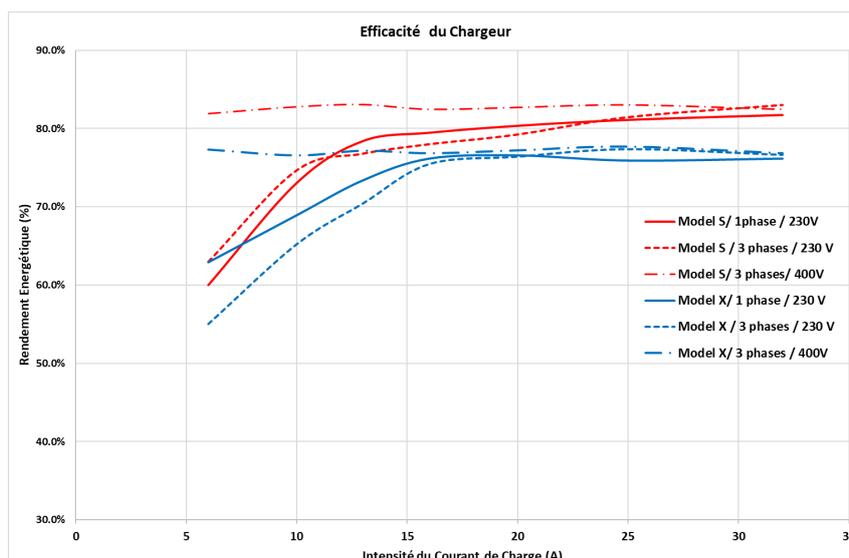


Figure 5 : Reconstitution de l'efficacité de deux chargeurs Tesla

2.2.c. Comparaison énergétique des véhicules du puits aux roues (*well-to-wheels*)

Ces hypothèses permettent de déterminer, en fonction de la composition du parc de production et des caractéristiques des combustibles, la demande en énergie-puits et les émissions de CO_{2e} associées

Tenant compte de ces différents facteurs, nous pouvons donc maintenant estimer la demande en *énergie-puits* des différents véhicules étudiés, que ce soit en Belgique ou dans l'Union européenne.

Véhicule	Type	# kWh réservoir / 100 km	# kWh puits BEL 2017 / 100 km	# kWh puits EU 2017 / 100 km	# kWh puits COA-LAND / 100 km
Nissan Leaf 2015 SL	Elec.	20.83	62.32	49.38	60.85
Renault Zoé	Elec.	17.24	51.58	40.86	50.36
Opel Ampera 2015	Elec.	19.74	59.04	46.78	57.65
Tesla Model 3 50D	Elec.	16.78	50.19	39.77	49.01
Tesla Model S P90D	Elec.	21.74	65.03	51.52	63.50
Tesla Model X P100D	Elec.	24.21	72.43	57.39	70.72
Renault Twizy Urban 80(b)	Elec.	7.63	22.81	18.07	22.27
Audi A4 2.0 TDI	Diesel	59.70	75.57	75.57	75.57
BMW 318d Touring	Diesel	52.40	66.33	66.33	66.33
Fiat Panda 1.3 Mjet Cross 4x4	Diesel	51.62	65.34	65.34	65.34
Honda Accord Tourer 2.2 i-DTEC	Diesel	64.38	81.49	81.49	81.49
Mini Clubman Cooper D	Diesel	46.75	59.18	59.18	59.18
Nissan Pulsar 1.5dci	Diesel	40.03	50.67	50.67	50.67
Opel Zafira 1.6 CDTI	Diesel	52.11	65.96	65.96	65.96
VW Passat 1.9 TDI Blue Motion	Diesel	50.74	64.23	64.23	64.23
Renault Captur TCE 120	Ess.	57.07	70.46	70.46	70.46
Smart Fortwo Coupé 1.0 mhd71	Ess.	51.56	63.66	63.66	63.66
Subaru Impreza 2.0R	Ess.	79.57	98.23	98.23	98.23
Toyota Yaris 1.3 VVT-i	Ess.	60.45	74.63	74.63	74.63
Skoda Octavia Combi G-tec	CNG	51.71	60.13	60.13	60.13

Tableau 4 : Consommation d'énergie-puits des différents véhicules de l'étude pour les mix de production électrique belge et européen

On le voit, l'écart énergétique se réduit nettement entre les véhicules électriques et les véhicules thermiques sachant qu'il reste néanmoins en faveur de la voiture électrique pour autant que le mix utilisé comporte une forte proportion de centrales à haut rendement (et surtout un fort usage d'énergies renouvelables comme la différence entre les mix BEL2017 et EU2017 en atteste). Dans le cas d'une production d'électricité 100% nucléaire (avec un rendement combiné de 32%), les valeurs de consommation énergétique deviennent quasiment identiques entre véhicules électriques et

thermiques. Un particulier qui utiliserait cependant exclusivement ses propres panneaux photovoltaïques pour recharger la batterie de son véhicule électrique aurait en revanche une énergie-puits égale à l'énergie-réservoir.

2.2.d. Comparaison climatique des véhicules du puits aux roues (*well-to-wheels*)

Si l'on s'intéresse maintenant non plus à l'aspect énergétique, mais à l'aspect climatique – donc au CO₂ (et aux autres gaz à effet de serre¹⁴, mesurés en « équivalent CO₂ », noté CO₂e), la composition du mix de production électrique va devenir importante.

Impact climatique des carburants fossiles

Un litre de combustible reste un litre de combustible, quel que soit l'endroit où il est brûlé. Ainsi¹⁵ :

- utiliser 1 kWh d'essence équivaut à rejeter 263,9 g CO₂e à la combustion (*tank-to-wheels*) ainsi que 49,7 g CO₂e pour son conditionnement (*well-to-tank*) = 313,6 g CO₂e ;
- utiliser 1 kWh de diesel équivaut à rejeter 263,5 + 55,4 = 318,9 g CO₂e ;
- utiliser 1 kWh de gaz CNG équivaut à rejeter 202,7 + 46,8 = 249,5 g CO₂e.

Il convient dans ce cas d'appliquer ces impacts à la quantité d'énergie-réservoir utilisée par les véhicules, puisque la partie *well-to-tank* est réputée tenir compte de l'efficacité de la chaîne de production. Cependant, dans cette méthodologie, l'impact de la construction des infrastructures (puits, raffineries...) n'est pas pris en compte.

Impact climatique de l'électricité

Pour ce qui est des kWh électriques, tout dépend à nouveau du mix utilisé. Selon que le réseau est principalement « alimenté » en charbon, en fioul, en énergie éolienne, en énergie nucléaire... ou par une combinaison de ces différentes sources, l'impact climatique est foncièrement différent. Ainsi, le GIEC propose-t-il les « facteurs d'émission » médians suivants¹⁶ (que nous prenons le temps de discuter en annexe 1) :

- Éolien : 11 g CO₂e/kWh
- Géothermie : 38 g CO₂e/kWh
- Hydraulique : 24 g CO₂e/kWh
- Photovoltaïque : 48 g CO₂e/kWh
- Centrale charbon : 820 g CO₂e/kWh
- Centrale fioul : 730 g CO₂e/kWh
- Centrale gaz : 490 g CO₂e/kWh
- Centrale nucléaire : 12 g CO₂e/kWh¹⁷

¹⁴ Pour une introduction aux différents gaz et à leur pouvoir de réchauffement global (PRG), nous vous renvoyons – parmi beaucoup de références possibles – au [blog de Jean-Marc Jancovici](#).

¹⁵ Valeurs extraites du guide [WELL-TO-TANK Appendix 2](#) - Version 4a - Summary of energy and GHG balance of individual pathways (2014) du JRC

¹⁶ IPCC 2014, IPCC Working Group III : [Mitigation of Climate Change, Annex III: Technology - specific cost and performance parameters](#) & [Mitigation of Climate Change, Annex II Metrics and Methodology](#). Cf. discussion en annexe 1.

¹⁷ Les études se renforcent et affinent progressivement ces mesures, même s'il reste de nombreux débats, notamment de par des omissions de certaines étapes du cycle de vie lors de l'analyse du cycle de vie de telle ou telle centrale. En effet, le rapport du GIEC se base sur un répertoire des analyses conduites dans des centaines d'articles scientifiques, pas toujours de manière équivalente. De même, chaque étude se base sur les spécificités de la centrale particulière étudiée. De nombreuses personnes contestent par exemple le chiffre obtenu pour la technologie nucléaire, qui ne tiendrait pas compte de l'ensemble du coût de construction et déconstruction d'une centrale ni de la nécessité de veiller aux déchets radioactifs pendant de très longues années. Elles avancent alors plutôt un coût de 56 à 110 g CO₂e/kWh, relativement équivalent à celui d'une ferme

Comme pour le volet énergétique, à côté des profils de production belge (BEL2017) et européen (EU2017) pour l'année 2017, nous avons introduit les profils représentatifs de certains pays européens nommés¹⁸: NUCLAND, COALAND, GASLAND et GREENLAND pour obtenir alors les impacts climatiques suivants par kWh.

	g CO2e / kWh	BEL 2017	EU 2017	NUCLAND	COALAND	GASLAND	GREENLAND
Nucléaire	12	58.00%	25.60%	75.00%		5.00%	
Gaz	490	32.00%	19.70%	5.00%	15.00%	65.00%	15.00%
Charbon	820		11.00%		35.00%	20.00%	
Lignite	820		9.60%		35.00%		
Fossile autre	730		4.10%				
Renouvelable	11	10.00%	30.00%	20.00%	15.00%	10.00%	85.00%
g CO2e / kWh		165	302	36	649	484	83

Tableau 5 : Impact climatique des mix de production électrique considérés dans notre étude

Ces facteurs, qui tiennent (partiellement – cf. note) de l'amont doivent s'appliquer non pas à l'énergie-puits des véhicules électriques, mais à l'énergie-réservoir augmentée de l'efficacité du chargeur et des pertes¹⁹ en lignes.

Comparaison climatique

Nous pouvons alors comparer l'impact climatique de nos différents véhicules selon qu'ils utilisent un carburant fossile, de l'électricité belge ou européenne.

On constate tout d'abord sur le Tableau 6 que les véhicules thermiques dépassent les seuils de 130 ou 140 g CO₂e / km²⁰. C'est normal, puisque nous tenons compte ici du véritable impact de la chaîne complète du puits aux roues, et pas seulement des rejets de CO₂ en sortie de pot d'échappement.

On constate également que les véhicules électriques ne sont pas « zéro-émission ». Cela est peut-être vrai à la sortie de leur pot d'échappement (puisque'ils n'en ont pas !) mais ne l'est pas si on tient compte de la fabrication de leur électricité. Et selon que les véhicules électriques se rechargent sur un mix belge, européen ou autre, leurs performances sont très différentes. Alors que le mix européen est plus efficient (en termes de rendement de production électrique), il est nettement plus émetteur de gaz à effet de serre.

photovoltaïque. Nous garderons toutefois dans la présente étude l'entièreté des valeurs d'une même source. Mais nous discutons certaines des valeurs pour des centrales « classiques » au gaz ou au charbon en annexe 1.

¹⁸ Nous avons assimilé l'ensemble de la production renouvelable à de l'éolien, avec un poids carbone de 11 g CO₂e / kWh, même si – tant en Belgique qu'en Europe – cette production de renouvelables est un mix de différentes technologies. Ce faisant nous diminuons l'impact attribué aux véhicules électriques.

¹⁹ Si l'impact climatique des infrastructures (centrales...) était pris en compte, il serait judicieux d'intégrer celui des infrastructures de transmission/distribution (pylônes, cabines à haute tension, transformateurs...) et de cette activité (camion des équipes techniques d'ORES et consorts...). Cela n'a pas non plus été pris en compte ici faute de données.

²⁰ L'accord entre l'Union européenne et l'Association des Constructeurs Européens d'Automobiles (ACEA) de 1998 prévoyait une réduction volontaire des émissions d'usage (= de l'énergie-réservoir, mesurée selon le test NEDC) sous les 140 g pour 2008. L'accord devient ensuite contraignant pour descendre sous les 130g en 2015 et sous les 95g d'ici 2020.

Véhicule	Type	BEL 2017 g CO ₂ e / km	EU 2017 g CO ₂ e / km	COALAND 2017 g CO ₂ e / km
Nissan Leaf 2015 SL	Elec.	46	84	181
Renault Zoé	Elec.	38	69	149
Opel Ampera 2015	Elec.	43	80	171
Tesla Model 3 50D	Elec.	37	68	145
Tesla Model S P90D	Elec.	48	88	188
Tesla Model X P100D	Elec.	53	98	210
Renault Twizy Urban 80(b)	Elec.	17	31	66
Audi A4 2.0 TDI	Diesel	190	190	190
BMW 318d Touring	Diesel	167	167	167
Fiat Panda 1.3 Mjet Cross 4x4	Diesel	165	165	165
Honda Accord Tourer 2.2 i-DTEC	Diesel	205	205	205
Mini Clubman Cooper D	Diesel	149	149	149
Nissan Pulsar 1.5dci	Diesel	128	128	128
Opel Zafira 1.6 CDTI	Diesel	166	166	166
VW Passat 1.9 TDI Blue Motion	Diesel	162	162	162
Renault Captur TCE 120	Ess.	179	179	179
Smart Fortwo Coupé 1.0 mhd71	Ess.	162	162	162
Subaru Impreza 2.0R	Ess.	250	250	250
Toyota Yaris 1.3 VVT-i	Ess.	190	190	190
Skoda Octavia Combi G-tec	CNG	129	129	129

Tableau 6 : Impact climatique des différents véhicules de l'étude pour les mix de production électrique belge et européen

Analysons cela plus en détails en ne gardant qu'un seul véhicule électrique et voyons son impact climatique au kilomètre pour l'ensemble de nos mix de production électrique.

Véhicule	Type	Mix de prod. électrique	g CO ₂ e / km
Opel Ampera 2015	Électrique	BEL 2017	43
Opel Ampera 2015	Électrique	EU 2017	80
Opel Ampera 2015	Électrique	NUCLAND	9
Opel Ampera 2015	Électrique	COALAND	171
Opel Ampera 2015	Électrique	GASLAND	128
Opel Ampera 2015	Électrique	GREENLAND	22

Tableau 7 : Impact climatique de l'Opel Ampera pour différents mix de production électrique

Ainsi, il devient assez vite évident que les vertus de la voiture électrique dépendent fortement du mix de production électrique de l'endroit où elles sont utilisées.

Nous pouvons même inverser la question : sous quelles conditions de mix de production électrique, une voiture électrique comme l'Opel Ampera est-elle meilleure pour l'environnement que des véhicules thermiques déterminés ? Comparons-la à deux véhicules roulant l'un à l'essence et l'autre au diesel. La Figure 6 ci-dessous indique la consommation réelle mesurée et la conversion du puits au réservoir dépendant du combustible.

Il en ressort notamment que :

- Le mix belge 2017 (43 g CO₂e/km) rend l'Ampera aussi peu impactante qu'un véhicule diesel consommant 1,40 l / 100 km ou qu'un véhicule essence consommant 1,56 l / 100 km.
- Le mix européen (80 gCO₂e/km) en revanche rend cette même Ampera climatiquement équivalente à des véhicules consommant 2,56 l de diesel ou 2,85 l d'essence pour 100 km.
- Quant au mix de COALAND (171 g CO₂e/km), il y rend une Ampera aussi impactante qu'un véhicule thermique consommant 5,51 litres de diesel ou 6,14 litres d'essence aux 100 km.

L'influence du mix de production électrique est donc très importante, et est un second aspect à prendre en compte en plus du poids de la voiture (car toujours avec le mix européen, la Tesla Model X P100D est, elle, équivalente à des véhicules thermiques consommant 3,14(diesel) ou 3,5 (essence) l / 100 km).

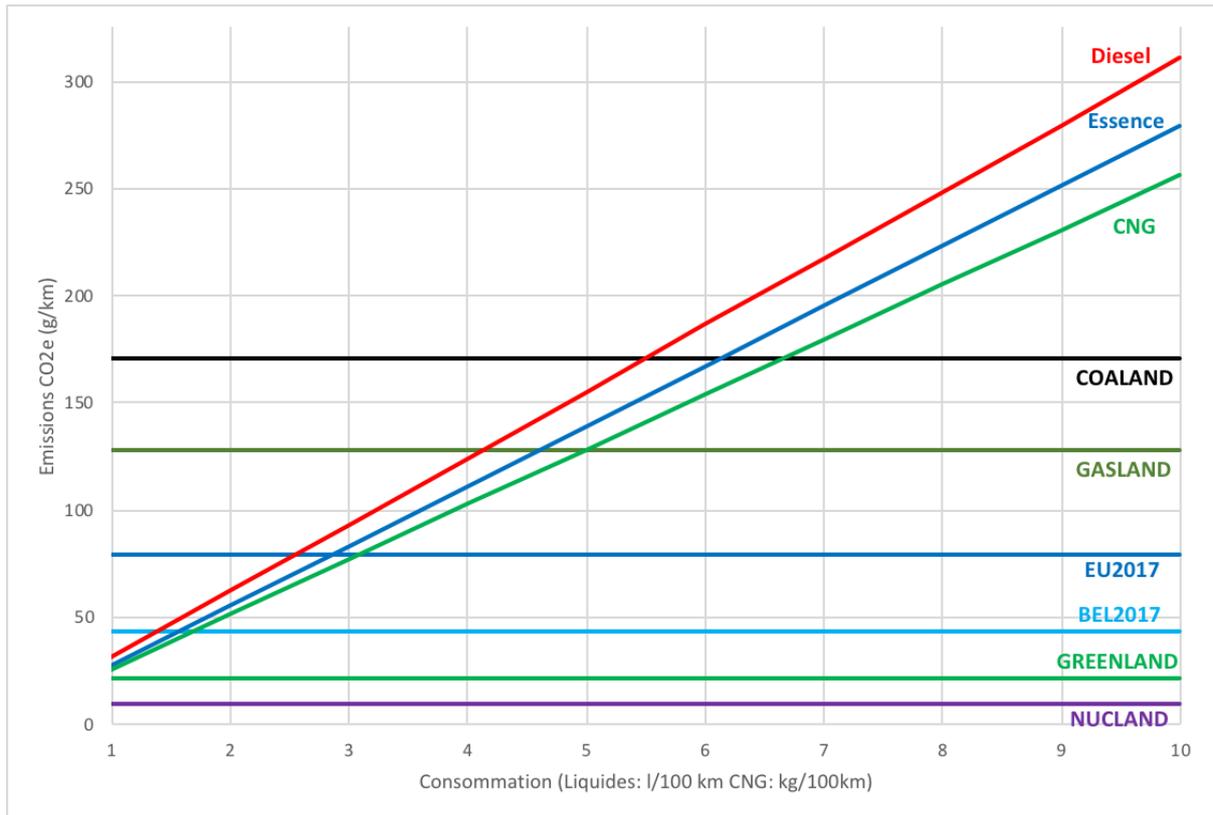


Figure 6 : Comparaison de l'impact climatique de véhicules thermiques (diesel ou essence) vs impact d'une Opel Ampera selon différents mix de production électrique

Les mix GREENLAND et NUCLAND permettent de garantir une meilleure performance climatique de la voiture électrique dans tous les cas. Mais cela ne vaut que pour la seule consommation des véhicules. Il nous reste à inclure l'impact de leur fabrication, qui n'est pas le même selon que le véhicule est thermique ou électrique.

2.3. Énergie grise (fabrication) du véhicule

En effet, le calcul systémique ne s'arrête pas là, car outre le fait de remplir le réservoir ou la batterie, il a fallu mobiliser une certaine quantité d'énergie pour fabriquer le véhicule. A cet égard, les diverses études deviennent plus compliquées à analyser car les hypothèses sont souvent peu explicites. La plupart des analyses de cycle de vie (partielles) tentent de distinguer la carcasse (« glider ») du train moteur (« motortrain »), mais ne parviennent jamais au bout de la démonstration, faute d'informations de la part des constructeurs.

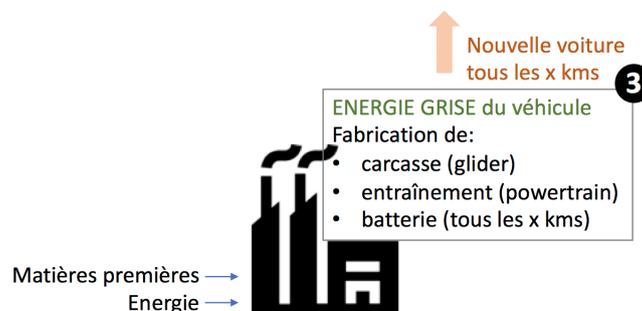


Figure 7 : L'énergie grise est l'énergie nécessaire à la fabrication du véhicule

Seule exception à la règle, le démantèlement complet de deux modèles de Golf²¹, qui a mené aux bilans énergétiques et climatiques suivants :

- 23.700 kWh et 4402 kg CO₂e (production des matières et assemblage de la voiture) pour une Golf A4, 1.4 l 55 kW Otto, qui pèse 1059 kg ;
- 24.500 kWh et 4577 kg CO₂e pour une Golf A4, 1.9 l 66 kW TDI Diesel, qui pèse 1181 kg.

Faute de meilleures informations (nous renvoyons le lecteur intéressé en annexe 2 pour une discussion sur ces chiffres), nous utiliserons donc les hypothèses basées sur l'étude plus détaillée des Golf, dont nous retenons le modèle diesel :

- 20,75 kWh par kg de véhicule (hors batterie du véhicule électrique) ;
- 3,88 kg CO₂e par kg de véhicule (hors batterie du véhicule électrique).²²

Pour les véhicules électriques, les derniers rapports environnementaux de Volkswagen évoquent une énergie grise de la e-Golf aux alentours de 40.000 kWh, mais sans fournir plus de détails. La différence significative avec les autres modèles proviendrait de la batterie du véhicule électrique. Une étude récente²³ considère qu'il est judicieux – au vu d'une comparaison de différentes autres études – de considérer que la production de batteries Lithium-ion (la technologie la plus répandue pour les véhicules électriques) :

- requiert entre 97 et 181 kWh d'énergie grise par kWh de capacité ainsi produite.
- émet, étant donné ses origines de production, entre 150 et 200 kg CO₂e par kWh de capacité.

Nous retenons (à nouveau, discussion en annexe 2) l'hypothèse haute de l'étude précitée pour l'énergie, et considérons 181 kWh et 200 kg CO₂e par kWh de batterie (soit 20,11 kWh et 22,22 kg CO₂e par kg de batterie d'une Tesla Model 3). Et nous obtenons ainsi au Tableau 8 les évaluations de l'énergie grise, et de l'impact climatique associé, des différents véhicules de l'étude.

Il nous reste finalement à pouvoir combiner *énergie-puits* de consommation et *énergie grise* de fabrication. Pour ce faire, il nous faut estimer la « durée de vie » dudit véhicule, ce qui varie grandement d'un utilisateur à l'autre. Les statistiques belges²⁴ indiquent toutefois un âge moyen du parc automobile belge de 8 ans, 10 mois et 112 jours ainsi qu'un parcours annuel de 15.151 km. Nous allons donc simuler en scénario 1 les impacts de nos véhicules pour une durée de vie estimée à 10 ans, avec 15.000 km parcourus par an.

²¹ Schweimer, G., Levin, M. *Life cycle inventory for the Golf A4 (internal report)*, Volkswagen AG. Disponible en ligne sur : <http://www.wz.uw.edu.pl/pracownicyFiles/id10927-volkswagen-life-cycle-inventory.pdf>

²² A noter que cela favorise sans doute les véhicules les plus récents, en particuliers les électriques, qui ont tendance à vouloir abaisser leur poids via un recours très fort à des alliages résistants et légers, à base d'aluminium renforcé, dont les impacts sont bien plus élevés que ceux de l'acier et dont la fin de vie offre bien moins de débouchés que les matériaux n'ayant pas recours aux alliages complexes.

²³ Romare M., Dahllöf L. *The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries (A Study with Focus on Current Technology and Batteries for light-duty vehicles)*, IVL Swedish Environmental Research Institute, No. C 243, May 2017, 58 pages

²⁴ Cf. les statistiques reprises sur le site de la fédération belge et luxembourgeoise de l'automobile et du cycle (FEBIAC): <http://www.febiac.be/public/statistics.aspx?FID=23>. Les données disponibles les plus récentes (2016 ou 2015) ont été sélectionnées.

Véhicule	Masse total (kg)	Masse batterie (kg)	Capacité batterie (kWh)	Énergie grise (kWh)	Impact clim. (kg CO ₂ e)
Nissan Leaf 2015 SL	1518	296	30	30 787	10 741
Renault Zoé	1393	305	40	29 816	12 221
Opel Ampera 2015	1600	430	60	35 138	16 540
Tesla Model 3 50D	1610	450	50	33 120	14 501
Tesla Model S P90D	2250	540	85	50 868	23 635
Tesla Model X P100D	2509	600	100	57 712	27 407
Renault Twizy Urban 80(b)	474	100	6.1	8 865	2 671
Audi A4 2.0 TDI	1619			33 594	6 282
BMW 318d Touring	1530			31 748	5 936
Fiat Panda 1.3 Mjet Cross 4x4	1113			23 095	4 318
Honda Accord Tourer 2.2 i-DTEC	1682			34 902	6 526
Mini Clubman Cooper D	1466			30 420	5 688
Nissan Pulsar 1.5dci	930			19 298	3 608
Opel Zafira 1.6 CDTI	1626			33 740	6 309
VW Passat 1.9 TDI Blue Motion	1525			31 644	5 917
Renault Captur TCE 120	1059			21 974	4 109
Smart Fortwo Coupé 1.0 mhd71	903			18 737	3 504
Subaru Impreza 2.0R	1500			31 125	5 820
Toyota Yaris 1.3 VVT-i	1151			23 883	4 466
Skoda Octavia Combi G-tec	1269			26 332	4 924

Tableau 8 : Énergie-grise et impact climatique de fabrication des différents véhicules de l'étude

Une dernière question se pose aussi concernant la durée de vie de la batterie d'un véhicule électrique. Tient-elle aussi longtemps, que ce soit en durée dans le temps ou en nombre de kilomètres (et donc de cycles de décharge et de recharge) ? N'ayant trouvé aucune étude sur le sujet, et l'expérience d'un certain nombre de propriétaires de véhicules électriques ayant tendance à démontrer une usure certaine de la voiture, nous appliquerons deux scénarios : l'un où la batterie tient 10 ans / 150.000 km (scénario 1), l'autre où la batterie doit être remplacée au bout de 5 ans / 75.000 km (scénario 1 bis).

NB : comme annoncé dans le début de l'analyse, il faudrait également rajouter l'impact (énergétique et climatique) de la fin de vie du véhicule (désassemblage, recyclage...). Cela n'a pu être intégré dans l'étude faute de données disponibles. De mêmes, les entretiens et consommables du véhicule ne sont pas pris en compte. Il resterait à cet égard des questions à élucider, telles que : un véhicule plus léger use-t-il ses pneumatiques moins vite ? L'entretien des véhicules électriques est-il plus ou moins efficace que celui des véhicules thermiques ?

3. Synthèse et simulations

Nous pouvons maintenant assembler les différents éléments de l'étude pour obtenir le coût énergétique complet des différents véhicules, fabrication incluse.

3.1. Scénario 1 : 15 000 km/an pendant 10 ans

3.1.a. Impact énergétique

Les trois figures des pages suivantes présentent le coût énergétique (en kWh) des vingt véhicules étudiés sur une période de 10 ans, en commençant par leur fabrication, et en ajoutant annuellement l'impact de 15 000 kilomètres parcourus. Les figures présentent, dans l'ordre, le résultat selon les mix de production BEL 2017, EU 2017 et COALAND.

Les véhicules électriques sont tous représentés par des traites pointillés (de différentes couleurs) tandis que les véhicules thermiques sont en traits pleins.

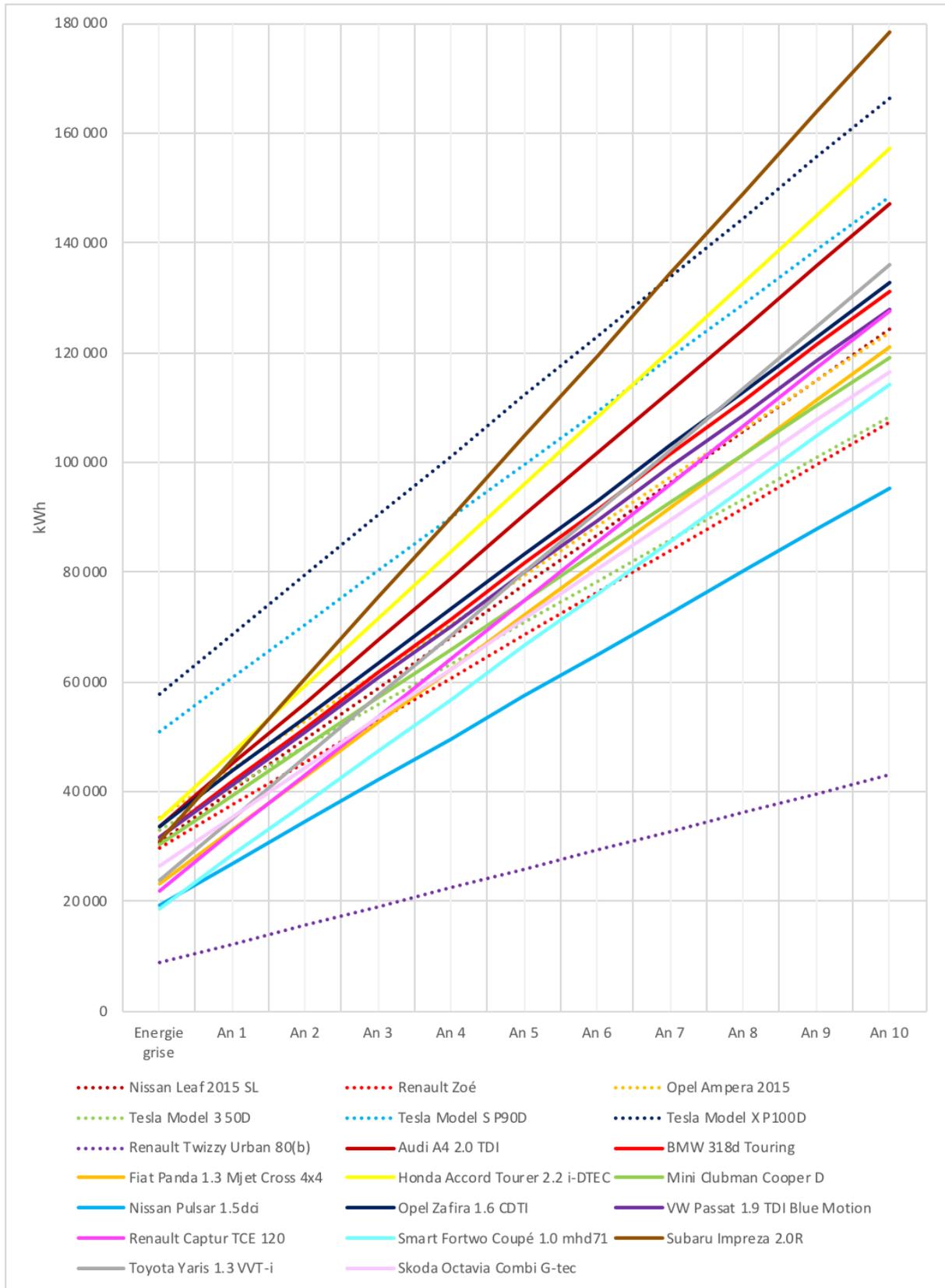


Figure 8 : Coût énergétique des différents véhicules sur 10 ans (15.000 km par an), selon le mix de production électrique BEL 2017

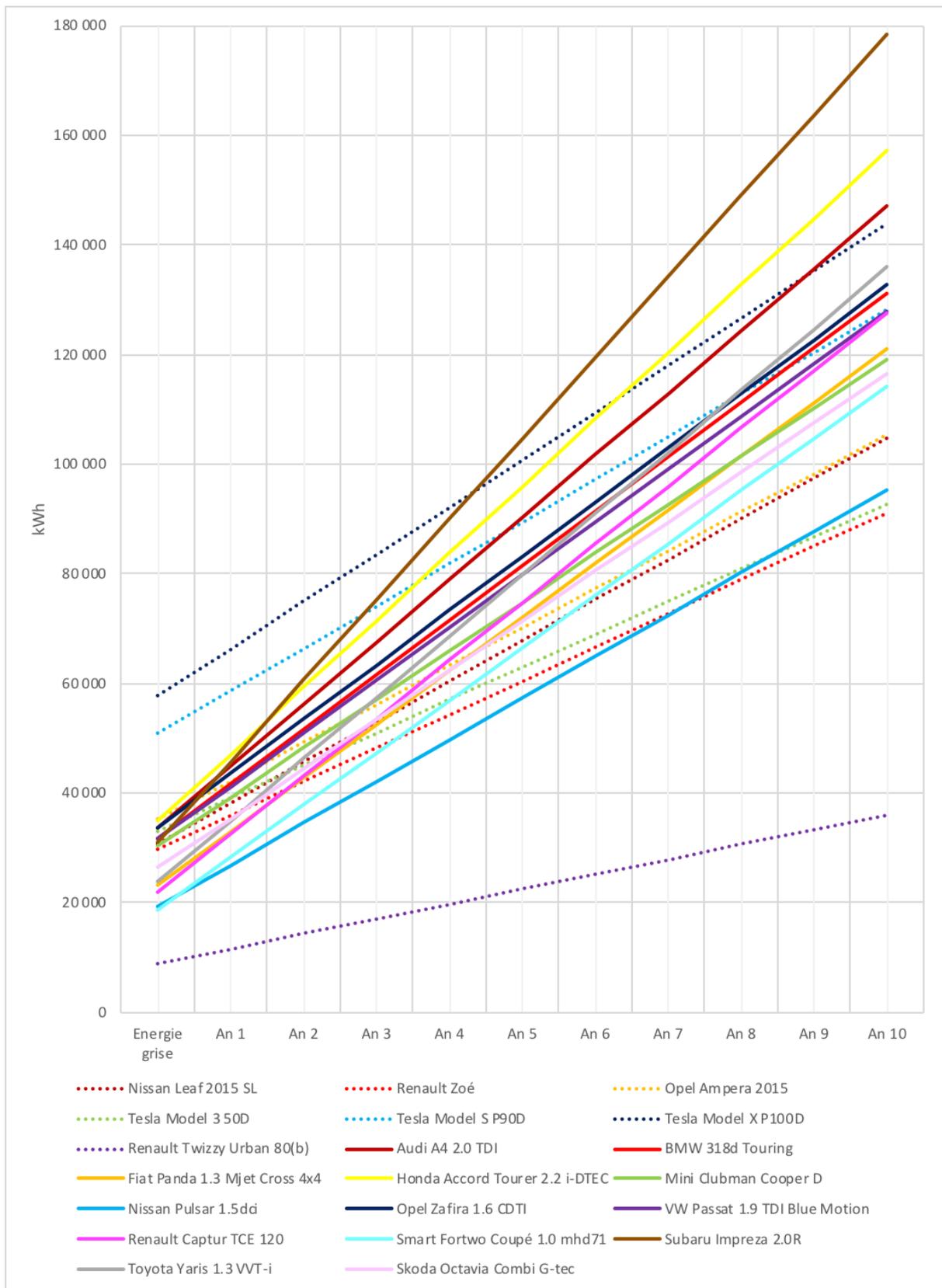


Figure 9 : Coût énergétique des différents véhicules sur 10 ans (15.000 km par an), selon le mix de production électrique EU 2017

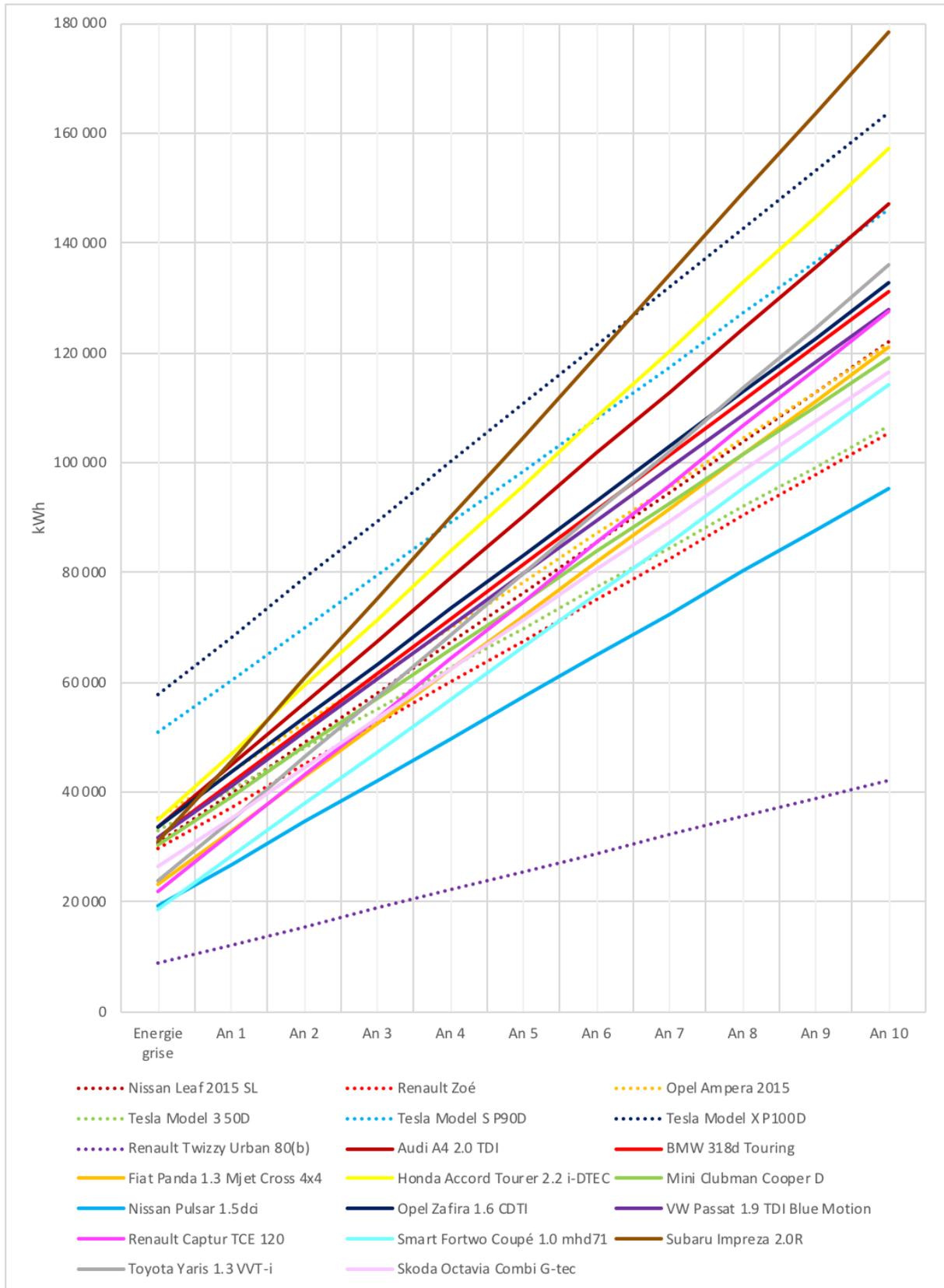


Figure 10 : Coût énergétique des différents véhicules sur 10 ans (15.000 km par an), selon le mix de production électrique COALAND

D'un point de vue strictement énergétique, on constate que la moindre consommation des véhicules électriques compense progressivement la plus grande énergie nécessaire à leur fabrication. Bien entendu, selon le modèle de véhicule et les masses relatives des véhicules thermiques et électriques comparés, cette compensation est plus ou moins rapide.

L'effet est relativement similaire quel que soit le mix de production électrique utilisé, comme en atteste la comparaison selon les trois mix de production électrique : belge (Figure 8), européen (Figure 9) ou COALAND (Figure 10). Les légères variations d'efficacité des différents mix de production (44,64% pour BEL 2017, 56,34% pour EU 2017 et 45,72% pour COALAND) ne provoquent pas de changement majeur.

3.1.b. Impact climatique

Du point de vue de l'impact climatique, la nature du mix est en revanche beaucoup plus critique. Et ce n'est pas lié à l'efficacité complète des centrales utilisées mais bien à leur impact climatique. Ainsi, COALAND a beau afficher un meilleur rendement moyen en centrale, son impact (649 g CO_{2e} / kWh) va avoir des répercussions plus fortes que le mix européen (302 g CO_{2e} / kWh) ou le mix belge (165 g CO_{2e} / kWh).

Avec le mix belge 2017 (Figure 11), les voitures électriques de gabarit raisonnable parviennent à compenser leur sur-impact de fabrication au bout de deux à quatre années selon les modèles avec lesquels on compare :

- La Nissan Leaf, le moins impactant des véhicules électriques (hormis le Twizy, nous y reviendrons plus loin en section 3.4), a un impact climatique moins élevé que celui d'une Toyota Yaris après 3 ans et qu'une Smart Fourtwo après un peu plus de 4 ans. Pour la Nissan Pulsar roulant au diesel – le moins impactant sur le long terme des véhicules thermiques étudiés – il faut attendre un peu moins de 6 ans pour que la Leaf soit moins impactante.
- Pour l'Opel Ampera, plus lourde que la Leaf et dotée d'une batterie plus imposante lui donnant le double d'autonomie, il faut respectivement 5 ans et demi, plus de 7 ans ou 10 ans pour être moins impactante que la Yaris, la Smart ou la Pulsar.
- Quant à un « gros » véhicule électrique tel la Tesla Model S, il parvient tout juste en 9 ans à être moins impactant qu'une Yaris, mais reste définitivement plus impactant que la Smart ou la Pulsar.

Comme déjà évoqué ci-avant, la « taille » (et donc la masse) du véhicule est un facteur important, surtout quand deux véhicules de masses différentes transportent le même nombre de passagers à la même vitesse moyenne. Or, dans le cas des véhicules électriques, cette masse est fortement influencée par la batterie, que l'utilisateur souhaite la plus grosse possible pour gagner en autonomie.

Si on utilise plutôt le mix européen de 2017 (Figure 12), les conclusions évoluent :

- La Leaf ne devient moins impactante que la Yaris, la Smart ou la Pulsar qu'après respectivement 4 ans, un peu plus de 6 ans et 10 ans et demi ;
- L'Ampera quant à elle requiert alors un peu plus de 7 ans (Yaris), 10 ans et demi (Smart) ou bien plus longtemps (Pulsar)
- Et même au bout de 10 ans, la Tesla Model S est responsable de plus de changement climatique que les trois modèles thermiques comparés ici !

Avec un mix très carboné, tel que celui de COALAND (Figure 13) le verdict est encore plus tranché : il vaut clairement mieux continuer d'utiliser des véhicules thermiques !

A l'inverse, un mix peu carboné tel que celui de GREENLAND (83 g CO_{2e} / kWh, Figure 14) permet aux véhicules électriques de compenser nettement plus rapidement l'impact de leur fabrication. En 2 à 4 ans et demi pour la Leaf, tandis que la Tesla Model S revient à l'impact de la Smart au bout de 10 ans. NUCLAND (36 g CO_{2e} / kWh) accentuerait encore cet effet.

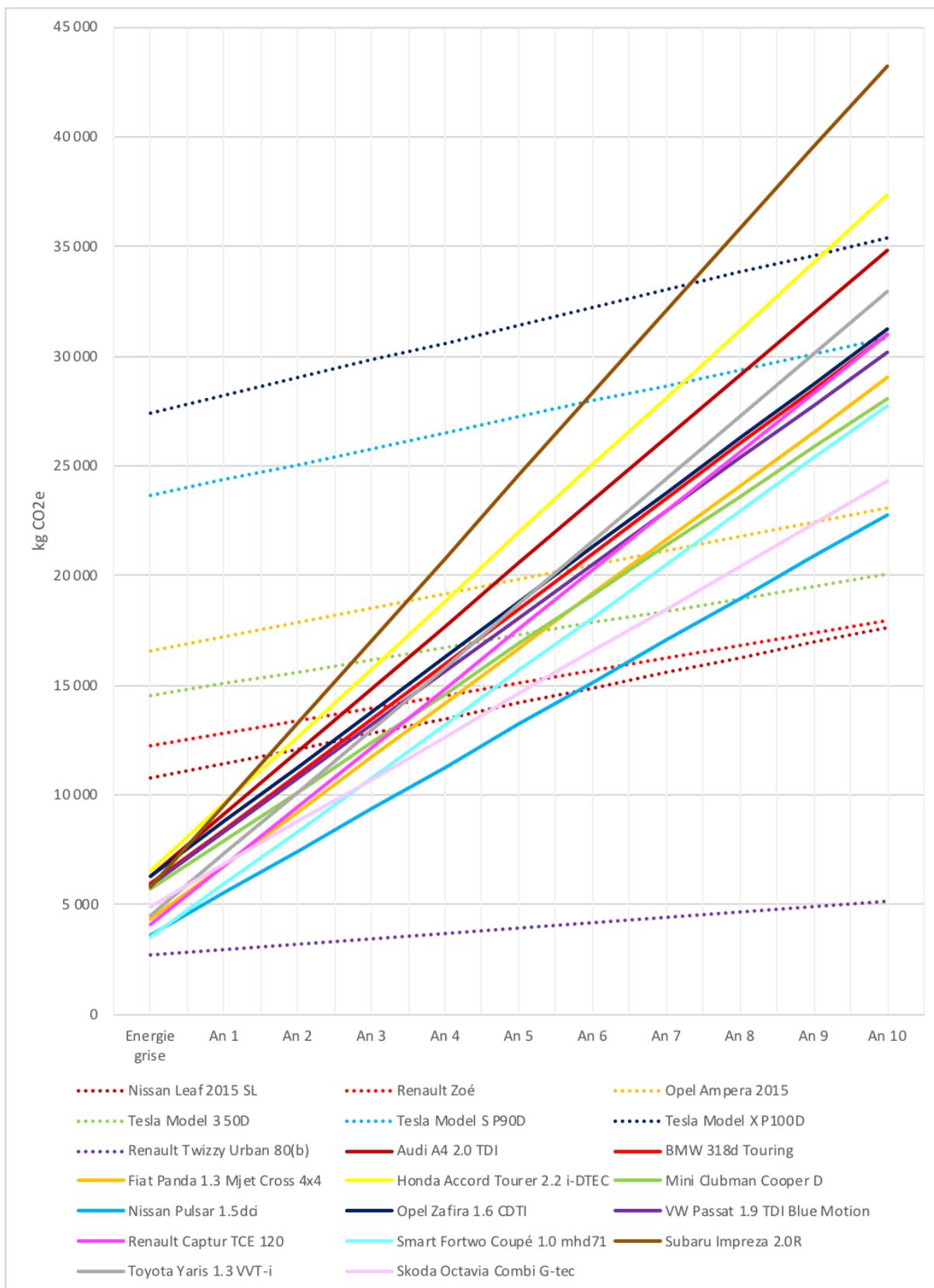


Figure 11 : Impact climatique des différents véhicules sur 10 ans (15.000 km par an), selon le mix de production électrique BEL 2017

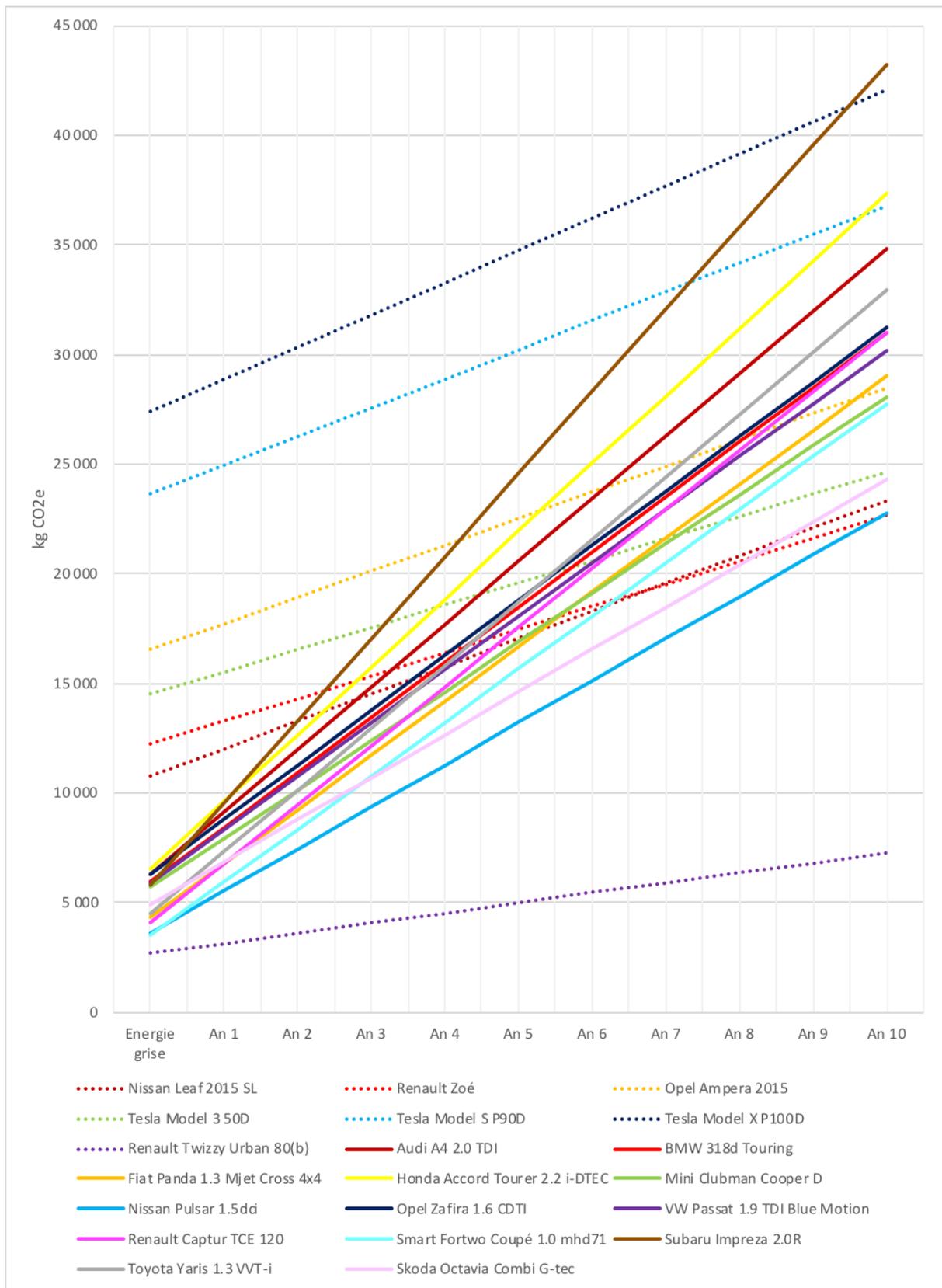


Figure 12 : Impact climatique des différents véhicules sur 10 ans (15.000 km par an), selon le mix de production électrique EU 2017

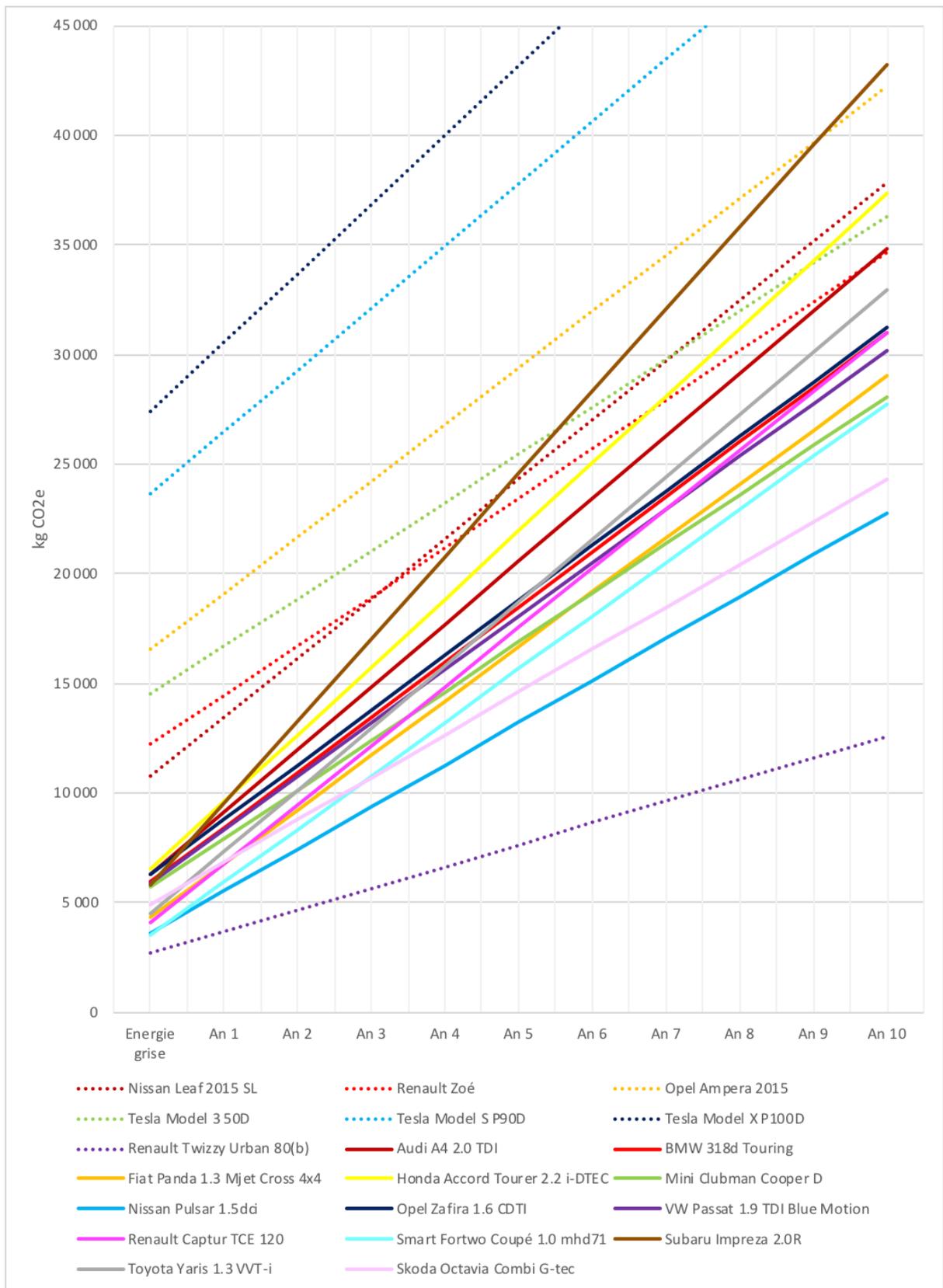


Figure 13 : Impact climatique des différents véhicules sur 10 ans (15.000 km par an), selon le mix de production électrique COALAND

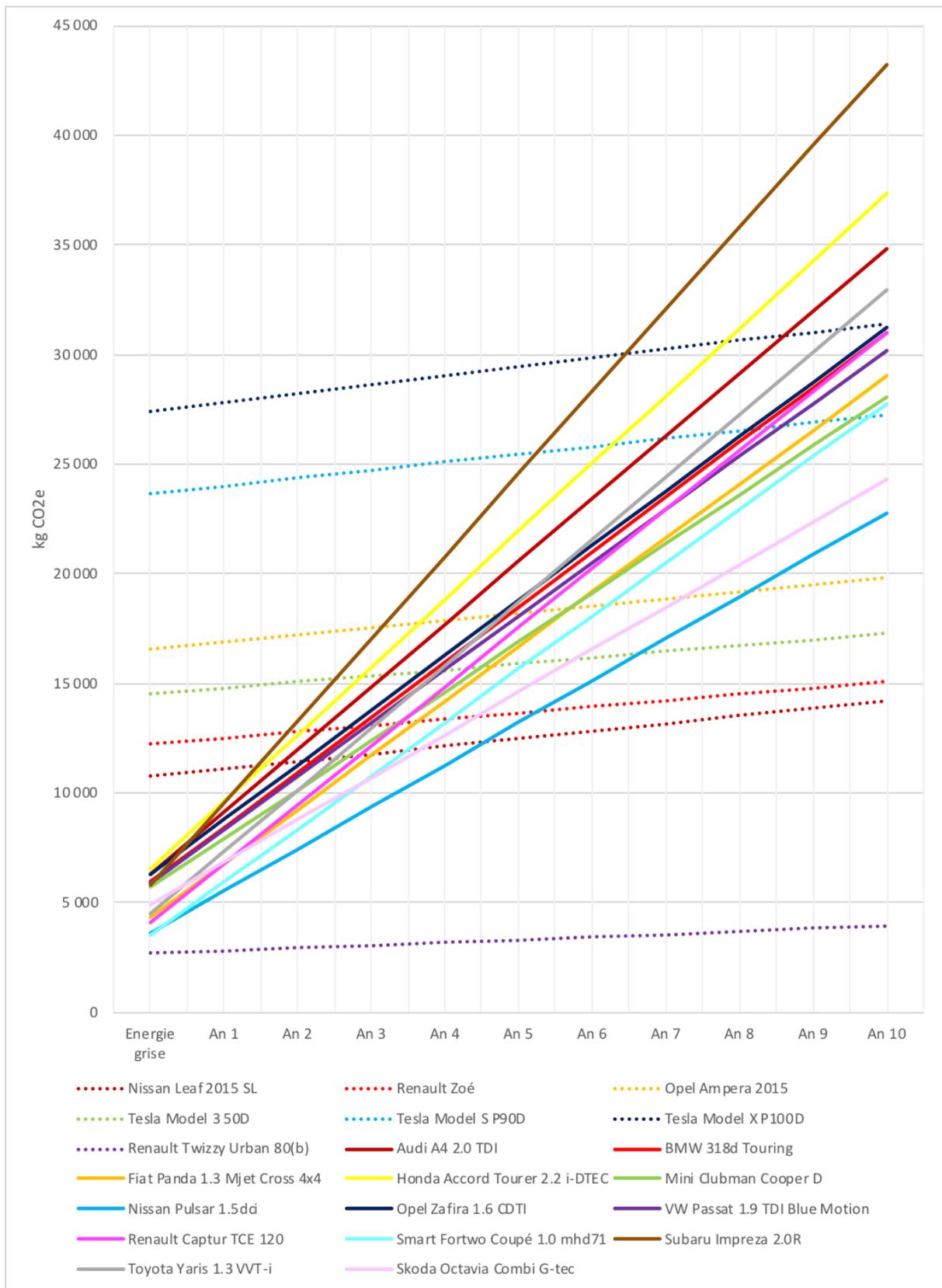


Figure 14 : Impact climatique des différents véhicules sur 10 ans (15.000 km par an), selon le mix de production électrique GREENLAND

Comme on le constate au travers de tous les diagrammes, même si cela se passe à des vitesses différentes, le différentiel majeur entre véhicules thermiques et électriques tient de ce que les premiers ont une énergie grise (un impact de fabrication) moins grande, tandis que les seconds ont un impact d'usage (le CO₂ par kilomètre parcouru) moins élevé. Cette combinaison fait qu'il n'y a pas de vérité universelle : la voiture électrique n'est pas d'office meilleure que la voiture thermique, ni vice-versa – cela dépend ! A ce stade, deux variables majeures sont déjà identifiées : la masse du véhicule, et le mix de production électrique utilisé pour recharger les véhicules électriques.

Afin de visualiser cet effet, la Figure 15 présente comment l'impact climatique sur 10 ans / 150 000 km se répartit, pour chaque véhicule, entre le CO₂e lié à l'énergie grise et celui lié aux kilomètres parcourus. Le diagramme de gauche l'indique pour des véhicules électriques roulant avec le mix BEL 2017, celui de droite avec des véhicules utilisant le mix COALAND (quant aux voitures thermiques, cela ne change rien). Au plus le mix de production électrique rejette peu de CO₂e, au plus l'énergie grise occupe une place primordiale dans le bilan des véhicules électriques, là où elle ne représente jamais plus de 20% pour les véhicules thermiques.

En plus de se soucier des rejets de CO₂ au niveau du pot d'échappement (ce qui fait penser – erronément – que le véhicule électrique n'a pas d'impact), l'Europe devrait se soucier de l'impact de la fabrication de ces véhicules, puisqu'il s'agit là de leur impact principal !

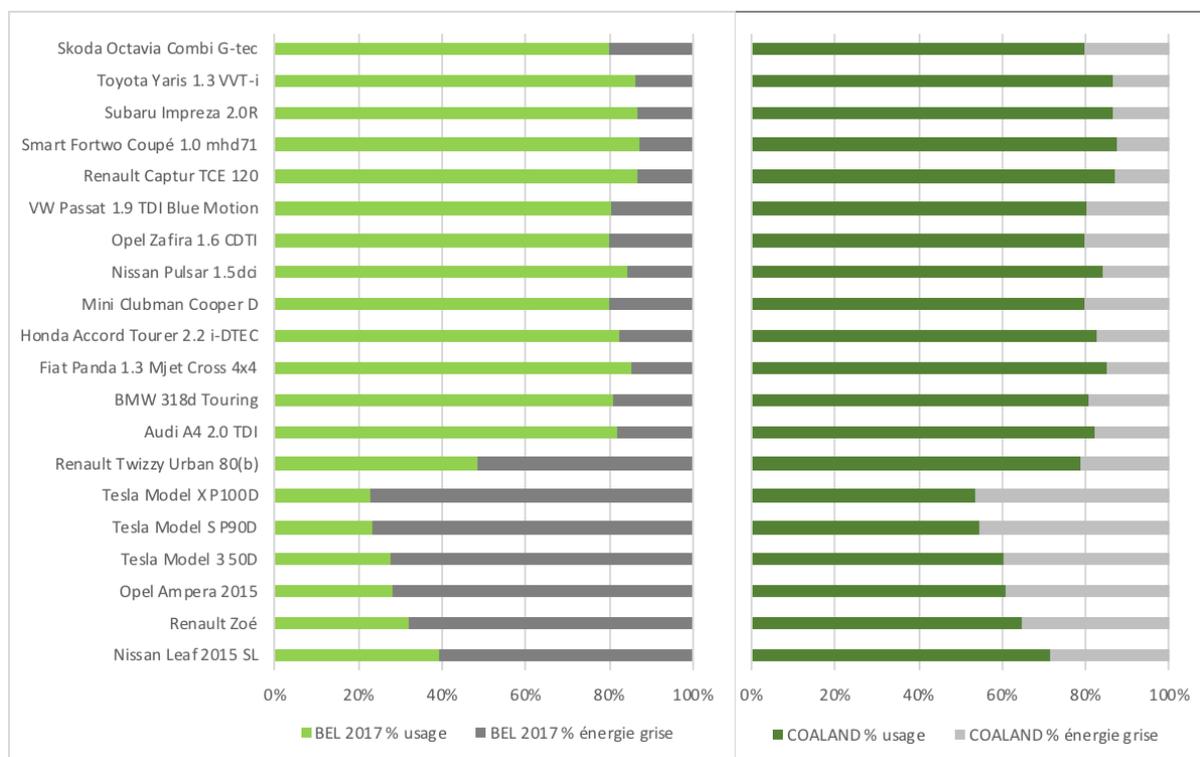


Figure 15 : Répartition de l'impact climatique entre l'usage et l'énergie grise des différents véhicules

3.2. Scénario 1bis : scénario 1 avec changement de batterie à 75 000 km

Et justement, eu égard à cette énergie grise, un doute subsiste au niveau des véhicules électriques : quelle est la durée de vie de leurs batteries ? Le scénario 1bis reprend donc les hypothèses du scénario 1 (15 000 km par an pendant 10 ans), mais considère le cas où la batterie des véhicules électriques nécessite d'être remplacée à mi-parcours (après 5 ans / 75 000 km). Bien qu'il s'agisse ici d'une simulation purement théorique, l'expérience de nombreux utilisateurs de véhicules électriques laisse à penser que cette hypothèse est plutôt réaliste.

L'impact est immédiat, tant d'un point de vue énergétique que climatique, sur lequel l'analyse se focalise²⁵.

3.2.a. Impact climatique

Le résultat en CO₂e est présenté aux Figure 16 à Figure 19 pour différents mix de production électrique. L'interprétation de ces différentes figures montre clairement que l'énergie grise des véhicules électriques (fabrication + remplacement de la batterie) devient très prédominante et nécessite dès lors des temps longs pour être « amortie » :

- Même avec un bon mix de production comme GREENLAND (83 g CO₂e / kWh, Figure 19), les « gros » véhicules électriques (Tesla model S ou X) ne sont jamais plus vertueux que les véhicules thermiques : l'impact de leur batterie, de grande capacité, n'est pas compensé par leur moindre impact de consommation. Les autres véhicules électriques continuent d'être intéressants mais avec une nuance : ainsi la Leaf est meilleure que la plupart des véhicules thermiques après 2 ou 3 ans (à l'exception de la Pulsar)... jusqu'à ce que sa batterie soit changée. A ce moment, il faut de nouveau 1 an ou 2 pour compenser l'effet de ce remplacement. Si le remplacement avait lieu dès la 3^{ème} année et non la 5^{ème}, l'intérêt de ces véhicules serait moins probant.
- Avec un mix de production très carboné comme celui de COALAND (83 g CO₂e / kWh, Figure 18), tous les modèles électriques étudiés perdent immédiatement leur intérêt en tant que moyen de lutter contre le changement climatique.
- Avec des mix de production entre ces deux extrêmes, tels BEL 2017 (165 g CO₂e / kWh, Figure 16) ou EU 2017 (302 g CO₂e / kWh, Figure 17), l'effet est intermédiaire. Comme déjà décrit en section 3.1.b, un modèle à batterie offrant une autonomie moyenne, comme la Nissan Leaf (autonomie de 144 km) est moins impactant que la plupart des modèles thermiques après 3 à 5 ans, mais nécessite un nouvel « amortissement » climatique dès que la batterie est remplacée. A nouveau, si le remplacement intervient avant 5 ans, il n'y a quasi plus de gain. Quant à des modèles à autonomie plus longue, comme l'Opel Ampera (autonomie de 304 km), leur impact n'est définitivement pas meilleur que celui des véhicules thermiques, et définitivement pire que celui des gabarits de taille petite ou moyenne.

Cela confirme ce qui était évoqué en fin de section 3.1.b : la fabrication (énergie grise) des véhicules électriques et de leur batterie joue un rôle crucial dans le bilan total, et est donc une troisième variable clé (après la masse et le mix de production électrique) de l'analyse.

²⁵ Pour le lecteur curieux d'en savoir plus, tous les chiffres et les diagrammes sont disponibles dans le fichier Excel joint au présent article.

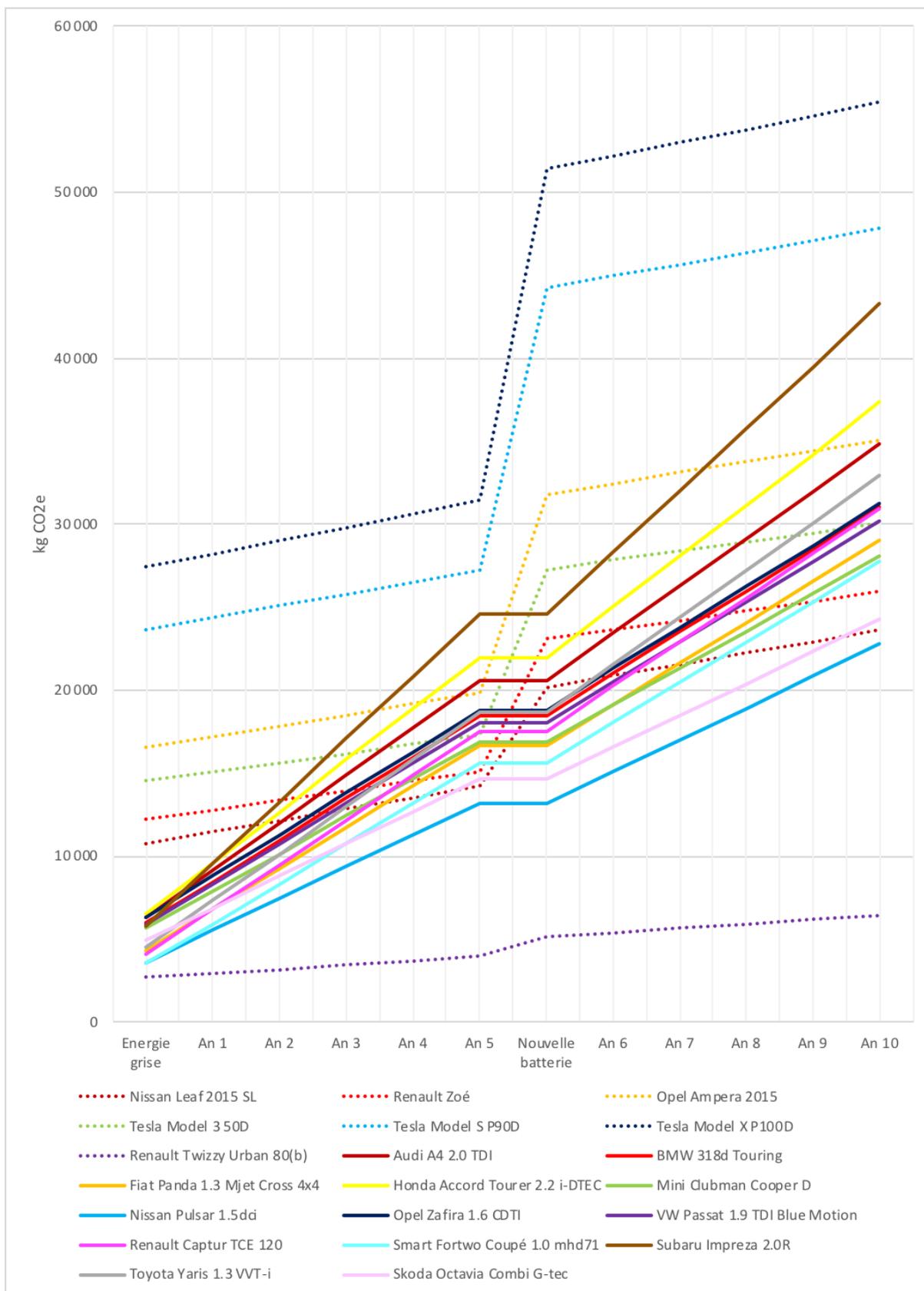


Figure 16 : Impact climatique des différents véhicules sur 10 ans (15.000 km par an) avec changement de batterie des véhicules électriques après 5 ans / 75 000 km, selon le mix de production électrique BEL 2017

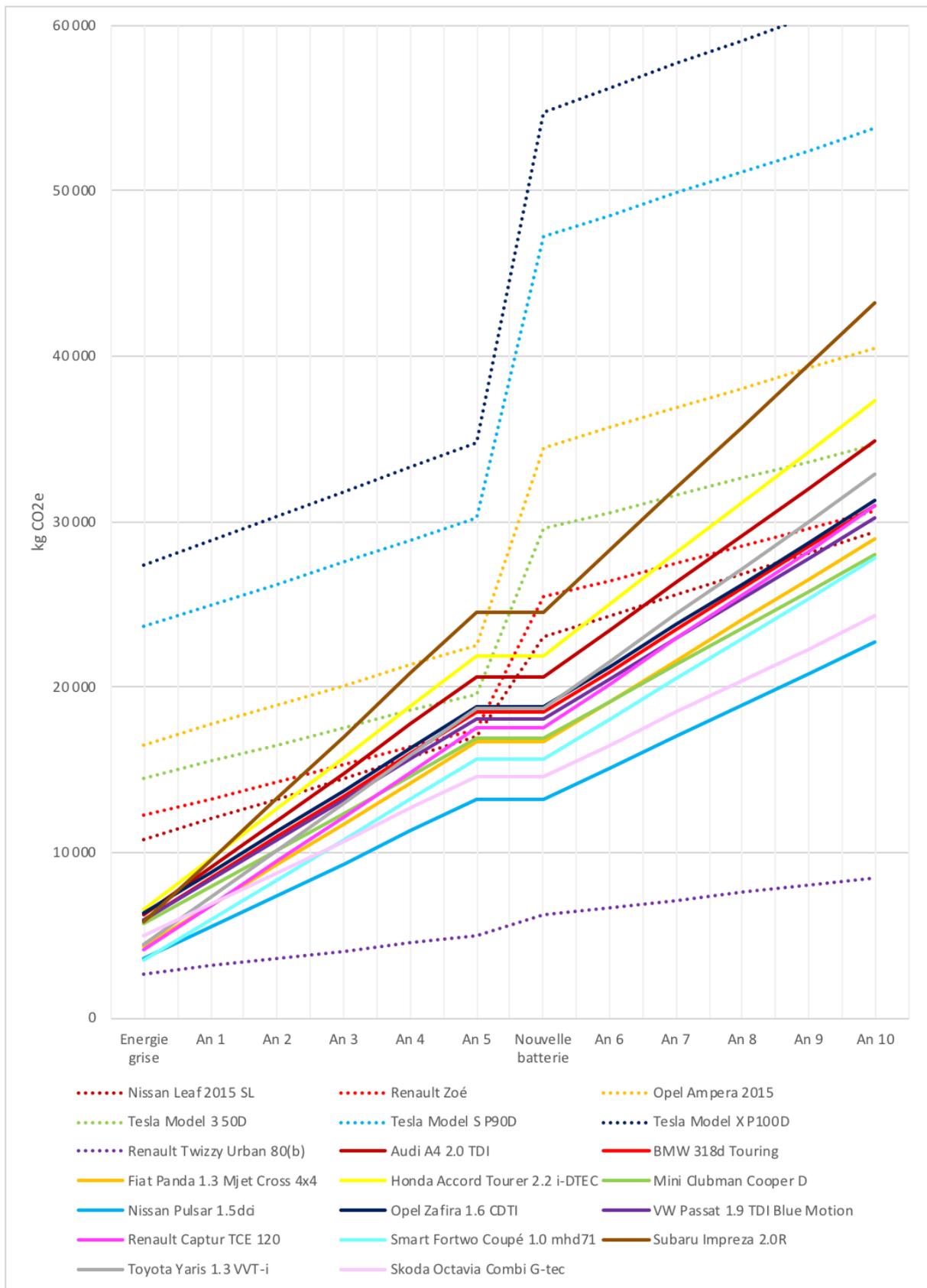


Figure 17 : Impact climatique des différents véhicules sur 10 ans (15.000 km par an) avec changement de batterie des véhicules électriques après 5 ans / 75 000 km, selon le mix de production électrique EU 2017

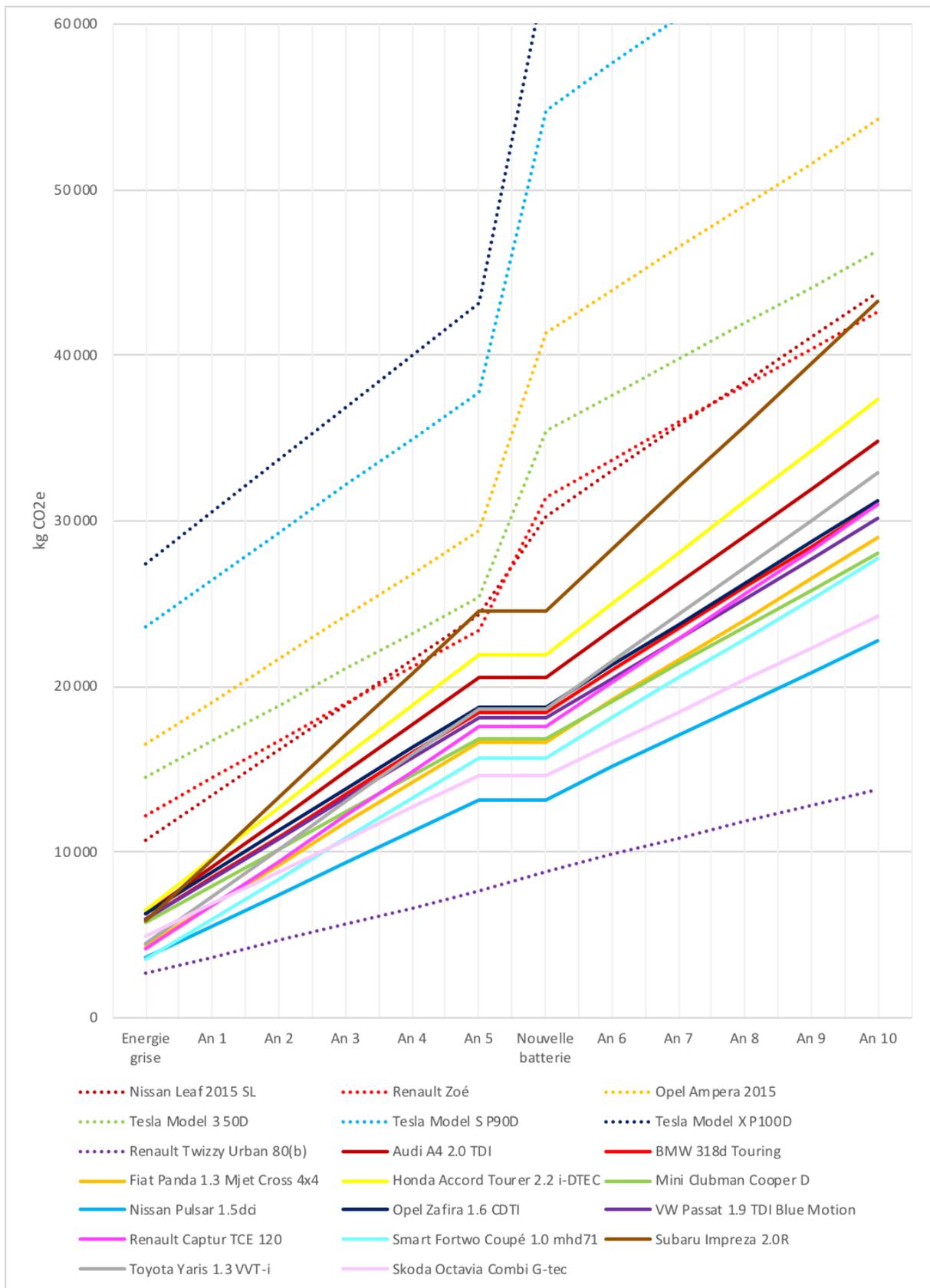


Figure 18 : Impact climatique des différents véhicules sur 10 ans (15.000 km par an) avec changement de batterie des véhicules électriques après 5 ans / 75 000 km, selon le mix de production électrique COALAND

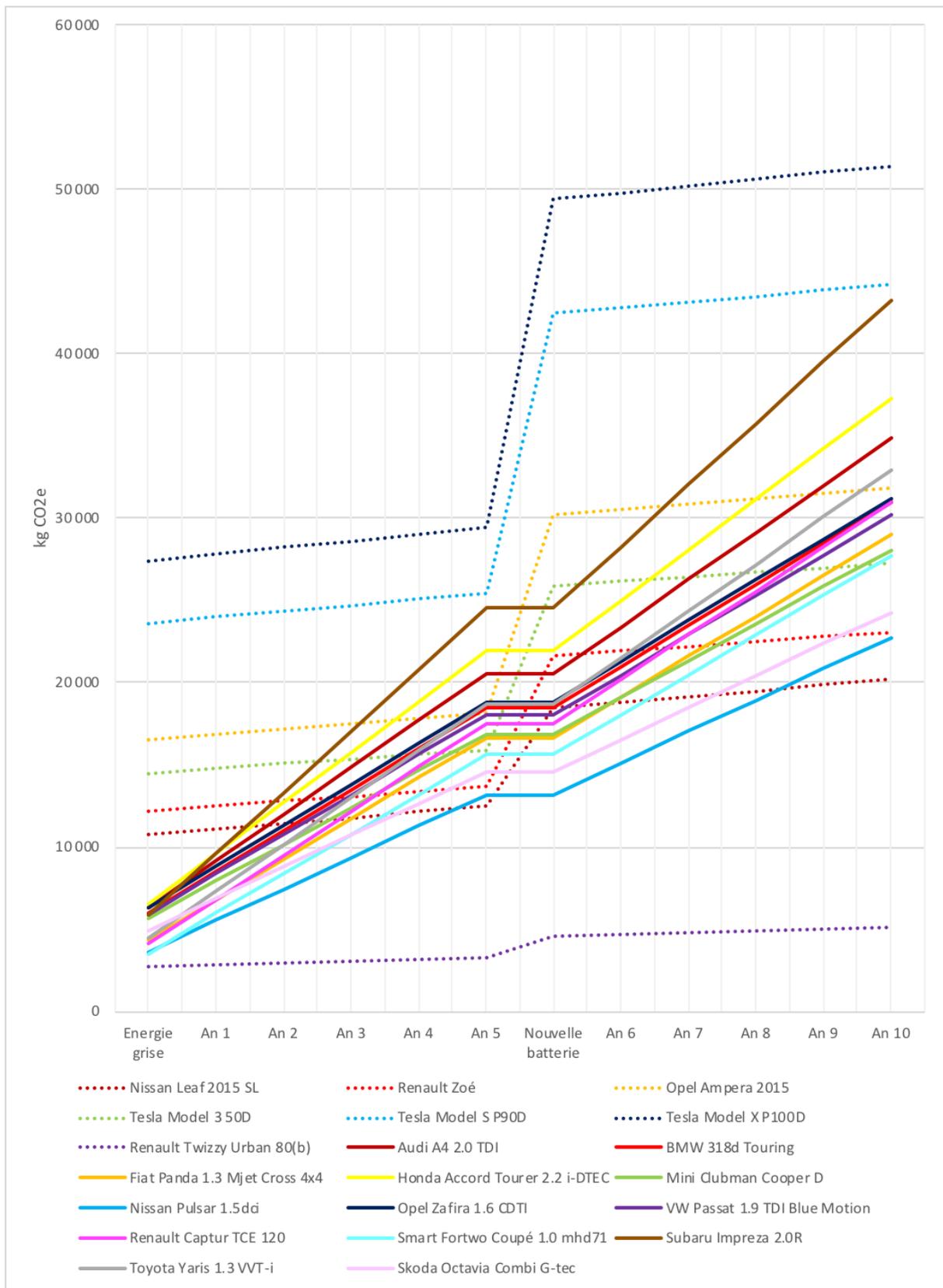


Figure 19 : Impact climatique des différents véhicules sur 10 ans (15.000 km par an) avec changement de batterie des véhicules électriques après 5 ans / 75 000 km, selon le mix de production électrique GREENLAND

3.3. Scénario 2 : 30 000 km /an pendant 4 ans

Le scénario 2 analyse un autre cas d'usage des véhicules, relativement répandu en Belgique : le leasing sur 4 ans, pendant lequel l'utilisateur – qui ne paie d'habitude pas son carburant – parcourt de l'ordre de 30 000 km chaque année. Dans ce cas, nous ferons l'hypothèse que le véhicule électrique ne requiert pas de changement de batterie et donc que celle-ci fonctionne encore correctement après 120 000 km.

3.3.a. Impact climatique

L'impact CO₂e pour le mix belge (165 g CO₂e / kWh, Figure 20) met à nouveau en évidence les choix à poser en termes de véhicule électrique pour être plus ou moins vite « vertueux » que différents véhicules électriques de gabarit différents. Le fait de parcourir un grand nombre de kilomètres permet néanmoins au véhicule électrique d'« amortir » plus rapidement l'impact de son énergie grise. En comparaison avec les conclusions de la section 3.1.b, les véhicules électriques nécessitent moins de temps pour « rattraper » l'impact de leurs alter egos thermiques :

- La Nissan Leaf a un impact climatique moins élevé que celui d'une Toyota Yaris après 1 an et demi (au lieu de 3), qu'une Smart Fourtwo après un peu plus de 2 ans (au lieu de 4), et qu'une Nissan Pulsar au bout de 3 ans (au lieu de 6). En première approximation, rouler deux fois plus permet au véhicule électrique de compenser deux fois plus vite son impact initial.
- Dans ce même cas, l'Opel Ampera avec sa plus grosse batterie nécessite respectivement 2 ans et demi, 3 ans et demi ou 4 ans et demi (au lieu de 5 et demi, 7 ou 10) pour être moins impactante que la Yaris, la Smart ou la Pulsar.
- Quant à un « gros » véhicule électrique tel la Tesla Model S, il ne parvient pas malgré les 120 000 km parcourus à afficher un bilan plus intéressant que celui de la plupart des véhicules thermiques (à l'exception des « gros » véhicules gourmands en carburant).

Il s'agit donc là d'un effet relatif : lorsqu'on parcourt beaucoup de kilomètres, le véhicule électrique devient plus vite intéressant que lorsqu'on en parcourt peu. Toutefois, dans l'absolu, il en résulte un impact climatique plus grand étant donné un surplus d'énergie totale dépensée. Dit autrement, rouler plus n'est pas une solution pour lutter contre le changement climatique ! Et même lorsque plus de kilomètres sont parcourus, le choix d'un véhicule électrique plutôt qu'un autre reste déterminant.

De manière similaire à ce qui a été vu précédemment, un mix de production moins carboné, comme GREENLAND ou NUCLAND, améliorera la performance relative des véhicules électriques, tandis qu'un mix plus carboné, comme EU 2017 ou COALAND, la dégradera²⁶.

²⁶ Nous renvoyons à nouveau le lecteur intéressé vers le fichier Excel fourni en annexe, qui comprend les tableaux et diagrammes pour différents mix de production.

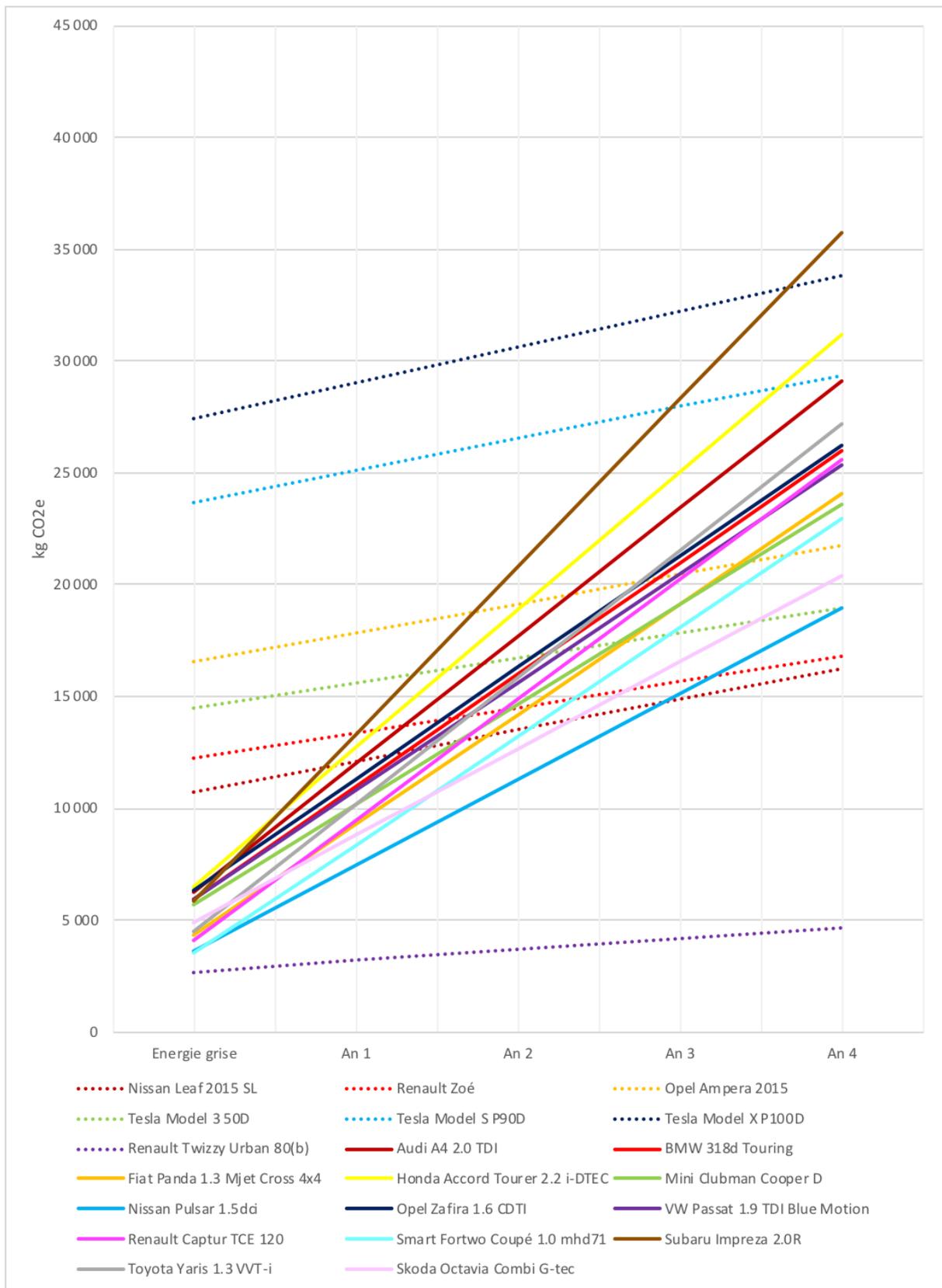


Figure 20 : Impact climatique des différents véhicules sur 4 ans (30.000 km par an), selon le mix de production électrique BEL 2017

3.4. Des types de mode de déplacement

En sus des analyses précédentes, un véhicule nécessite une analyse particulière. Il s'agit de la Renault Twizy, dont la courbe est systématiquement celle la plus basse (ligne en pointillés mauves) que ce soit sur des diagrammes énergétiques ou climatiques. Voilà donc le véhicule qui est définitivement le plus vertueux de tous, électriques et thermiques confondus !

En effet, avec sa masse de 474 kilos (pour 80 km d'autonomie réelle), il se démarque nettement du reste des véhicules étudiés, dont la masse moyenne est de 1487 kilos. Il ne permet d'embarquer qu'un seul passager, mais est donc définitivement meilleur que tous les autres véhicules lorsque ceux-ci aussi ne servent qu'à déplacer une seule personne !

Il nous paraît toutefois judicieux de comparer celui-ci à un autre mode de déplacement individuel, très pratique sur des trajets de distance modérée : le vélo. 15 000 km par an peuvent sembler une très grande distance à vélo, mais répartis sur 220 jours de travail, cela représente 20 km aller et 20 km retour chaque jour, le reste étant complété par les trajets autres (loisirs, vacances...). Si avec un vélo « normal » cela requiert un cycliste au quotidien en forme et motivé, le vélo électrique rend ce type de trajet plus confortable et réalisé en moins d'une heure, c'est-à-dire dans des temps similaires à ceux de la voiture aux heures de pointe²⁷ !

Comparons dès lors la Twizy à :

- Un vélo « normal », pesant 15 kilos et ne nécessitant aucun carburant à l'usage ;
- Un vélo électrique, modèle courant tel LFB CT26, affichant 25 kilos dont 10 de batterie qui avec ses 0.37 kWh fournit une assistance sur 40 km (réels, vs 50 km annoncés²⁸).

Considérant un impact de fabrication par kilo de vélo identique à celui d'une voiture, nous obtenons pour le mix de production BEL 2017 (165 g CO₂e / kWh), les courbes de la Figure 21. Le résultat serait identique avec les autres mix de production : le vélo, avec sa seule énergie grise de fabrication, reste la meilleure alternative. Mais il requiert évidemment sa dose d'huile de mollet. Pour atténuer celle-ci, le vélo électrique, utilisé en substitution à un véhicule, quel qu'il soit, est définitivement une solution d'avenir pour toute personne soucieuse d'enrayer le changement climatique car il permet d'éviter le rejet de nombreuses tonnes de CO₂e.

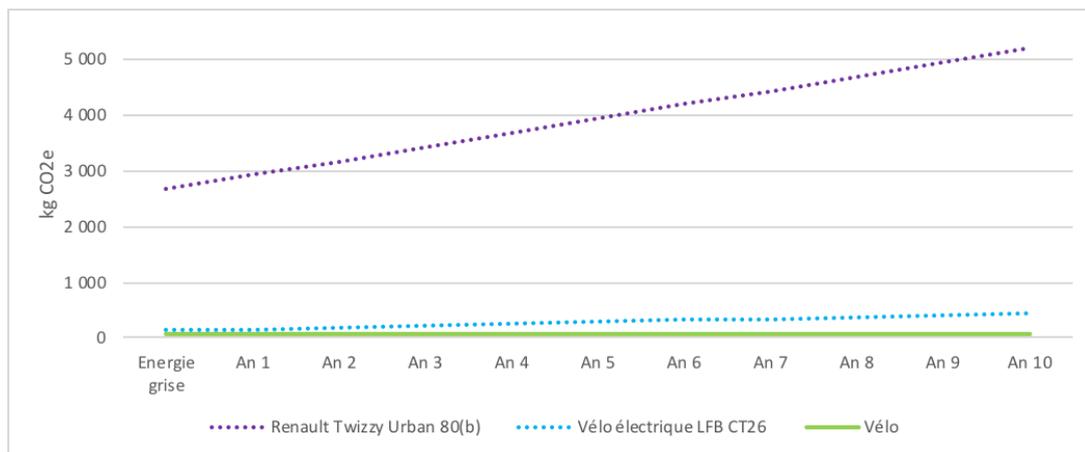


Figure 21 : Impact climatique sur 10 ans (150 000 km) de la Renault Twizy et des vélos, selon le mix de production électrique BEL 2017

²⁷ Qui est généralement de l'ordre de 15 km/h en ville aux heures « encombrées », comme en témoigne les relevés de la STIB avec des mesures sur les trams et bus bruxellois qui ne possèdent pas de voie en site propre, tel que [relaté le 24 mai 2017 par la Libre Belgique](#).

²⁸ Données reprises de sa présentation sur le blog <https://electrifiant.com/meilleur-velo-electrique/>

4. Conclusion

Si le véhicule électrique est une solution d'avenir, ne serait-ce qu'en raison de la fin prévue des combustibles fossiles, cela n'en fait pas un meilleur véhicule *de facto*. Ses avantages indéniables en termes de pollution sonore et de concentration des pollutions atmosphériques (dont les particules fines) à l'endroit de la production de l'électricité (ce qui permet de les traiter et de préserver la qualité de l'air dans les zones urbaines densément peuplées) font partie de leur attractivité. De même, dans le cadre d'une politique énergétique cohérente de développement des ressources renouvelables, le véhicule électrique pourrait également offrir une importante capacité de stockage distribuée. Mais nouveauté et innovation technologique ne suffisent pas à rendre le véhicule électrique meilleur dans l'absolu. Sa fabrication est notamment fortement consommatrice de ressources, métalliques en particulier. Et la présente étude visait à établir un bilan comparatif entre les véhicules électriques et thermiques d'un point de vue de leur impact climatique, c'est-à-dire leur contribution au changement climatique. En effet, cet argument est régulièrement cité comme le plus important pour inciter les citoyens et le monde politique à opter pour le véhicule électrique. Or, comme la présente analyse le démontre, le résultat à cet égard n'est pas si tranché que cela.

De tous les résultats présentés dans la présente étude, **quatre** facteurs d'influence ressortent très clairement et devraient, à défaut de contraintes légales, être rappelés à tout citoyen se posant la question du choix de son prochain véhicule :

1. Qu'il soit thermique ou électrique, la **masse du véhicule** est un des facteurs influant le plus sur son impact énergétique et climatique²⁹. Quand il s'agit de transporter un individu de 80 kg, utiliser un véhicule de 900 kilos ou de 2,5 tonnes n'a évidemment pas le même impact. Ce facteur est d'autant plus critique dans le cas du véhicule électrique que sa masse est fortement influencée par la présence d'une batterie de grande capacité (nécessaire pour garantir une certaine autonomie).
2. L'**origine de l'électricité** utilisée pour recharger le véhicule électrique joue un rôle critique. Le véhicule électrique sans plan de transition énergétique volontaire et maîtrisé ne résout absolument pas le problème climatique. Au contraire, il est même susceptible de l'aggraver.
3. Dans un véhicule électrique, l'**énergie grise** nécessaire à la fabrication du véhicule est prépondérante dans l'impact climatique du véhicule. En particulier, la **durée de vie de la batterie** et la nécessité – ou pas – de la remplacer régulièrement a une influence cruciale. Or, les constructeurs sont avares de commentaires et d'études à ce sujet. Il s'agit pourtant là d'un véritable sujet de société, car il serait plus que dommageable que les batteries de véhicules électriques ne s'avèrent pas plus efficaces (en termes de nombre de recharges) que celles de nos smartphones. L'incertitude quant à la durée de vie des batteries et à la nécessité de leur renouvellement dégrade encore singulièrement le bilan des véhicules électriques.
4. Finalement, la **durée d'usage** du véhicule joue un rôle critique dans le bilan complet, et est d'autant plus importante pour le véhicule électrique que celui-ci a une énergie grise (cf. point 3) plus importante. A l'heure où les moteurs monoblocs peuvent entraîner sans souci un véhicule sur plus de 500 000 km, il serait judicieux que des incitants existent pour que chacun conserve son véhicule le plus d'années possibles. En effet, là où l'impact climatique d'un de la fabrication d'un véhicule thermique est équivalent à environ 25 000 km parcourus par ce même véhicule, l'impact de la fabrication d'un véhicule électrique est équivalent³⁰ à plus de 150 000 km parcourus ! Avant d'acheter, ou de changer, de véhicule électrique, il serait judicieux d'opérer un choix pour du long terme.

²⁹ Ce facteur d'influence reste vrai quelle que soit la vitesse pratiquée. Toutefois, au-delà de 50 km/h un autre facteur devient dominant : la perturbation que le véhicule provoque dans l'air, liée à son coefficient Cx.

³⁰ Avec le mix de production BEL 2017 à 165 g CO₂e par kWh.

Alors, le véhicule électrique est-il meilleur que le véhicule thermique ?

Non, pas dans l'absolu.

Oui, si plusieurs points de veille sont adressés, dont :

- Un véhicule utilisé pour un grand nombre de kilomètres, et pas remplacé (trop) vite ;
- Des batteries électriques garanties pour un grand nombre de kilomètres et/ou d'années ;
- Une recharge des dites batteries à partir d'un mix de production électrique peu carboné ;
- Et un véhicule le plus léger possible, adapté à la charge utile qu'il va réellement transporter.

Sur ce dernier point, il semble intéressant de comparer le ratio « masse utile transportée » / « masse du véhicule » entre différents modes de transport. Pour un passager de 80 kilos (utiles),

- Les véhicules thermiques étudiés affichent un ratio de 0,05 à 0,09 ;
- Les véhicules électriques étudiés affichent un ratio inférieur de 0,03 à 0,06, à l'exception de la Renault Twizy (0,17) ;
- les transports en commun proposent eux un ratio supérieur de l'ordre de 0,12 pour le train et de 0,5 pour le bus ;
- quant au vélo électrique il présente un ratio bien supérieur, de l'ordre de 3 à 4 !

Le véhicule électrique s'il doit advenir serait certainement plus adapté en proposant une offre plus diversifiée que des seules voitures, et en permettant à chacun d'utiliser des véhicules adaptés à ses besoins, d'un vélo électrique pour rejoindre la gare des bus ou trains électriques au quotidien, à une voiture familiale électrique pendant les 3 semaines nécessaires à partir en vacances à 4. Alors, oui, le véhicule électrique aura des effets bénéfiques.

5. Méta-Conclusion

Nous avons tenté de reconstituer une chaîne la plus complète possible et de la présenter de la manière la plus logique et compréhensible possible. Quant aux chiffres et hypothèses qu'il a bien fallu poser, nous avons également tenté de reprendre les chiffres les plus communément partagés et donc les moins contestables. Nous sommes bien conscients que diverses imperfections sont sans doute encore présentes : communiquez-les nous ! Nous mettrons un point d'honneur à intégrer les différents commentaires et à remettre à jour la présente étude en conséquence. Et pour les plus matheux d'entre nos lecteurs et lectrices, le fichier Excel qui modélise tous les tableaux et figures de l'article est disponible en pièce jointe.

Cet article est né de la volonté d'y voir plus clair, tant certaines publications récentes étaient perturbantes en termes de conclusion. Outre plusieurs des études déjà citées préalablement, l'article « Life Cycle Analysis of the Climate Impact of Electric Vehicles » (Vrije Universiteit Brussel - research group MOBI) relayée par [Transport & Environment](#), propose des conclusions radicalement opposées aux nôtres. Celles-ci ont d'ailleurs été largement répercutées dans la presse internationale, *The Guardian* titrant notamment « [Electric cars emit 50% less greenhouse gas than diesel, study finds](#) » et citant le porte-parole de T&E selon lequel cette affirmation demeure vraie même dans la très carbonée Pologne : « *We've been facing a lot of fake news in the past year about electrification put out by the fuel industry but in this study you can see that even in Poland today it is more beneficial to the climate to drive an electric vehicle than a diesel.* »

De telles conclusions sont atteintes notamment grâce aux quelques hypothèses suivantes de ladite étude :

- Si une pénalité forte est bien appliquée aux véhicules thermiques par rapport à leur consommation NEDC, la même pénalité n'est pas appliquée au véhicule électrique, qui aurait donc pour propriété de ne pas consommer plus dans la réalité que dans ce test.

- Aucune mention n'est faite quant aux pertes de réseau ni à l'efficacité du chargeur de batterie.
- Les hypothèses sont peu claires sur la fabrication des véhicules, mais des différentes études citées (dont l'étude la plus récente sur les batteries de véhicules électriques que nous citons en note de bas de page 23 et qui conclut, elle, à un impact de 150 à 200 kg CO₂e par kWh de batterie), les auteurs retiennent apparemment exclusivement les hypothèses basses pour injecter dans leur calcul un « poids carbone » de 55 kg CO₂e par kWh de batterie. Sur la base de la batterie d'une Tesla modèle 3, cela revient à 6 kg de CO₂e par kilo de batterie : le même ordre de grandeur que pour du film plastique PET.

Nous avons, sans succès, contacté l'auteur de cette étude et le porte-parole de T&E.

Alors, nous ne pouvons qu'appeler de nos vœux l'enclenchement d'un débat soutenu par des discussions et des calculs ouverts. Car si chaque étude se base sur des hypothèses radicalement différentes, et souvent partielles, dictées par son commanditaire et l'objectif politique de celui-ci, le citoyen n'a aucune chance de s'y retrouver... et la planète peu de chance d'en réchapper. N'hésitez pas à nous écrire sur energie-vehicule@sonterra.eu, cette adresse redirige vers les deux auteurs : nous nous ferons un plaisir de vous répondre et d'intégrer les éléments que vous nous aurez apportés dans une nouvelle version du présent article.

Remerciements

Les auteurs tiennent à exprimer leur reconnaissance à tous ceux et celles qui les ont soutenus par leurs encouragements et leurs commentaires. Ils remercient particulièrement Maxime Pochet, Elise Dupont, Raphaël Montfort, Frédéric Chomé, Benoit Herman, Véronique Bragard, Pierre Courbe.

Annexe 1 : évaluation des taux d'émission consolidée des centrales au charbon et au gaz

Afin de focaliser l'article sur le comparatif entre véhicules électriques et thermiques, les facteurs d'émissions en CO₂e par kWh produit par différents types de centrales ont été repris des derniers rapports du GIEC (IPCC en anglais, cf. note de bas de page #16).

Ainsi les valeurs médianes retenues pour les émissions **directes** (auxquelles il s'agit de rajouter les infrastructures et les rejets de méthane là où cela s'applique) de CO₂, telles que référencées en page 1335 de l'annexe III « [Technology-Specific Cost and Performances Parameters](#) » du rapport du GIEC, indiquent :

- Pour le charbon : 760 gCO₂/kWh
- Pour le gaz en cycle combiné : 370 gCO₂/kWh

Toutefois, ces valeurs s'éloignent significativement des taux d'émission calculables par bilan, comme il est démontré dans la présente annexe.

A partir de la composition massique d'un combustible, il est en effet aisé de calculer le taux d'émission directe de CO₂ par kg de combustible brûlé. En divisant ce rapport par le pouvoir calorifique (kWh_{th}/kg), on obtient le taux d'émission directe exprimé en g CO₂/kWh_{th}.

Puisque le rendement de la centrale nous renseigne sur la fraction d'énergie et transformée en électricité, on peut exprimer le taux d'émission par kWh électrique (kWh_{el}) en divisant les g CO₂/kWh_{th} par le rendement de la centrale pour obtenir des gCO₂/kWh_{el}. Enfin de l'énergie est également nécessaire pour extraire et transformer la ressource que la centrale va utiliser. On peut donc définir un rendement énergétique de production qui tient compte de ce travail préparatoire. En divisant le taux d'émission exprimé en g CO₂/kWh_{el} par ce rendement on obtient finalement les gCO₂/kWh_{el}.

Le taux médian d'émission directe adopté par le GIEC pour le charbon est de 760 g CO₂/kWh. En retenant un charbon sous-bitumineux (du « British Cotgrave ») parmi les moins émetteurs de CO₂, on peut conclure que ce taux correspond à un rendement de 44.3%, comme illustré à la figure ci-après établie selon l'approche détaillée dans le paragraphe précédent. Cette valeur médiane retenue par le GIEC est anormalement basse en regard des meilleurs rendements atteints actuellement dans les seules centrales supercritiques comme celles de Rotterdam et Wilhelmshaven (46%). La valeur la plus basse clamée par le GIEC pour une centrale au charbon, 670 g CO₂/kWh, correspondrait à un rendement de 50,2% !

Un rendement moyen plus représentatif de 38% conduit à des taux d'émission directe de 885,8 g CO₂/kWh. Si l'on applique un rendement énergétique de production du combustible de 92%, on obtient un taux d'émission consolidée de 962,8 gCO₂/kWh !

Le même raisonnement, appliqué à une centrale au lignite brûlant du « German Lausitzer Nochten » conduit à un taux d'émission directe de 1106,2 gCO₂/kWh avec un rendement moyen de 36% en raison du traitement des fumées, soit 1202,4 g CO/kWh en émission consolidée. Dans cette technologie, le rendement maximal réalisé est de 44%.

Dans le cas du gaz, le taux d'émission directe est de 370 gCO₂/kWh. En retenant un gaz naturel destiné à un usage industriel, on obtient un rendement médian des centrales à cycle combiné de 54,6% représentatif des valeurs actuelles; pour mémoire, la meilleure performance énergétique a été réalisée à la centrale de Bouchain en France avec 62%. Avec un rendement énergétique de production de 86%, on obtient un taux d'émission consolidée de 430,2 g/kWh, qui est lui par contre inférieur aux 490 g/kWh médian du rapport du GIEC.

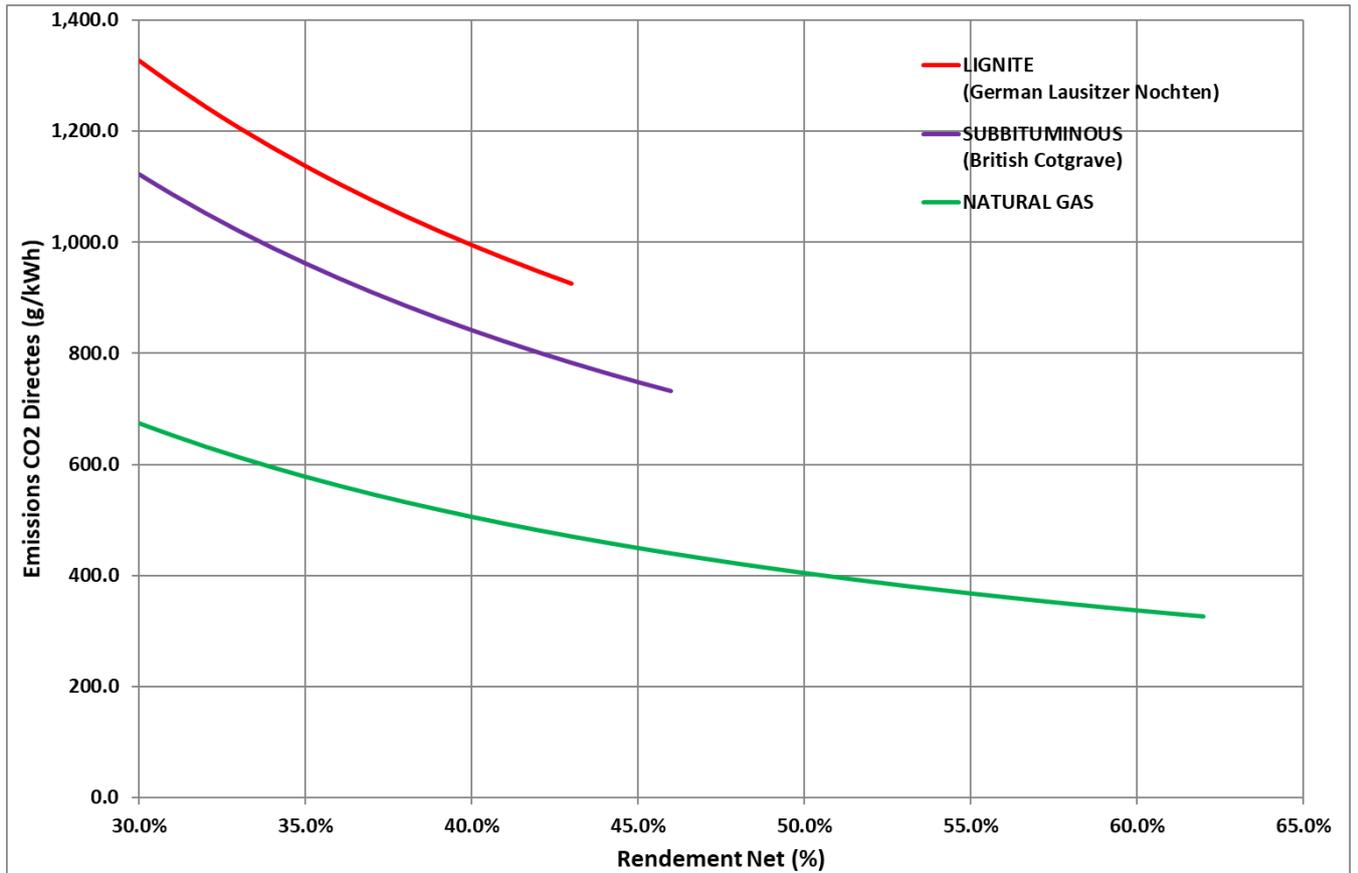


Figure 22 : Taux d'émission directe en centrale charbon et gaz

Des données plus conformes à cette réalité sont celles par exemple utilisées par le logiciel SimaPro, en provenance de la base [EcolInvent](#) (et qui incluent dans la table ci-dessous l'impact des infrastructures et du méthane) :

Source	[g CO2 eq/kWh]
Charbon (Allemagne)	1370
Pétrole (Allemagne)	1180
Gaz naturel (BEL)	550
nucléaire (BEL)	16
photovoltaïque (BEL)	128
Eolien onshore (BEL)	22
Eolien offshore (BEL)	19
Hydro rivière (FR)	5
Moyenne UE	534,8

Figure 23 : Taux d'émission annoncé par EcolInvent pour différents moyens de production d'électricité

Une analyse plus approfondie de la démarche appliquée par le GIEC pour parvenir à des valeurs nettement plus faibles prend dès lors tout son sens.

Annexe 2 : discussion sur l'énergie grise

Fabrication du véhicule

Ces chiffres de Volkswagen sont supérieurs à ceux utilisés par des prestataires de l'ADEME dans une étude de 2012³¹, où il est fait mention de l'ordre de³² 17.000 kWh / 3500 kg CO₂e pour la fabrication d'un véhicule, et de l'ordre de 14.000 kWh / 3500 kg CO₂e pour la batterie d'un véhicule électrique. Une autre étude, réalisée également par PE International³³, considère, elle, un impact climatique de 5040 kg CO₂e pour la fabrication d'un véhicule thermique et de 9610 kg CO₂e pour la fabrication d'un véhicule électrique (en 2012, avec une diminution de 10% à l'horizon 2030).

Même si elle se base principalement sur de l'électricité française, l'étude de l'ADEME semble en effet indiquer des hypothèses basses, la réalité étant vraisemblablement plus proche des valeurs affichées par les autres études. Une simple simulation des coûts de fabrication des matières de base, non usinées et non assemblées (alors que l'étude sur la Golf montre une énergie d'assemblage égale à au moins 80% de l'énergie de génération des matières) via des données très génériques (issues de Ecoinvent³⁴ 2.0) sur la fabrication d'un véhicule moyen tel que considéré par l'étude ADEME, atteste déjà de plus de 15.000 kWh et 2 800 kg CO₂e comme démontré dans le tableau ci-dessous.

Composants	Matière équivalente & source	Facteurs Ecoinvent 2.0		Véhicule Thermique Diesel			Véhicule Thermique Essence			Véhicule Electrique		
		Impact énergétique kWh / kg	Impact climatique kg CO ₂ e / kg	Poids dans VTD "moyen" (kg)	Impact énergétique (kWh)	Impact climatique (kg CO ₂ e)	Poids dans VTE "moyen" (kg)	Impact énergétique (kWh)	Impact climatique (kg CO ₂ e)	Poids dans VE "moyen" (kg)	Impact énergétique (kWh)	Impact climatique (kg CO ₂ e)
Matériaux ferreux et en acier (kg)	Acier courant faiblement allié (Ecoinvent 2.0)	7.34522676	1.7456	711	5222.46	124112.16%	681	5002.10	118875.36%	658	4833.16	114860.48%
Alliages légers et alliages corroyés (kg)	Aluminium mix moulé européen (Ecoinvent 2.0)	11.8769279	3.0334	65	772.00	19717.10%	61	724.49	18503.74%	64	760.12	19413.76%
Métaux non ferreux lourds, fonte (kg)	Acier de coulé (Ecoinvent 2.0)	6.77969767	1.5069	37	250.85	5575.53%	38	257.63	5726.22%	35	237.29	5274.15%
Métaux spéciaux (kg)	Aluminium neuf (Ecoinvent 2.0)	44.461289	11.917	0.15	6.67	178.76%	0.08	3.56	95.34%	0.03	1.33	35.75%
Matériaux polymères (kg)	PVC (Ecoinvent 2.0)	16.6683336	1.9999	218	3633.70	43597.82%	217	3617.03	43397.83%	208	3467.01	41597.92%
Polymères transformés (kg)	PVC (Ecoinvent 2.0)	16.6683336	1.9999	15	250.03	2999.85%	15	250.03	2999.85%	15	250.03	2999.85%
Autres matériaux et matériaux composés (kg)	PVC (Ecoinvent 2.0)	16.6683336	1.9999	43	716.74	8599.57%	39	650.07	7799.61%	39	650.07	7799.61%
Electronique (kg)	(Ecoinvent 2.0)	1224.72383	274.86	3	3674.17	82458.00%	3	3674.17	82458.00%	4	4898.90	109944.00%
Carburants et auxiliaires (kg)	Fuel oil léger (Ecoinvent 2.0)	15.068784	0.50545	60	904.13	3032.70%	60	904.13	3032.70%	10	150.69	505.45%
Total				1152.15	15430.7331	2902.71485	1114.08	15083.1944	2828.88646	1033.03	15248.592	3024.3097

Tableau 9 : Reconstitution (simplifiée) des impacts énergétiques et climatiques de l'approvisionnement en matière des trois véhicules « moyens » de l'étude ADEME

Notons au passage que dans tous ces inventaires de matériaux composant un véhicule, la part d'électronique est étonnamment faible (dans les Golfs, il n'y en aurait même pas !), alors que ces dernières années ont vu des composants électroniques apparaître dans toutes les parties du véhicule, de l'injection au tableau central, et ce sans même compter la tendance de plus en plus marquée à doter l'habitacle d'écrans interactifs géants. Or, de tous les matériaux, les composants électroniques sont ceux qui ont un impact énergétique et environnemental parmi les plus élevés par kilo (de l'ordre de 80 kg CO₂e pour chaque kilo d'électronique embarquée).

³¹ "Elaboration selon les principes des ACV des bilans énergétiques, des émissions de gaz à effet de serre et des autres impacts environnementaux induite 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", étude réalisée en 2012 pour le compte de l'ADEME par Gingko21 et PE INTERNATIONAL

³² Les chiffres finaux de l'étude ne sont pas fournis de manière précise, via des tableaux, mais uniquement représentés sur des diagrammes, avec une échelle très large.

³³ [Life Cycle CO₂e Assessment of low carbon cars 2020 – 2030](#), Final Report, PE International for the Low Carbon Vehicle Partnership, 2013.

³⁴ Base de données d'analyses de cycle de vie, cf. <https://www.ecoinvent.org/>

Fabrication de la batterie

Une première approche serait de prendre la moyenne de ces valeurs (139 kWh par kWh de capacité). Toutefois, si l'on applique cela à la batterie d'une Tesla modèle 3, cette valeur semble nettement sous-estimée : ladite batterie pèse 450 kilos pour une capacité de 50 kWh, ce qui signifie dès lors que sa production requiert 15.4 kWh par kilo : moins que pour produire du PVC ! Et également moins que le coût énergétique moyen de production d'un véhicule tel que retenu plus haut.

Pour ce qui est de l'impact climatique, le montant moyen de l'étude (175 kg CO₂e par kWh de capacité) résulte, toujours après application à la batterie d'une Tesla Model 3, en un impact de 19,44 kg CO₂e par kg de batterie, soit deux fois celui de l'aluminium neuf (9,83 kg), un des matériaux « purs » dont la fabrication est la plus impactante. Ceci semble cohérent, car outre l'extraction et le traitement des métaux, une batterie requiert en outre de travailler ceux-ci en « feuillards » imprimés via un processus industriel relativement complexe³⁵.

³⁵ Brève illustration du processus dans cette vidéo accessible en ligne : <http://www.dailymotion.com/video/xc9g2d>

Corrections et Addendums

Modifications apportées depuis la publication originale du 6 juin 2018.

9 juin 2018 :

- Correction du PCI du diesel : 9,7396 kWh/l (au lieu des 11,19 initialement utilisés)
- Correction de tous les tableaux, graphes et commentaires en conséquence
- Ajout d'un commentaire sur la consommation de ressources (page 34)
- Ajout de courbes de rendement de chargeur (page 11)