

Quelles justifications pour un développement massif du véhicule électrique en France ?

Benjamin Dessus

Introduction

En présentant les mesures de son projet de loi sur la transition énergétique concernant les transports le 18 juin dernier, mesures confirmées par le texte de loi sur la transition énergétique actuellement en discussion au parlement¹, Ségolène Royal a insisté sur celles qu'elle comptait mettre en œuvre pour permettre un développement très ambitieux du véhicule électrique : faire passer le bonus écologique déjà important qui s'applique à ce véhicule de 6300 euros à 10000 euros si le nouveau véhicule remplace un véhicule diesel et développer un réseau de sept millions de bornes de recharge de ces véhicules d'ici 2030. C'est dire l'importance que la ministre semble accorder à une pénétration massive du véhicule électrique dans notre pays pour répondre aux exigences de la transition énergétique et aux questions sanitaires soulevées par le parc diesel actuel. Bien que l'objectif en nombre de véhicules électriques en 2030 ne soit pas indiqué, on imagine bien que l'édification d'un réseau de sept millions de bornes ne se justifierait pas si le nombre de véhicules utilisateurs n'atteignait pas des valeurs du même ordre, voire supérieures. C'est donc une part importante du parc français, de 25 à 30 %, qui devrait passer à l'électricité d'ici 2030.

Les justifications principales généralement évoquées à ce développement sont principalement la réduction de notre dépendance pétrolière, la réduction des pollutions particulières, des pollutions sonores et des émissions de gaz à effet de serre.

Un tel développement sur le territoire national entraîne une série de questions que nous nous proposons d'aborder dans cet article et qui concernent le véhicule lui-même, les infrastructures spécifiques qui lui sont indispensables et la gestion de la production et de la distribution d'électricité qu'entraîne l'usage d'un parc de cette ampleur. Ces questions concernent plusieurs aspects :

- Les ressources énergétiques et minérales (indépendance énergétique, économies d'énergies fossiles, minéraux rares).
- L'environnement et la santé (effet de serre, pollution atmosphérique, pollution sonore).
- L'économie (coût pour la collectivité, pour les ménages, pour les finances publiques).
- Les conditions d'accès à la mobilité.

1 - Projet de loi relatif à la transition énergétique pour la croissance verte.

Le véhicule électrique

Un véhicule électrique est entraîné par un moteur électrique lui-même alimenté par des batteries embarquées lui conférant actuellement une autonomie de l'ordre de 100 à 150 km. Les bonnes performances des moteurs électriques, la diminution des pertes de frottement que permettent les transmissions électriques en lieu et place des transmissions mécaniques et la capacité des batteries à récupérer l'énergie de freinage en font un véhicule performant. Les véhicules particuliers actuels d'entrée de gamme consomment de 12 à 20 kWh au 100 km².

Bien entendu la consommation d'énergie primaire aux 100 km du véhicule est nettement supérieure à ces chiffres car la production d'électricité, son transport et sa distribution entraînent des pertes importantes. En France par exemple il faut en moyenne, avec le parc actuel, plus de 3 kWh d'énergie primaire pour distribuer 1 kWh à l'utilisateur. La consommation d'énergie primaire d'un petit véhicule électrique se situe donc en moyenne en France

entre 38 et 63 kWh/100 km, soit l'équivalent de 3,6 à 6,1 litres aux cent km d'essence, du même ordre de grandeur que celle des voitures thermiques de même gamme.

Les émissions de gaz à effet de serre associées au fonctionnement d'un véhicule électrique alimenté par le réseau d'électricité nationale sont très faibles en moyenne annuelle, de l'ordre de 16 à 22 g_{eq} CO₂/km², bien inférieures à celles d'un véhicule thermique équivalent qui se situent autour de 120 g/km. Ces excellentes performances d'émission peuvent pourtant se dégrader considérablement en période de pointe hivernale où RTE est amené à solliciter des centrales à charbon ou à gaz françaises ou étrangères.

** Compte tenu des pertes de recharge de la batterie et des fonctions accessoires du véhicule tel que le chauffage et l'éclairage.*

*** Le contenu moyen en eq CO₂ de l'électricité en France est de 110 g/kWh mais peut atteindre en pointe 600 à 700 g/kWh en période de pointe d'hiver.*

1 - L'analyse du cycle de vie du véhicule électrique

Les analyses de cycle de vie (ACV) dont on dispose permettent d'instruire les questions concernant les consommations énergétiques et l'environnement. En particulier on dispose, grâce à l'Ademe, d'une ACV comparative de véhicules électriques et thermiques (diésel et essence) récente (2012) pour la France et l'Allemagne² dont les principaux résultats apparaissent ci-dessous.

Les principaux paramètres choisis pour l'étude ACV de l'Ademe

- 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 des véhicules thermiques mesurées sur le cycle de conduite normalisé européen NEDC.
- Utilisation dans chacun des pays du véhicule électrique avec le mix électrique moyen du pays.
- Durée de vie de la batterie identique à la durée de vie du véhicule (150 000 km sur 10 ans).
- Facteur d'émission de gaz à effet de serre de l'électricité en 2012 pour la France de 110 g_{eq} CO₂/kWh et de 623 g_{eq} CO₂/kWh pour l'Allemagne.

1.1 - Consommation d'énergie primaire totale

Pour aborder la question de la ponction effectuée sur les ressources énergétiques, il est indispensable d'effectuer une analyse complète des dépenses énergétiques primaires effectuées à la production, à l'usage et en fin de vie des différents véhicules. C'est l'objet de la figure 1.

² - Niels Warburg et al. *Élaboration selon le principe des ACV des bilans énergétiques des émissions de gaz à effet de serre et des autres impacts environnementaux induits par l'ensemble des filières électriques et de véhicules thermiques. Ademe 2013.*

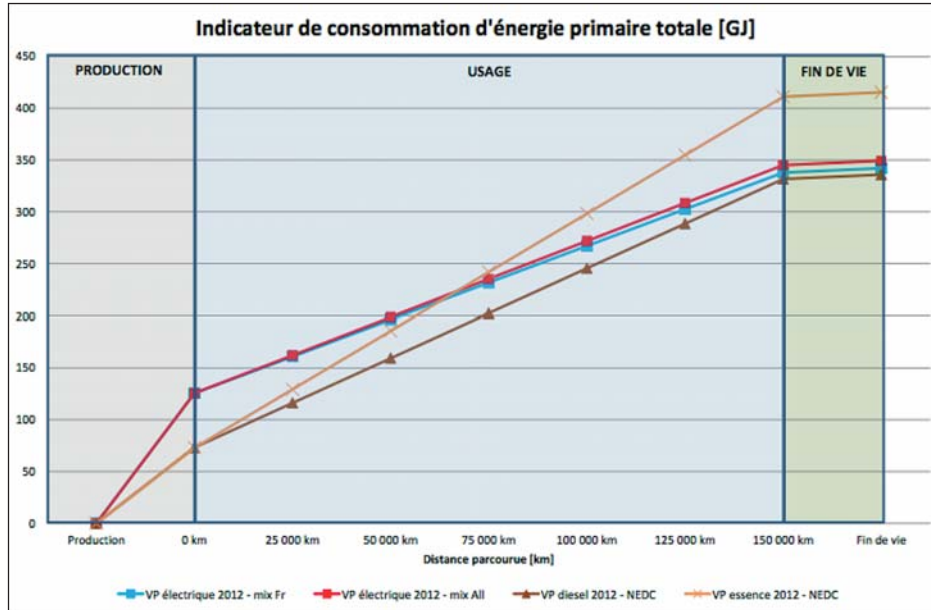


Fig 1 : Consommation d'énergie primaire totale des véhicules électriques français et allemand et des véhicules thermiques essence et diesel de même catégorie en 2012.

Source : Étude ACV Ademe

Ce graphique indique les dépenses d'énergie primaire à consentir dans les différents cas.

La fabrication d'un véhicule électrique entraîne une consommation d'énergie primaire nettement plus élevée (125 GJ, 3 tep³) que celle d'un véhicule thermique équivalent (75 GJ, 1,8 tep). Cette consommation élevée est due à la fabrication de la batterie. Par contre les consommations d'usage du véhicule électrique sont dans tous les cas inférieures à celles des véhicules thermiques :

- Véhicule électrique : 5,3 tep pour 150 000 km (35 gep/km).
- Véhicule diesel : 6,1 tep pour 150 000 km (41 gep/km).
- Véhicule essence : 8,2 tep pour 150 000 km (55 gep/km).

Globalement, le véhicule électrique et le véhicule diesel affichent des consommations totales très voisines en France et en Allemagne pour 150 000 km et le véhicule essence une consommation supérieure de plus de 20 %.

Par contre les énergies primaires en cause se répartissent selon le tableau suivant :

Tep	Carburant pétrolier	combustibles fossiles (charbon, gaz, pétrole)	Uranium	Renouvelables
Véhicule électrique	ε*	3,5	4,6	0,2
Véhicule diesel	6,1	1,8	ε	ε
Véhicule essence	8,2	1,8	ε	ε

Tableau 1 : Consommation d'énergie primaire par source des différents véhicules

* La notation ε est ici employée pour désigner des quantités proches de zéro

Enfin, la chronologie des dépenses énergétiques est très différente. Le véhicule électrique se distingue par des dépenses énergétiques initiales 65 % plus élevées (à majorité fossiles) et des dépenses d'usage 16 à 34 % plus faibles que les véhicules thermiques.

1.2 - Indépendance énergétique

Le tableau 1 donne les indications nécessaires pour traiter de cette question.

Dans tous les cas, la construction et l'usage des différents véhicules reste presque totalement tributaire de ressources primaires importées :

- Pour le véhicule électrique : 3,5 tep de ressources fossiles et 4,6 tep d'uranium importés.
- Pour le véhicule diesel : 7,9 tep de ressources fossiles importées.
- Pour le véhicule essence : 10 tep de ressources fossiles importées.

3 - 1tep = 42 Gjoules.

Si l'on borne l'analyse aux ressources fossiles importées (comme c'est la pratique non justifiée en France puisque tout l'uranium est importé) la substitution d'un véhicule électrique à un véhicule diesel engendre une économie d'importation de 4,4 tep au cours de sa vie et la substitution à un véhicule essence une économie d'importation de 6,5 tep.

1.3 - Ponctions de matières premières minérales

Les véhicules électriques et thermiques présentent des consommations d'acier, d'aluminium et de plastiques du même ordre. Par contre les deux types de véhicule se distinguent principalement par la présence dans le véhicule électrique de quantités importantes de lithium.

Le BRGM estime les ressources totales de lithium à 36 millions de tonnes⁴, dont près de 10 millions au Chili. La production en 2012 était de 28 000 tonnes dont 22 % pour les batteries et piles. La consommation de lithium par voiture varie de 4,5 à 12 kg selon les technologies de batteries⁵.

Les producteurs majeurs de lithium ont tous annoncé des augmentations prochaines de capacité de production. Si on additionnait ces accroissements de capacité et démarrages de production plus ou moins prévus ou annoncés, on arriverait à une perspective de production de plus de 100 kt de Li contenu en 2020, ce qui dépasserait de loin la consommation envisagée en 2020. Ainsi, même si divers projets prennent du retard ou sont annulés, il ne devrait pas y avoir globalement d'insuffisance de production pour faire face à la demande croissante dans les années à venir. Il semble donc que, même avec une forte croissance de la demande en lithium tirée par les batteries, elles-mêmes tirées par le développement attendu des véhicules électriques, les ressources identifiées seraient suffisantes pour permettre un approvisionnement du marché pour plusieurs décennies, et les capacités de production en projet sont plus que suffisantes, au-delà de 2020. Il pourrait néanmoins se produire des pénuries momentanées de lithium en cas de développement très rapide des véhicules électriques dans le monde.

Signalons enfin que la filière de recyclage du lithium des piles et batteries se met désormais en place progressivement. Certains procédés sont encore du domaine de la R&D. La société française Récupyl et la société californienne Toxco commencent à produire du lithium recyclé à partir des batteries et piles. Récupyl annonce au stade pilote une récupération de 98 % du lithium contenu avec son procédé hydrométallurgique breveté.

1.4 - Émissions de gaz à effet de serre

La figure 2 ci-dessous fait apparaître les émissions totales de gaz à effet de serre des différents véhicules sur l'ensemble de leur durée de vie.

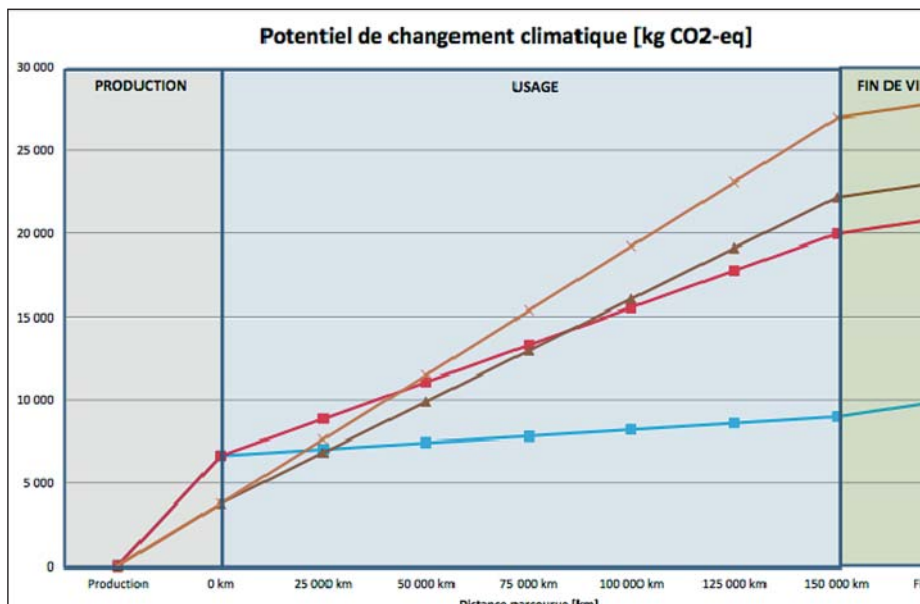


Figure 2 : Émissions totales des véhicules électriques et thermiques en France et en Allemagne au cours de leur durée de vie (150 000 km).

Source : Étude ACV Ademe

On voit sur ce graphique se différencier très nettement les émissions d'un véhicule électrique construit en France mais utilisé en Allemagne et celles d'un véhicule également construit en France mais utilisé en France : alors que celui utilisé en France

4 - Panorama 2011 du marché du lithium Rapport public BRGM/RP-61340-FR, juillet 2012.

5 - Gains L. et Nelson P. (2010) - Lithium-Ion Battery : Possible Materials Issues, Argonne National Laboratory, Argonne IL. Soit environ 40 000 tonnes pour les 6 à 7 millions de voitures présentes en 2030 dans le parc français de véhicules.

n'émet que 10 tonnes d'eq CO₂⁶ pour 150 000 km, soit 66 geq CO₂/km, celui utilisé en Allemagne en émet 21 tonnes soit 140 geq/km, à peine moins que le véhicule diesel (153 geq/km). C'est évidemment la conséquence des différences de composition actuelle des parcs électriques français et allemands.

La politique de transition énergétique mise en place en Allemagne (économies d'énergie, sortie du nucléaire, renouvelables) devrait cependant permettre une réduction des émissions de gaz à effet de serre du mix électrique d'ici 2030 et donc une réduction des émissions des véhicules électriques utilisés en Allemagne.

On notera enfin qu'en 2012 la fabrication représentait à elle seule 74 % et 7,4 teq CO₂ des émissions du véhicule électrique utilisé en France (fig 3) alors que cette fabrication n'intervenait que pour 38 % et 3,5 teq CO₂ pour le véhicule diesel.

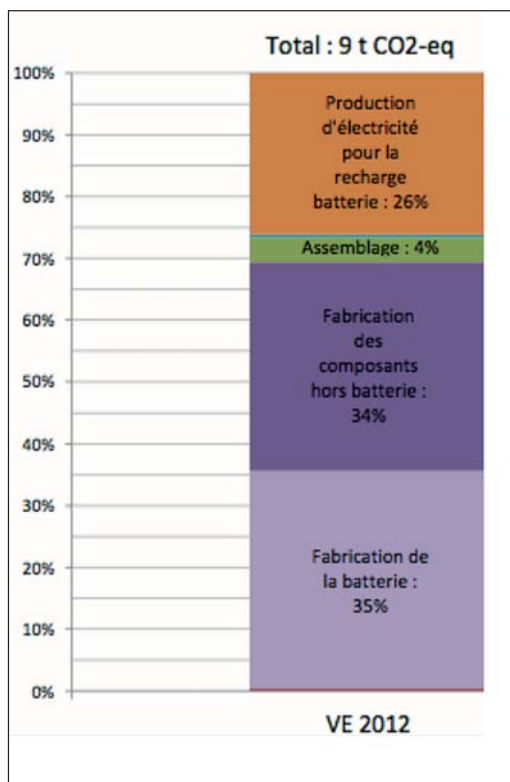


Figure 3 : Contribution des étapes du cycle de vie d'un véhicule électrique en France aux émissions de CO₂

Source : Étude ACV Ademe

Les émissions initiales de CO₂ liées à la construction du véhicule électrique sont donc deux fois plus élevées que celle d'un véhicule à moteur thermique, mais les émissions d'usage sont respectivement onze fois et huit fois inférieures à celles du diesel en France et en Allemagne : 11 g/km contre 123 g/km en France et 84 g/km en Allemagne.

Les meilleures performances globales du véhicule électrique sur l'ensemble de son cycle de vie se payent donc d'émissions initiales deux fois plus élevées que celles d'un véhicule thermique. La durée de vie du véhicule et celle de sa batterie sont donc des paramètres beaucoup plus importants que pour les véhicules thermiques en termes d'émissions de CO₂. Jusqu'à 25 000 km d'utilisation, même en France, le véhicule électrique ne présente pas d'avantage d'émissions de gaz à effet de serre par rapport au diesel.

Dans ces conditions, un remplacement des batteries durant la vie de la voiture avant 150 000 km viendrait grever de façon importante son bilan carbone.

L'ensemble de ces considérations vient fortement nuancer l'opinion généralement admise selon laquelle le véhicule électrique utilisé en France, dans un parc électrique dominé par le nucléaire, n'est responsable que d'émissions parfaitement négligeables. Dans le meilleur des cas, le véhicule électrique permet de diviser par 2,1 les émissions d'équivalent CO₂ de 140 g à 66 g/km pour le diesel et d'un facteur 2,8 pour l'essence. Cela à condition que les 150 000 km pris comme base pour l'usage de la voiture soient effectués sans qu'il ne soit pas nécessaire de changer les batteries, ce qui n'est pas aujourd'hui acquis⁷.

1.5 - Potentiel d'acidification

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 exemple par une perte d'éléments minéraux nutritifs pour les arbres et la végétation. Les substances participant à ce phénomène sont, entre autres : SO₂, NO_x, NH₃, HCl, HF.

La production d'électricité au charbon et surtout la fabrication de la batterie présentent les contributions principales à 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.

6 - Dont une tonne en fin de vie.

7 - La garantie constructeur des batteries des véhicules électriques est généralement de 5 ans.

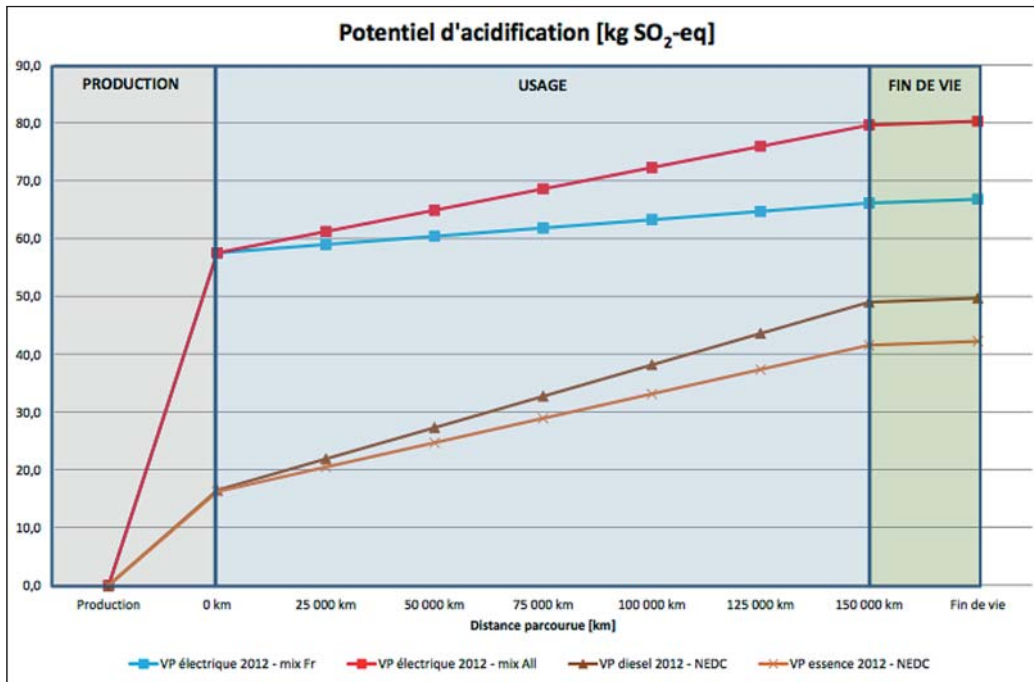


Figure 4 : Potentiel d'acidification des véhicules électriques et thermiques en France et en Allemagne au cours de leur durée de vie (150 000 km).

Source : Étude ACV Ademe

Dans tous les cas, le potentiel d'acidification du véhicule électrique est très nettement supérieur à celui des véhicules thermiques.

1.6 - Potentiel d'eutrophisation de l'eau

Le degré d'eutrophisation décrit l'état d'un milieu terrestre ou aquatique ou d'un agroenvironnement où des êtres vivants sont exposés à un « excès » chronique de nutriments.

Pour le potentiel d'eutrophisation de l'eau, en partie lié aux émissions de NO_x, le véhicule électrique présente un avantage important par rapport au véhicule diesel : son potentiel d'eutrophisation en France est deux fois inférieur. Le gain est moins significatif pour le véhicule essence (15 %). Pour le véhicule électrique, les émissions de NO_x sont dues à l'extraction des métaux nécessaires à la fabrication de la batterie. Le véhicule diesel a un potentiel d'eutrophisation plus élevé que le véhicule essence en raison de ses émissions de NO_x plus importantes en phase d'usage.

1.7 - Potentiel de pollution atmosphérique locale : NO_x et particules

Le parc automobile français est un responsable important des pollutions atmosphériques locales, en particulier en ville (CO, NO_x, COV, particules fines).

Dans un premier temps nous allons nous intéresser aux pollutions atmosphériques locales, en ville par exemple, liées par conséquent au seul usage des véhicules thermiques ou électriques. Nous compléterons cette analyse par celle des pollutions atmosphériques engendrées par la fabrication des véhicules, pollutions qui ne s'ajoutent pas aux premières du point de vue local, mais contribuent à la pollution atmosphérique globale.

1.7.1 - Pollution particulaire locale d'usage des véhicules

Le véhicule électrique n'est source d'aucune pollution particulaire locale au cours de son usage⁸, au contraire des véhicules essence et diesel (CO, Nox, COV pour l'essence et le diesel, particules fines pour le diesel). C'est évidemment un avantage important de ce type de véhicule pour la qualité de l'air dans les agglomérations.

En ce qui concerne les particules fines qui font aujourd'hui l'objet d'une attention particulière du fait de leur impact sur la santé, on constate de très grosses différences de performance entre les émissions des moteurs à essence et des moteurs diesel, tout au moins quand ces derniers ne disposent pas de filtres à particules (tableau 2). Il est difficile de donner un tableau précis du nombre et des masses de particules émises au km par les différents véhicules tant les valeurs dépendent de la façon dont ils sont utilisés. On voit néanmoins sur le tableau ci-dessous que le nombre de particules microniques émises par km par un diesel

8 - A l'exception des pollutions particulaires d'usure des pneus qui sont communes à tous les véhicules.

non équipé de filtre à particules est au moins 100 fois plus important que pour un véhicule à essence et leur masse au moins 10 fois plus importante.

Type de moteur	Particules (nombre/km)	Particules (masse/km) (mg/km)
Diesel	5×10^{13} - $7,5 \times 10^{13}$	20 - 40
Diesel avec FAP	2×10^{11} - $7,5 \times 10^{11}$	0,5-1,6
Essence classique	1×10^{11} - $9,5 \times 10^{11}$	0,5-4,8

Tableau 2 : Émissions moyennes de particules de différents types de moteurs

Source⁹ pour les premiers chiffres et¹⁰ pour les seconds de chaque colonne

Mais on voit aussi sur ce tableau que les véhicules diesel équipés de filtres à particules affichent des performances du même ordre que celles des véhicules à essence en réduisant le nombre de particules d'un facteur au moins 100 et leur masse d'un facteur de l'ordre de 30.

D'autre part la norme Euro 6 qui s'imposera dans la Communauté européenne en 2015 fixe respectivement à 6×10^{11} /km et 610^{12} /km le nombre de particules fines émises par les véhicules diesel et essence¹¹.

Par contre le véhicule électrique ne produit aucune émission de particules hormis celles liées à l'usure des pneus sur les routes (comme pour les véhicules thermiques).

Le tableau 2 montre cependant que l'efficacité des filtres à particules relativise l'intérêt d'une forte pénétration de véhicules électriques (à zéro émission locale) comme solution aux émissions de particules comme le montre le calcul ci-dessous.

Diviser par deux la pollution particulaire de 1 000 voitures ?

Soit un parc de 1 000 voitures composé de 700 voitures Diesel non équipés de FAP et de 300 voitures essence.

L'objectif retenu est de diviser par deux la pollution particulaire. Le nombre initial de particules/km du parc et le poids initial total de particules/km sont respectivement de $700 \times 5 \times 10^{13} + 3000 \times 10^{11} = 35,03 \times 10^{13}$ particules/km et $700 \times 20 + 300 \times 0,5 = 14150$ mg/km. L'objectif à atteindre (une division par deux) est de 17×10^{13} particules/km et 7075 mg/km.

On constate que les deux objectifs peuvent être simultanément et indifféremment atteints par la substitution au parc ancien Diesel de 354 voitures électriques ou de 363 véhicules Diesel modernes équipées de FAP ou de véhicules essence.

1.7.2 - Émissions locales de NOx liées à l'usage des véhicules.

Les véhicules diesel du parc existant sont des émetteurs beaucoup plus importants de NOx que les véhicules à essence (>500 mg/km contre moins de 150 mg/km) et à fortiori que les véhicules électriques dont les émissions à l'usage, très faibles (<20 mg/km), proviennent de la production d'électricité. Les véhicules électriques présentent donc un avantage évident de ce point de vue.

Cependant les normes Euro 6 de la Communauté européenne qui s'imposent depuis début 2014 fixent aux véhicules diesel des émissions de NOx inférieures à 80 mg/km et aux véhicules à essence des émissions de NOx inférieures à 60 mg/km. Le même type de calcul que celui fait pour la pollution particulaire montre que la réduction d'un facteur deux des émissions de NOx d'un parc de 1 000 voitures peut être obtenu par le remplacement de quantités très voisines de voitures diesel du parc existant par des véhicules électriques ou par des voitures diesel aux normes Euro 6 (voir ci-dessous).

Diviser par deux les émissions NOx d'un parc de 1 000 voitures ?

Soit un parc existant de 1 000 voitures composé de 700 voitures diesel et de 300 voitures essence.

Les émissions actuelles de ce parc sont de l'ordre 300×150 mg/km + 700×500 mg/km = 395 g/km.

L'objectif est de les réduire de 198 g/km. Ce résultat peut être obtenu indifféremment en remplaçant 470 véhicules diesel du parc par des diesel aux normes Euro 6 ou 396 diesels par des véhicules électriques.

9 - Jon Andersson Barouch Giechaskiel, Rafael Muñoz-Buena, Emma Sandbach, Panagiota Dilara - Particle Measurement Programme (PMP) Light-duty Inter-laboratory Correlation Exercise (ILCE_LD) Final Report [archive] - Institute for Environment and Sustainability, Centre commun de recherche - juin 2007.

10 - Dr Martin Rexeis/S. Hausberger/J. Kühlwein/R. Luz Update of Emission Factors for EURO 5 and EURO 6 vehicles for the HBEFA Version 3.2 ». Report No. I-31/2013/Rex EM-I 2011/20/679 from 06.12.2013.

11 - Les véhicules à essence seront soumis à la même contrainte de 6×10^{11} particules/km à partir de 2017.

1.7.3 - Pollution atmosphérique associée à la fabrication des véhicules.

L'étude ACV de l'Ademe apporte des éléments d'information sur cette question. Les résultats de l'étude pour les NOx et les particules fines, effectuée pour un scénario 2020 en France apparaissent dans le tableau ci-dessous :

Emissions de NOx mg/km	Production	Batterie	Carburant ou Electricité	Total hors usage
Véhicule diesel	60	0	40	100
Véhicule essence	60	0	50	90
Véhicule électrique	50	50	20	120
Masse de particules mg/km				
Véhicule diesel	10	0	0	10
Véhicule essence	10	0	0	10
Véhicule électrique	10	10	0	20

Tableau 3 : Émissions de NOx et pollution particulaire à la fabrication des véhicules

Source : Étude ACV Ademe

Les émissions de NOx à la fabrication du véhicule électrique sont donc un peu plus élevées pour le véhicule électrique que pour les véhicules thermiques.

Les émissions totales de NOx (fabrication et usage) dans l'atmosphère sont de l'ordre de 160 mg/km pour le diesel, de 150 g/km pour l'essence et de 120 g/km pour le véhicule électrique si les normes Euro 6 sont effectivement respectées en 2020. Par contre les émissions de particules de fabrication du véhicule électrique sont deux fois plus élevées que celles des véhicules thermiques. L'absence d'émissions de particules à l'usage ne suffit donc pas à rééquilibrer le bilan global d'émissions de particules du véhicule électrique par rapport à celui des véhicules thermiques : de l'ordre de 20 mg/km contre 10 à 10,1 mg/km pour les véhicules thermiques.

1.8 - Potentiel de pollution sonore

Le bruit émis par un véhicule provient essentiellement du moteur et du roulement des pneus sur la chaussée. Le bruit du roulement (frottement roue/chaussée) intervient surtout à haut régime (au-delà de 50 km/h) car ce bruit (en décibels) est proportionnel à la racine carrée de la vitesse comme le montre la figure 5.

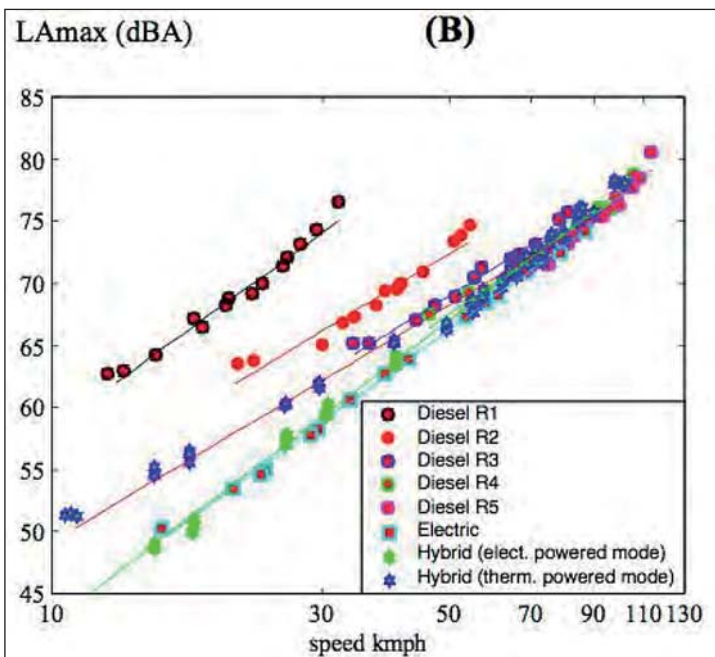


Figure 5 : Évolution du bruit en dB en fonction de la vitesse pour différents types de véhicules¹²

Source : Étude ACV Ademe

¹² - Passenger cars. Power unit and tyre-road noise, driving behaviour : what are the stakes, Inrets, 20.

Dans le cadre d'une utilisation urbaine du véhicule, le bruit du moteur est la principale nuisance sonore. D'où l'intérêt du véhicule électrique, dont le moteur est beaucoup plus silencieux. Cet intérêt diminue avec l'augmentation de la vitesse : à partir de vitesses de 60 ou 70 km/heure, le véhicule électrique ne possède plus d'avantage sensible du point de vue de la pollution sonore.

Pour une utilisation en ville, le véhicule électrique présente donc un avantage très important du point de vue de la pollution sonore.

À l'issue de ce tour d'horizon sur les questions de ressources et d'environnement il apparaît que :

- *Le véhicule électrique présente incontestablement des avantages importants du point de vue de la pollution sonore en ville par rapport aux véhicules thermiques.*
- *Il présente également des avantages importants en termes de pollution atmosphérique locale (NOx et particules fines) par rapport aux véhicules diesel non équipés de filtres à particules qui constituent l'essentiel du parc diesel actuel. Mais ces avantages s'estompent vis-à-vis des véhicules thermiques, aussi bien en termes d'émissions de NOx que de particules fines si les véhicules mis sur le marché respectent les normes Euro 6.*
- *Il présente également, tout au moins en France, des avantages significatifs en termes de potentiel d'eutrophisation par rapport au véhicule diesel.*
- *Utilisé en France, il présente un avantage significatif en terme de potentiel de réchauffement climatique par rapport à un véhicule thermique s'il est utilisé plus de 25 000 km. Cet avantage peut atteindre un facteur 2,1 pour une utilisation de 150 000 km par rapport à un véhicule diesel et 2,8 par rapport à un véhicule essence, si la durée de vie des batteries rejoint celle du véhicule.*
- *Le véhicule électrique n'apporte par contre pas d'avantages déterminants en termes d'épuisement des ressources énergétiques primaires dans le contexte de production actuelle de l'électricité, aussi bien en France qu'en Allemagne. Il permet cependant des économies significatives de ressources fossiles, en particulier pétrolières (4,4 à 6,8 tonnes par véhicule pour 150 000 km d'usage).*
- *Le véhicule électrique présente enfin un bilan nettement défavorable en termes de ponction de matières minérales épuisables et de potentiel d'acidification.*

2 - Le talon d'Achille du véhicule électrique : les batteries et leur recharge

2.1 - Les batteries

Le développement des véhicules électriques s'est heurté pendant une bonne centaine d'années à la question des batteries de stockage de l'électricité.

Quel compromis en effet adopter entre l'autonomie du véhicule, le poids de batterie à embarquer (et donc le poids du véhicule), le temps de recharge de ces batteries, dans un paradigme économique contraint par la concurrence du véhicule thermique ?

Pendant plus d'un siècle, seules les batteries au plomb ont été utilisées avec un inconvénient majeur de poids. La densité d'énergie qui y est stockable est en effet de l'ordre de 30 Wh/kg. Le stockage à bord du véhicule électrique de la vingtaine de kWh nécessaires à une autonomie d'une centaine de km pour une petite berline conduisait alors à un poids de batteries de l'ordre de 700 kg.

L'arrivée de nouveaux types de batteries, Nickel métal hydrure (NiMH) ; Lithium-ion, 90 Wh/kg ; Lithium polymère (Li-Po), 120 Wh/kg, a permis de modifier considérablement la donne en divisant par 2,5 ou 3 le poids de batteries indispensable pour assurer l'autonomie du véhicule. Le poids de batteries d'un véhicule Zoe équipé de batteries Lithium-ion est de 290 kg pour une capacité de stockage de 22 kWh.

Les recherches actuelles permettent d'espérer à terme une augmentation de 50 % de la densité d'énergie stockable et donc de l'autonomie des véhicules électriques (batteries Lithium-ion de seconde génération).

La question du poids de batterie a donc connu une évolution favorable au cours des vingt dernières années, évolution qui devrait se prolonger à moyen terme et permettre des autonomies de 200 à 250 km sans augmentation significative du poids des batteries embarquées.

2.2 - La recharge des batteries

Reste la question des moyens et du temps de recharge de ces batteries qui paraissent aujourd'hui les freins principaux au développement massif du véhicule électrique en remplacement du véhicule thermique.

Différentes méthodes sont envisagées :

- Une recharge lente, dite standard, à partir d'une prise 220 V - 16 ampères (3,7 kW) telles qu'on en trouve dans les habitations pour l'électroménager. Le temps de charge complète des batteries d'un véhicule actuel est alors de 7 à 8 heures.
- Une recharge dite rapide de l'ordre de 30 minutes à une heure à partir de bornes électriques spécifiques capables de fournir des puissances de 43 ou 50 kW (60 et 125 ampères).
- Un dispositif intermédiaire de recharge de 22 kW appelé recharge accélérée, moins onéreux d'installation, qui est censé permettre une recharge à 80 % des batteries en une heure environ.

Dans tous les cas, le service rendu à l'utilisateur est loin d'être de même qualité que celui qui est assuré par la pompe à essence d'une station service. Il faut en effet se souvenir qu'une pompe à essence est capable d'effectuer un plein de carburant de 50 litres en quelques minutes. Il faudrait disposer de puissances de plusieurs MW d'électricité de recharge pour obtenir des performances analogues avec une recharge électrique.

Par conséquent et au contraire de ce qui se pratique usuellement pour un véhicule thermique où le conducteur s'arrête pour faire le plein, la stratégie à tenter de respecter dans le cas du véhicule électrique consiste à « recharger dès qu'on s'arrête » (park and charge).

Les bornes de recharge rapide¹³ doivent donc être installées dans les lieux de garage provisoire qu'utilisent les automobilistes dans leur activité quotidienne (centres commerciaux, parkings publics, restaurants, bureaux, etc.) de telle façon à permettre une recharge en temps masqué.

Reste un problème mal résolu pour les longs trajets routiers et surtout autoroutiers pour lesquels le conducteur n'est généralement pas disposé à faire une pause d'une demie heure au minimum tous les 100 km au bord de l'autoroute. Il est évidemment possible d'installer le nombre de bornes rapides nécessaire dans chaque station service, par exemple quelques dizaines par station, mais le temps perdu par l'automobiliste en recharges successives sur un long trajet comme Paris Marseille (8 arrêts d'une demie heure) risque fort d'être rédhibitoire.

2.3 - Les contraintes sur le réseau de distribution et la production d'électricité

2.3.1 - Le réseau électrique

Le développement massif d'un parc de véhicules électrique accessible au grand public impose l'installation de plusieurs millions de bornes de recharge basse puissance (4 kW) mais aussi de plusieurs dizaines de milliers de bornes de recharge rapide de puissance comprise entre 20 et 50 kW. On peut imaginer que l'installation des bornes basse puissance chez les particuliers puisse dans de nombreux cas s'effectuer sans renforcement systématique du réseau de distribution dans la mesure où les puissances déjà disponibles sont peu utilisées de nuit.

Par contre les bornes de recharge rapide peuvent engendrer des difficultés importantes sur le réseau : l'appel de puissance engendré par la recharge simultanée de plusieurs voitures dans une rue ou un quartier peut très rapidement dépasser la puissance maximale disponible localement. La mise en place de ces bornes imposera dans un grand nombre de cas un renforcement local du réseau de distribution.

La télégramme de Best - lundi 21 juillet 2021 - 15 heures

Le festival des Vieilles Charrues provoque un black out à Carhaix.

Record d'affluence cette année aux Vieilles Charrues : plus de 325 000 fans sont venus pendant quatre jours écouter leurs idoles ; un temps idéal, les meilleurs groupes du moment, un septième adieu de Johnny à la scène, bref le bonheur.

Mais c'est quand il a fallu retourner au travail que les choses se sont brusquement gâtées. En effet, parmi les possesseurs des 80 000 voitures garées dans les champs voisins du lieu de concert, il s'en trouvait un peu plus de mille qui, dans un esprit citoyen, responsable et écologique, étaient venus au festival en voiture électrique. Au moment du retour, dégrisés et soucieux, ils ont brusquement pris conscience de la nécessité de recharger en urgence leurs batteries plus ou moins à plat pour rejoindre à temps leur travail. Il existait bien une centaine de prises de recharge rapides disséminées dans le canton grâce aux subsides du Conseil général : elles ont été aussitôt prises

d'assaut par les plus débrouillards. Restait aux autres à quémander chez les particuliers un branchement de fortune pour quelques heures... Et les habitants de Carhaix, bienveillants et soucieux de retrouver le calme, de leur proposer de débrancher leurs machines une ou deux heures pour brancher à leur place le câble de recharge !

Mais personne n'avait anticipé l'appel de puissance brutal qui s'en est suivi sur le transformateur et les lignes de distribution de Carhaix. Un appel de 7 ou 8 MW supplémentaire en pleine heure du déjeuner pour un réseau qui, en pointe, en consommait moins de 10 ! Le réseau n'y a pas résisté, entraînant en cascade la mise hors circuit de la plupart des villages du canton. A l'heure où nous imprimons, ERDF s'affaire à rétablir le courant dans le centre ville de Carhaix où 2 000 foyers sont toujours privés d'électricité. Les hameaux les plus reculés attendront...

¹³ - Bornes de recharge rapides dont il faut noter qu'elles sont spécifiques d'une technologie de batterie.

C'est aussi le cas pour les bornes équipant les autoroutes. En effet, une grande station service d'autoroute aligne facilement 10 pompes où les automobilistes restent 5 minutes. Pour éviter les files d'attente, il faudrait 6 fois plus de postes de recharge d'une demie heure que de postes de carburant, soit 60 et donc 2 à 3 MW de puissance installée sinon c'est la queue !

L'introduction massive du véhicule électrique en France suppose donc un réaménagement important du réseau de distribution pour faire face aux pointes locales de puissance.

2.3.2 - La production d'électricité

La mise à disposition de bornes de recharge rapide aux usagers des véhicules électriques entraîne enfin un risque de création de pointe de demande électrique au niveau national. Si en effet 1 % des véhicules du parc électrique s'avise de se mettre en charge simultanément sur borne rapide à l'heure de pose du déjeuner, la puissance appelée atteindra 2,8 GW (40 kW*70 000). Cette nouvelle pointe risque d'entraîner à son tour, à certaines périodes de l'année, l'appel à des moyens de pointe à la fois onéreux et à fort contenu d'émissions de gaz à effet de serre (charbon, fioul et gaz naturel).

Le véhicule hybride échappe à la plupart des inconvénients cités pour le véhicule électrique

Le véhicule hybride, équipé d'une double motorisation thermique et électrique bénéficie des avantages de rendement qui sont liés à l'usage de l'électricité à bord de la voiture (capacité de récupération de l'énergie de freinage dans les batteries, faibles pertes de transmission) sans buter comme le véhicule électrique sur la question de l'autonomie. En particulier, il devient inutile d'installer des bornes de recharge rapides, puisque l'autonomie de la voiture est assurée par la présence d'un réservoir d'essence.

Dans sa version « hybride rechargeable » le véhicule peut se recharger sur le réseau électrique, ce qui permet de l'utiliser en mode tout électrique pour les petits trajets. Ce système permet à ses utilisateurs d'effectuer de 30 à 50 km par jour sans utiliser d'essence, en rechargeant les batteries la nuit.

Le moteur thermique est mis en route lorsque les batteries sont épuisées ou au-delà d'une certaine vitesse.

Le véhicule hybride permet donc d'échapper largement aux contraintes d'autonomie et de réseau qu'entraîne le véhicule électrique, tout en présentant des avantages en terme d'économie de pétrole et de réduction des gaz à effet de serre par rapport aux véhicules thermiques, avantages qui dépendent de son usage, même s'ils restent plus modestes que ceux du véhicule électrique.

Les derniers prototypes de véhicules hybrides présentés au mondial de l'automobile 2014 par les constructeurs, qui affichent des consommations de carburant inférieures à deux litres au cent, viennent d'ailleurs confirmer les avantages potentiels de cette solution alternative aux véhicules purement électriques.

3 - Le coût économique pour la collectivité.

3.1 - Les subventions des pouvoirs publics

En France, le développement du véhicule électrique est fortement soutenu par les pouvoirs publics qui affichent l'ambition d'atteindre un parc de plusieurs millions de véhicules à l'horizon 2030.

A ce titre et outre le soutien qu'apporte l'État à la recherche et développement des véhicules, des batteries et des infrastructures de recharge, des subventions sont consenties à l'acquisition des véhicules et à l'installation de bornes de recharge. Elles sont rappelées ci-dessous.

A - Prime à l'achat (bonus) : 6 300 € portés à 10 000 € en cas de remplacement d'un véhicule diesel.

B - Aides à l'installation de bornes de différents types.

- Infrastructures permettant uniquement la recharge normale jusqu'à 3,7 kVA: 50 % des coûts éligibles d'investissements hors taxes, avec un plafond d'aide de 1 500 euros par point de charge.
- Infrastructures permettant la recharge accélérée jusqu'à 22 kVA: 50 % des coûts éligibles d'investissements hors taxes, avec un plafond d'aide de 3 000 euros par point de charge.
- Infrastructures permettant la recharge rapide au-delà de 22 kVA: 30 % des coûts éligibles d'investissements hors taxes, avec un plafond d'aide de 12 000 euros par borne de charge.

C- Différentiel de taxation sur les carburants

Les possesseurs d'automobiles électriques bénéficient d'autre part du tarif ordinaire (domestique) de l'électricité dont les différentes taxes (TVA, CSPE, etc) ne représentent en 2012 que 27 % du coût total alors qu'elles en représentent respectivement 55 % pour l'essence et 47 % pour le gazole.

Enfin certaines collectivités locales (Conseils régionaux, communes, etc...) apportent un complément aux subventions précédentes, soit au véhicule soit à l'installation de bornes de recharge.

3.2 - Les coûts et bénéfices pour l'État

La question qui se pose est celle de la pertinence économique de ces différentes aides vis-à-vis des enjeux énergétiques et environnementaux évoqués, économies d'énergie fossile, pollution sonore, particulaire, effet de serre. Pour apprécier ce point, il est nécessaire de cumuler les diverses aides apportées par l'État au véhicule électrique et d'en rapporter la valeur à chacune des pollutions évitées ou des énergies fossiles économisées.

Les hypothèses de calcul

Véhicules effectuant 150 000 km en 10 ans au rythme de 15 000 km/an

Véhicule électrique

1 véhicule électrique nécessitant une borne de recharge standard (prime 1 500 €) et le recours ponctuel à une borne de recharge rapide (1 borne rapide pour 7 véhicules et une prime de 12 000 € / 7 = 1 700 € par véhicule).

Les consommations et les émissions de ce véhicule au cours de sa vie sont ceux indiqués au chapitre 1 de cet article :

- Consommation initiale d'énergie primaire à la fabrication du véhicule électrique: 3 tep.
- Consommation primaire du véhicule électrique: 35 gep/km (0,43 kWh)*, dont 10 % environ d'électricité d'origine thermique fossile
- Emissions initiales de GES: 7,4 teq CO₂
- Emissions d'usage: 11geq CO₂/km

Véhicule diesel (150 000 km en 10 ans)

- Consommation initiale d'énergie à la fabrication du véhicule diesel: 1,8 tep
- Consommation du véhicule diesel: 41 gep/km
- Emissions initiales de GES: 3,5 teq CO₂
- Emissions d'usage: 123 geq CO₂/km

Véhicule essence

- Consommation initiale d'énergie à la fabrication du véhicule essence: 1,8 tep
- Consommation du véhicule essence: 53 gep/km
- Emissions initiales de GES: 3,5 teq CO₂
- Emissions d'usage: 150 geq CO₂/km

* Compte tenu du rendement de production distribution de l'électricité en France, la consommation d'énergie primaire au km d'un véhicule consommant 0,135 kWh/km est de 0,43 kWh/km, une énergie équivalente à celle de la combustion de 35 grammes d'essence.

3.2.1 - Coût des économies d'énergie fossile pour l'État

Le cumul des aides à l'investissement du véhicule électrique varie de 9 500 € (6 300 + 1 500 + 1 700) à 13 200 € (10 000 + 1 500 + 1 700) selon que le véhicule se substitue ou non à un véhicule diesel existant.

D'autre part l'État engrange des taxes sur les différents carburants fournis aux usagers dont les taux sont très divers. En 2012: 55 % pour l'essence (87 ct€/litre), 47 % pour le gazole (66 ct€/litre) 27 % pour l'électricité (3,5 ct€/kWh)

A partir des éléments précédents on peut construire le bilan financier global pour l'État de l'introduction de véhicules des différents types.

€	Aide à l'investissement	Aide infrastructure	Produit Taxes	Total
Véhicule électrique	-10000 ou -6300	-3200	710	-12490
Véhicule diesel	0	0	4025	+4025
Véhicule essence	0	0	7650	+ 7650

Tableau 4 : Bilan financier comparatif pour l'État des véhicules électriques Diesel et essence sur leur durée de vie (150 000 km) aux conditions actuelles de subventions et de taxes¹⁴.

Le tableau se lit de la façon suivante :

Ligne véhicule diesel : aucune subvention à l'investissement initial ni aux infrastructures, produit des taxes 4025 € (150000 km*43 gep/km*0,66 *10 -5 €/gep).

Ligne véhicule électrique : Aide de 6300 à 10000 € à l'investissement du véhicule, Aide à l'installation des bornes de recharge, 3200 €, produit des taxes sur l'électricité 710 € (150000*0,135 kWh/km*3,5 ct€/kWh).

Ce tableau est riche d'enseignements. Alors que la mise sur le marché d'un véhicule essence est porteuse d'une rentrée d'argent totale pour l'État de 7650 € sur 10 ans au rythme de 765 euros par an et de 4000 € (au rythme de 400 € par an) pour un véhicule diesel, la mise sur le marché d'un véhicule électrique est source de dépenses significatives pour l'État, dont 9500 ou 13200 € préalablement à sa mise en service. Ces dépenses initiales sont loin d'être compensées par les taxes perçues sur l'électricité pendant la vie du véhicule.

Il s'agit donc d'un effort financier important de la part de l'État qu'il convient de juger par rapport à l'objectif recherché, dans le cas présent l'économie de carburants fossiles.

Le tableau suivant permet cette appréciation

	Economie d'énergie fossile	Coût pour l'Etat €	Coût par tep fossile économisée €
Véh élec versus diesel	4,4	16515	3760
Véh élec versus essence	6,3	20140	3200
Véh diesel versus essence	1,9	3625	1910

Tableau 5 : Bilan financier pour l'État des économies d'énergie fossile réalisées par l'introduction du véhicule électrique

La politique proposée pour la substitution de véhicules électriques aux véhicules thermiques conduit à des coûts d'économie d'énergie fossile pour l'État de 3200 à 3760 euros par tep nettement supérieurs à ceux engagés (1910 €) pour la substitution de véhicules à essence par des véhicules diesel¹⁵.

Pour fixer un ordre de grandeur de l'effort proposé, il est intéressant de le comparer avec le coût d'autres opérations d'économie de pétrole. Donnons en un exemple dans le secteur de l'habitat.

Il concerne les économies de fioul domestique procurées par une opération de réhabilitation en profondeur d'un logement ancien pour un coût TTC de 400 €/m² permettant de passer d'une consommation de fioul de chauffage thermique de 300 kWh/m².an à 50 kWh/m².an sur une durée de 30 ans.

L'économie d'énergie au m² cumulée engendrée par cette opération atteint 0,65 tep. Le coût à la tep économisée est donc de 615 euros. Les subventions de l'État à ce type d'opération, de l'ordre de 20 % (réduction de TVA, prêt bonifié à taux zéro) sont de l'ordre de 130 € par tep. S'y ajoute le manque à gagner sur les taxes perçues sur le fioul domestique (TICPP et TVA) qui sont de l'ordre de 26 % du prix de celui-ci soit 250 €/tep. Le coût à la tep pour l'État est donc de l'ordre de 380 €.

L'État semble donc prêt à financer à une hauteur près de dix fois plus élevée les mesures d'économie d'énergie par cette politique que ceux d'économies de combustibles fossiles dans l'habitat. Avec la même somme, l'État pourrait donc prendre en compte totalement à sa charge des opérations de rénovation lourde dans l'habitat avec des résultats deux fois meilleurs en termes d'économie de pétrole ou de gaz.

On peut bien entendu considérer que les aides actuelles de l'État diminueront au fur et à mesure de l'avancement du programme de diffusion du véhicule électrique. Mais le tableau 4 montre qu'il faudrait diviser l'ensemble de l'aide accordée sous diverses formes d'un facteur huit environ pour atteindre des valeurs de l'ordre de 400 € par tep économisée (valeur qui correspond à un baril à 80 \$).

Cette politique ne peut donc avoir pour but premier la réduction des besoins de pétrole.

14 - Dans ce tableau les subventions sont notées avec un signe négatif et les taxes perçues par l'État avec un signe positif.

15 - Coût pour l'État dont la pertinence est aujourd'hui fortement contestée au titre des pollutions particulières et NOx.

Il en est évidemment de même pour l'indépendance énergétique comme le montre le tableau ci-dessus. Ces coûts sont sept à huit fois plus élevés que le coût actuel d'importation du pétrole (90 \$/baril, 450 €/tep) qui constitue plus de 80 % des dépenses énergétiques évitées.

Il est donc indispensable de poursuivre plus avant l'analyse de la justification de cette politique ambitieuse.

3.2.2 - Le coût de réduction des émissions de gaz à effet de serre

Tout au long du débat sur la transition énergétique et dans la présentation par Ségolène Royal de son projet de loi, la question des faibles émissions de gaz à effet de serre a trouvé une place de choix dans la justification de la politique véhicule électrique proposée.

On rappelle ci-dessous les chiffres d'émission des différents véhicules de l'étude Ademe déjà citée.

	Emissions cumulées (teq CO2)	Emissions (geq CO2/km)
Véhicule électrique	10	66
Véhicule diesel	23	153
Véhicule essence	27,5	183

Tableau 6 : Émissions de gaz à effet de serre des différents véhicules pour 150 000 km et par km

A partir de ces données et des données financières du paragraphe précédent on peut constituer le tableau suivant :

	Economie de GES (teq CO2)	Coût pour l'Etat €	Coût teq CO2 économisée €
Veh élec versus diesel	13	16515	1270
Véh élec versus essence	17,5	20140	1150

Tableau 7 : Coût global pour le budget de l'État de la réduction des émissions de gaz à effet de serre engendrée par la substitution d'un véhicule électrique à des véhicules thermiques.

On est là encore dans des ordres de grandeur de subventions étatiques considérables. Les subventions à la teq CO₂ économisée sont cinq à dix fois supérieures aux subventions d'opérations déjà citées pour l'habitat.

La politique suivie ne peut donc être raisonnablement justifiée par la lutte contre l'effet de serre.

Il faut donc chercher une autre justification à cette politique.

3.2.3 - La pollution atmosphérique locale

Les particules de diamètre inférieur à 2,5 µ et les émissions de NOx (précurseurs de l'ozone) sont aujourd'hui reconnues comme des sources graves de danger pour la santé humaine. Dans le domaine des transports, le parc actuel de véhicules diesel en est le premier responsable. En effet, les deux tiers de ce parc n'est pas équipé des filtres qui permettraient de ramener les émissions de particules et les émissions de NOx à un niveau du même ordre que celui des véhicules à essence, eux même aussi émetteurs de particules et de NOx, mais dans une plus faible mesure, comme nous l'avons vu au chapitre II.

Nous avons vu d'autre part que les véhicules électriques permettaient de supprimer pratiquement toute émission de particules fines et de NOx au cours de leur usage. L'introduction de véhicules électriques peut donc sembler à première vue comme une excellente solution au problème de la pollution atmosphérique en ville, même si elle entraîne des émissions importantes de particules fines au moment de leur construction (voir chapitre I tableau 3).

Mais nous avons vu également que le remplacement indispensable du parc diesel antérieur à 2011 pouvait s'effectuer par des véhicules diesel munis de filtres à particules ou par des véhicules à essence avec des résultats comparables à ceux du véhicule électrique en termes de réduction des particules et des NOx. L'introduction de véhicules électriques ne se justifie alors pas pour l'État, puisque des résultats du même ordre peuvent être obtenus à coût bien moindre, voire à coût nul pour l'État, avec des véhicules diesel munis de filtres à particules ou des véhicules à essence.

Cette première approche simplifiée montre qu'en dehors des problèmes de pollution sonore où l'avantage du véhicule électrique en ville ne se discute pas, il est bien difficile de trouver des justifications économiques significatives à l'aide massive que l'État s'apprête à apporter au développement du véhicule électrique.

On pourrait évidemment raffiner l'analyse en effectuant des calculs actualisés comme le prônent les économistes pour tenir compte de la préférence des acteurs de la société pour le présent par rapport à l'avenir, soit par une méthode du type « Cumac » soit par la méthode du Coût courant économique de la Cour des Comptes. Mais ces méthodes qui donnent plus de poids au court terme qu'au long terme dès que le coefficient d'actualisation ou le loyer économique sont positifs auraient pour conséquence de minimiser encore les avantages comparatifs du véhicule électrique qui se caractérise par des dépenses énergétiques, des émissions de CO₂ et des subventions initiales très importantes.

Coût courant économique et Cumac

Coût courant économique

Dans cette approche, on cherche à mesurer les coûts annuel de rémunération et de remboursement du capital permettant, à la fin de vie de l'installation, de reconstituer en monnaie constante le montant de l'investissement initial. Le coût de rémunération et de remboursement du capital y est mesuré par un loyer économique annuel constant sur la durée de fonctionnement de l'installation.

Ce loyer est calqué sur le remboursement d'un prêt immobilier dans lequel on rembourse des annuités constantes comportant une part de capital et une part des intérêts sur le capital non encore remboursé.

Coût cumulé actualisé « Cumac »

La Commission européenne utilise la notion de « coût cumulé actualisé d'une unité d'économie d'énergie » en rapportant la quantité d'énergie économisée cumulée d'une mesure d'économie d'énergie actualisée sur sa durée de vie à l'investissement nécessaire à cette mesure.

3.3 - Le coût pour les particuliers, l'effet rebond et l'égalité d'accès à la mobilité des usagers de la route

Du point de vue économique, le véhicule électrique se distingue par rapport aux véhicules thermiques de la même catégorie par un surcoût d'achat important et par des coûts d'usage au km trois à quatre fois moins élevés. Même si les pouvoirs publics maintiennent des subventions initiales élevées destinées à combler une partie du surcoût initial imposé à l'acheteur du véhicule, l'amortissement de ce surcoût ne sera obtenu qu'au prix de parcours annuels les plus élevés possibles, d'au moins 15 000 km par an, mais essentiellement pour des trajets journaliers n'excédant pas 80 ou 100 km. On est là devant les conditions idéales de l'effet rebond : le conducteur a tout intérêt à prendre sa voiture, même pour de très courts trajets qu'il pourrait effectuer à pied, en vélo ou en transports en commun, dans l'espoir d'amortir plus vite le surcoût d'investissement consenti.

Le particulier acheteur d'un véhicule électrique pour des raisons écologiques est ainsi conduit à adopter un comportement manifestement contraire à son intention initiale qui entraîne un accroissement de consommation d'énergie contraire à l'esprit de la transition énergétique.

Enfin la très grande différence de taxation entre l'électricité et les carburants pétroliers, de 20 à 27 % selon le carburant, crée une inégalité très forte de traitement en défaveur des automobilistes possesseurs de véhicules thermiques. La TICPE auxquels ces véhicules thermiques sont soumis est pourtant censée, au moins en partie, permettre le financement d'un certain nombre de biens communs liés au transport comme les infrastructures ou la sécurité routière. L'avantage fiscal accordé aux possesseurs de véhicules électriques pourrait donc bien faire l'objet d'un jugement défavorable de la part de la Cour constitutionnelle au titre du non respect de l'égalité de traitement des usagers de la route devant l'impôt.

Dans ce cas, la seule solution envisageable serait de construire un réseau électrique dédié aux véhicules électriques permettant une tarification spécifique de l'électricité utilisée comme carburant. Mais l'installation d'un tel réseau parallèle pour une consommation électrique de quelques pour cent de la consommation totale d'électricité en France aurait pour double conséquence des dépenses d'investissements nouvelles considérables sur le réseau et une détérioration importante du modèle économique sur lequel repose le véhicule électrique¹⁶.

3.4 - Les aspects de politique industrielle

Parmi les autres justifications potentielles des pouvoirs publics au soutien de la filière véhicule électrique on pense évidemment aux espoirs d'exportation des constructeurs français et à la rentabilisation du parc nucléaire dont le surplus de production d'heures creuses pourrait là trouver un débouché intéressant.

Deux considérations viennent cependant réduire ces espoirs :

- Le premier point concerne l'évaluation de la production d'électricité nécessaire au fonctionnement d'un parc électrique estimé à 6 à 7 millions de voitures électriques en 2030.

Toujours sur la base d'un parcours de 15 000 km par an et une consommation de l'ordre de 0,14 kWh par km, le besoin d'électricité serait de $0,14 * 15\,000 * 7 * E6 = 15$ TWh. Cette quantité d'électricité représente moins de 4 % de la production d'électricité nucléaire actuelle et ne constitue donc pas un enjeu réel pour le maintien d'un parc nucléaire élevé. Ce développement per-

¹⁶ - L'introduction d'une taxe du même ordre que la TICPE entraînerait une augmentation de l'électricité de plus de 20 % qui augmenterait d'autant le nombre de km à parcourir pour espérer amortir le surcoût initial d'investissement du véhicule.

mettrait néanmoins une économie d'importation de pétrole de l'ordre de 4 millions de tonnes par an (5 % des importations de pétrole)¹⁷ et des économies de devises de l'ordre de 1,7 milliard €.

- Le second point concerne l'exportation. L'argument de lutte contre les émissions de gaz à effet de serre comme argument commercial d'exportation dépend bien entendu très fortement de la nature du mix électrique du pays concerné. Dans tous les pays européens, à l'exception de l'Autriche et de la Suède, les émissions au kWh électrique sont très supérieures à celles du parc français. En Allemagne par exemple, comme nous l'avons vu dans le chapitre I, la réduction des émissions grâce au véhicule électrique par rapport au diesel est inférieure à 10 %. Il en est de même pour la plupart des pays émergents, dont la Chine¹⁸.

Éléments de conclusion.

La politique ambitieuse d'aide à une pénétration massive du véhicule électrique proposée par les pouvoirs publics est justifiée par ceux-ci au nom de la lutte contre l'effet de serre, contre le bruit, contre les émissions de particules fines, au nom de l'économie de devises pétrolières, de l'indépendance énergétique de la France et d'une meilleure rentabilisation du parc nucléaire français à court et moyen terme. S'y ajoute à plus long terme l'espoir de pouvoir utiliser les batteries des millions de voitures du parc électrique comme élément de stockage décentralisé des énergies électriques variables.

La douce utopie de Jeremy Rifkin

L'idée d'utiliser massivement les batteries d'un parc automobile électrique comme élément majeur de régulation du système électrique développé par Jeremy Rifkin est souvent évoquée comme une solution d'avenir. L'idée, a priori séduisante, est d'utiliser les batteries des véhicules comme moyen de stockage de l'électricité pendant les périodes de surproduction d'électricité par rapport à la demande (nucléaire de nuit, éolien ou photovoltaïque...) et de restituer une partie de cette énergie sur le réseau électrique aux pointes de demande électrique.

Au delà des difficultés techniques, l'idée se heurte à deux problèmes principaux : un problème d'ordre de grandeur des quantités d'électricité stockables et un problème de rentabilité de l'opération.

Les ordres de grandeur

On rappelle que la consommation d'électricité annuelle d'un parc de 7 millions de véhicules effectuant 15 000 km/an est de l'ordre de 15 TWh, soit 50 GWh/jour. La charge journalière maximale de l'ensemble de ces véhicules représente un stock d'électricité de l'ordre de 150 GWh*. 100 GWh sont donc théoriquement disponibles globalement dans la journée pour le réseau, qu'il faut mettre en regard d'une consommation nationale d'électricité journalière de l'ordre de 15 TWh. Si on admet que 20 % des possesseurs de ces voitures sont prêts à se soumettre à une recharge journalière systématique et à une reversion de cette charge sur le réseau ce sont 20 GWh qui sont ainsi disponibles.

A l'exception des quelques cent mille véhicules disposant de bornes rapides, la très grande majorité de ces véhicules sont rechargeables et déchargeables sur des périodes de 7 à 8 heures sous des puissances de l'ordre de 4 kW. La puissance maximale disponible atteint alors de l'ordre de 3GW, puissance non négligeable, mais qu'il faut comparer aux 60 à 100 GW de besoins recensés en pointe selon la période de l'année. L'appoint que représente ce stockage reste donc assez marginal.

Une rentabilité compromise

On a vu plus haut que la rentabilité d'un véhicule électrique dépendait très fortement de son degré d'utilisation. Il y a donc a priori une contradiction entre les deux usages des batteries de ce véhicule dont la durée de vie s'exprime en nombre de cycles, qui peut conduire à un remplacement prématuré de la batterie avant que le véhicule n'ait accompli le nombre de km nécessaires à l'amortissement du surcoût initial. Néanmoins, l'achat d'électricité bon marché lors des périodes de surproduction et la vente au prix fort par le particulier de l'électricité stockée pendant les périodes de pointe pourraient palier cet inconvénient au prix d'une complexification importante des outils de dialogue entre celui-ci et le gestionnaire du réseau.

* - 7 millions de véhicules x 22 kWh

L'étude précédente montre tout d'abord que le vocabulaire en vogue, par exemple la voiture « zéro émission » est très inexact : il s'agit plutôt d'une réduction des émissions de gaz à effet de serre d'un facteur de l'ordre de deux qu'une totale suppression des émissions.

17 - Au prix néanmoins d'un investissement énergétique supplémentaire de l'ordre de 12 millions de tonnes de combustibles fossiles lors de la mise en place du parc.

18 - Ce n'est cependant pas le cas pour le Brésil dont le mix de production électrique est dominé par l'énergie hydraulique.

De même pour la consommation d'énergie fossile qui, si elle est largement réduite en France lors du fonctionnement du véhicule électrique, est loin de l'être lors de sa construction.

Par contre les émissions locales de particules fines et le bruit à basse vitesse sont effectivement éliminés par l'usage du véhicule électrique.

Elle montre aussi les contradictions auxquelles une telle politique conduit aussi bien pour le particulier que pour les pouvoirs publics puisque la justification économique et environnementale de l'emploi du véhicule électrique repose sur l'hypothèse d'une mobilité automobile très forte de trajets de courte distance.

La confrontation des différents avantages relatifs du véhicule électrique par rapport aux véhicules thermiques aux sommes que l'État envisage de mettre en jeu sous forme de subventions diverses pour constituer un parc important à usage grand public conduit à considérer ce choix comme largement injustifiable.

Pour l'État, les coûts à la tonne de pétrole importée évitée, à la tonne de CO₂ évitée, au kg/km de particules fines évité, souvent d'un ordre de grandeur supérieurs à ceux qu'on rencontre dans d'autres secteurs socio-économiques comme l'industrie ou l'habitat tertiaire, sont en effet prohibitifs. Il existe de plus une forte incertitude sur la prise en charge financière de la partie non subventionnée (50 à 70 %) des infrastructures nécessaires à la recharge et au renforcement du réseau, dont le coût global se chiffre en milliards d'euros. Si ces coûts d'infrastructure sont répercutés comme c'est probable sur l'utilisateur final, cela se traduira par une augmentation très sensible du coût au km. Si conformément aux hypothèses retenues plus haut, le coût d'infrastructure non financé par l'État s'élève au minimum à 1 700 + 1 500 = 3 200 €, son amortissement sur 150 000 km représente à lui seul 2,10 €/100 km qui viennent plus que doubler la dépense de 1,80 €/100 km d'électricité.

Des politiques alternatives visant les mêmes objectifs pourraient être mises en place à bien moindres frais et pour de meilleurs résultats aussi bien du point de vue de l'environnement que du point de vue social :

- En donnant la priorité aux transports en commun chaque fois que la densité urbaine le justifie (tram, autobus, métro).
- En exigeant des constructeurs qu'ils fassent les efforts nécessaires pour faire chuter de 30 à 50 % les consommations réelles des véhicules essence et diesel, les équipent de filtres efficaces, et les mettent effectivement sur le marché rapidement.
- En réservant l'usage des véhicules électriques à des parcs spécifiques d'entreprises dont les besoins de transport journalier sont compatibles avec des recharges lentes d'heures creuses et une utilisation partagée (La Poste, GrDF, ERDF, les administrations territoriales, etc.), et surtout à des parcs de véhicules électriques en utilisation partagée (du type autolib). Ce système permet en effet une utilisation journalière cinq à huit fois plus élevée des véhicules que dans le cas d'un véhicule personnel avec les conséquences positives que cela entraîne sur l'amortissement du coût des infrastructures et du véhicule.

En proposant à l'usager un service de mobilité plutôt que la possession d'une automobile, la voiture électrique pourrait devenir l'un des vecteurs, parmi d'autres, de l'économie de fonctionnalité dont le développement constitue un enjeu majeur de la transition énergétique.