

UN VEHICULE ELECTRIQUE REJETTE-IL PLUS DE CO₂
QU'UN VEHICULE TRADITIONNEL ?

Rémy Prud'homme
19.12.2017

Le véhicule électrique est présenté comme « propre » au sens du CO₂, c'est-à-dire comme un véhicule à zéro émission de CO₂. C'est avec cette étiquette, et pour ce motif, qu'il est promu par les villes, les pays, les firmes qui, chaque jour davantage, s'engagent à remplacer les véhicules traditionnels (à essence ou à gazole) par des véhicules électriques. Il est facile de comprendre que cette prétention au zéro émission est ridicule. Par ignorance ou par malice, elle omet deux réalités. La première est que, lorsqu'il roule, le véhicule électrique consomme de l'électricité, et que la production de cette électricité engendre des rejets de CO₂, dont l'ampleur varie d'ailleurs considérablement d'un pays à un autre. La deuxième est que le véhicule électrique incorpore une lourde batterie, dont la production a nécessité beaucoup d'énergie et d'électricité, qui ont rejeté beaucoup de CO₂. Un véhicule électrique rejette donc bien du CO₂ ; et ses rejets dépendent du pays où sa batterie a été fabriquée, et du pays où il roule. Cette note s'efforce de comparer, d'une façon quantitative, les rejets de CO₂ d'un véhicule électrique avec ceux d'un véhicule traditionnel, dans une perspective dite « de cycle de vie.

Un modèle simple

Véhicule traditionnel – Les rejets de CO₂ (RT, avec R comme rejet et T comme traditionnel, mesurés en tonnes) d'un véhicule traditionnel sont égaux aux rejets de CO₂ associés à la fabrication du véhicule (RTF, avec F comme fabrication, en tonnes) et aux rejets engendrés lors de l'usage du véhicule par la combustion du carburant utilisé à cet effet (RTU, avec U comme usage) :

$$RT = RTF + RTU$$

Les rejets dus au carburant (RTU) sont faciles à déterminer. Ils sont égaux à la distance parcourue par le véhicule (D, en km) multipliée par la consommation de carburant aux 100 km (c_t, en litres) multipliée par les rejets de CO₂ associés à la combustion du carburant (α, en kg de CO₂ par litre), divisé par 100 :

$$RT = RTF + D \cdot c_t \cdot \alpha \cdot 10^{-2}$$

Véhicule électrique – On peut de la même façon décomposer les rejets de CO₂ du véhicule électrique (RE mesurés en tonnes, avec R comme rejets et E comme électrique) en trois catégories : (i) les rejets associés à la fabrication du véhicule (REF, avec F comme fabrication) ; (ii) les rejets associés à la production de la batterie (REB, avec B comme batteries) ; et (iii) les rejets associés à l'utilisation du véhicule (REU, avec U comme usage) :

$$RE = REF + REB + REU$$

Les rejets dus à l'usage (REU) sont, comme dans le cas du véhicule traditionnel, faciles à calculer. Ils sont égaux à la distance parcourue (D, en km) multipliée par la consommation d'électricité aux 100 km (c_e, en kg d'électricité aux 100 km) multiplié par le contenu en CO₂ de l'électricité utilisée (γ_u, en kg de CO₂ par kWh), divisé par 100. On notera que le contenu en CO₂ du kWh à utiliser ici est celui du pays où le véhicule est utilisé, ce que signale l'indice u (comme utilisé) du coefficient γ.

$$REU = D \cdot c_e \cdot \gamma_u \cdot 10^{-2}$$

Les rejets de CO₂ dus à la production de la *batterie* (REB) sont de deux types : ceux qui se rapportent aux *matériaux* (acier, métaux, etc.) qui composent les quelques 250 kg d'une batterie (REBM, en tonnes, avec M comme matériaux) ; et les rejets causés par la fabrication à proprement parler (REBF, en tonnes, avec F comme fabrication). Pour estimer ces deux types de rejets, on doit faire un détour, et poser deux hypothèses. Le détour, imposé par les données disponibles, consiste à passer par l'énergie utilisée pour la production des matériaux (PM, mesuré en gigajoules, avec P comme power [E étant déjà pris], et M comme matériaux) et l'énergie nécessaire pour la fabrication de la batterie (PB, avec P comme power, et B comme batterie).

La première hypothèse est que PM est de l'énergie principalement mobilisée sous forme de carburant, dans l'extraction, le transport, le traitement des matériaux. La deuxième hypothèse est que PB est de l'énergie principalement utilisée sous forme d'électricité, dans le processus de fabrication des batteries.

Les rejets de CO₂ associés aux matériaux de la batterie (REBM) sont égaux à l'énergie utilisée pour mobiliser ces matériaux (PM, en gigajoules) multipliés par

le coefficient de transformation de l'énergie en carburant (μ , en litres de carburant par gigajoules d'énergie) multiplié par le contenu en CO_2 d'un litre de carburant déjà rencontré supra (α , en kg de CO_2 par litre) :

$$\text{REBM} = \text{PM} * \mu * \alpha$$

Parallèlement, les rejets de CO_2 engendrés par le processus de fabrication des batteries (REBF) qui fait surtout appel à l'électricité sont égaux à l'énergie utilisée à cet effet (PF, en gigajoules) multipliée par le coefficient de transformation de l'énergie en électricité (λ , en kWh d'électricité) multiplié par le contenu en CO_2 du kWh d'électricité dans le pays de fabrication (γ_f , en kg de CO_2/kWh) :

$$\text{REBF} = \text{PB} * \lambda * \gamma_f$$

Les rejets du véhicule électrique (RE) s'écrivent donc :

$$\text{RE} = \text{REF} + \text{D} * \text{c}_e * \gamma_u * 10^{-2} + \text{PM} * \mu * \alpha + \text{PB} * \lambda * \gamma_f$$

Comparer les rejets de CO_2 du véhicule traditionnel et du véhicule électrique revient à comparer RT et RE. RTF (les rejets associés à la fabrication du véhicule traditionnels) et REF (les rejets associés à celle du véhicule électrique hors batterie) sont également difficile à estimer. On va supposer que la fabrication deux véhicules (hors batterie pour le VE) est assez semblable, et engendre des rejets de CO_2 à peu près égaux, et donc que RTF = REF, ce qui nous permettra d'ignorer ces deux grandeurs.

Au total, l'augmentation (ou la diminution) de rejets de CO_2 causée par le remplacement d'un véhicule traditionnel par un véhicule électrique est donc :

$$\Delta \text{CO}_2 = \text{D} * \text{c}_e * \gamma_u * 10^{-2} + \text{PM} * \mu * \alpha + \text{PB} * \lambda * \gamma_f - \text{D} * \text{c}_t * \alpha * 10^{-2} \quad (1)$$

Valeurs des paramètres

Pour mettre en œuvre ce petit modèle, il faut (et il suffit de) donner des valeurs à la dizaine de paramètres qui interviennent dans la formule (1) ci-dessus. Certains sont classiques et bien connus. D'autres sont postulés. D'autres enfin sont tirés de la littérature, et beaucoup plus discutables. La plupart évoluent dans le temps, parfois rapidement.

D, la distance parcourue par nos deux véhicules est de 13000 km par an pendant 10 ans. 13000 km par an est la distance moyenne enregistrée en France actuellement.

c_t , la consommation de carburant aux 100 km du véhicule traditionnel, parfois appelée l'efficacité énergétique du véhicule, est estimée à 3,9 litres de gazole. Ce chiffre provient de CGDD 2017, tableau 6 p.18, et correspond à un trajet sur route « mixte ». Il est prévu que la baisse enregistrée au cours des années passées se poursuive au cours des années à venir.

α , le contenu en CO₂ d'un litre de gazole, est égal à 3,07 kg de CO₂/litre, selon CGDD 2017. Ce contenu se décompose en deux parties : 2,49 kg qui correspondent à la combustion du carburant, un chiffre classique et certain ; et 0,58 kg qui correspond aux rejets liés à l'extraction, le transport, le raffinage, un chiffre moins classique et moins certain.

c_e , la consommation d'électricité au 100 km du véhicule électrique est estimé à 25 kWh. Ce chiffre est tiré de CGDD 2017, tableau 6 p. 18. C'est une valeur assez élevée. D'autres sources proposent des valeurs plus faibles. On a retenu celle-ci à cause de son caractère officiel.

γ , le contenu en CO₂ d'un kWh d'électricité varie considérablement d'un pays à un autre, en fonction du « mélange électrique » propre à chaque pays, comme le montre le tableau suivant :

Tableau 1 – Contenu en CO₂ de l'électricité (γ), pays choisis, 2014

Pays	Contenu (kg/kWh)
France	0,051
Etats-Unis	0,498
Allemagne	0,523
Japon	0,543
Corée	0,553
Chine	0,776
Inde	0,835

Source : Calculé en divisant les rejets de CO₂ causés par la production d'électricité, selon I.E.A. 2016. *CO₂ Emissions from Fuel Combustion*. p.96, par la production d'électricité du pays, selon BP. 2017. *Statistical Review of the World Energy*.

Trop d'études (par exemple Romare 2017) donnent des rejets de CO₂ sans préciser à quel pays elles se rapportent, ce qui les rend inutilisables. Il est très important de distinguer, comme le fait la formule (1), le γ du pays de

fabrication de la batterie et le γ du pays d'utilisation du véhicule, qui peuvent être très différents.

Les γ du tableau 1 ne prennent en compte que le CO2 émis lors de la production d'électricité. Ils ignorent le CO2 rejeté en aval, lors de l'extraction du charbon, le transport du gaz ou la fabrication des turbines éoliennes. Cette omission n'est pas motivée par une considération théorique, mais par la difficulté d'obtenir des données solides sur ces rejets. On notera la différence avec la valeur du α mentionné supra, qui inclut (à hauteur d'environ 20%) le CO2 rejeté lors de l'extraction, le transport, le raffinage du carburant utilisé par le véhicule conventionnel. Cette différence de traitement introduit un biais en faveur du véhicule électrique.

PM est l'énergie consommée pour la mobilisation des matériaux qui composent une batterie, et se mesure en gigajoules (GJ). La valeur retenue ici, 30 GJ, provient de Yuan 2017, qui présente une étude de terrain, bien explicitée et apparemment bien documentée. On a fait l'hypothèse que cette énergie est utilisée sous la forme de gazole.

PB est l'énergie consommée dans le processus de fabrication des batteries, et se mesure également en GJ. La valeur retenue, 59 GJ, provient aussi de Yuan 2017. On a fait l'hypothèse raisonnable que cette énergie est utilisée sous la forme d'électricité.

μ est le coefficient qui fait correspondre de l'électricité à de l'énergie. Il s'exprime en kilowatt-heures par gigajoule. C'est un facteur de conversion classique : $\mu = 278 \text{ kWh/GJ}$

λ , le coefficient qui fait correspondre des litres de gazoles à 1 GJ est également un facteur de conversion classique : $\lambda = 26,1 \text{ litres de gazole par GJ}$.

Si l'on retient les valeurs de D , c_e , c_t , PM, PB, μ , λ et α proposées ci-dessus, l'équation (1) se simplifie et devient (en tonnes de CO2) :

$$\Delta\text{CO}_2 = 32,5*\gamma_u + 16,4*\gamma_f - 13,6 \quad (2)$$

avec γ_u le contenu en CO2 du kWh du pays d'utilisation du véhicule, et γ_f le contenu en CO2 du kWh du pays de fabrication de la batterie.

Résultats

La comparaison des deux types de véhicules n'a de sens que lorsque l'on identifie clairement le pays d'usage du véhicule électrique et le pays de fabrications des batteries. On distinguera trois groupes de pays : ceux qui comme la France ont un système électrique très décarboné ($\gamma=0,051$) ; ceux qui comme le Japon ont un système moyennement décarboné ($\gamma=0,543$, étant entendu que le cas de l'Allemagne est très voisin) ; et ceux qui, comme la Chine, ont un système très carboné ($\gamma=0,776$). On peut donc en combinant pays d'usage et pays de batterie considérer 9 combinaisons. Certaines, comme des véhicules électriques avec des batteries françaises utilisées en Chine sont d'ailleurs purement virtuelles, inexistantes aujourd'hui et extrêmement improbables demain.

Le tableau 2 montre pour le cas, quantitativement important, de batteries chinoises et d'utilisation en Chine, le détail des résultats obtenus.

Tableau 2 – Rejets de CO₂ comparés des véhicules traditionnels et électriques (avec batterie et utilisation chinoises)

	Energie (litres, kWh)	coef (α , γ)	CO2 (tonnes)
Rejets du véhicule traditionnel			
Utilisation (litres gazole)	5070	3,07	15,6
Rejets du véhicule électrique :			
Utilisation (kWh)	32500	0,776	25,2
Matériaux batterie (litres gazole)	633	3,07	1,9
Fabrication de la batterie (kWh)	16402	0,776	12,7
Total rejets du véhicule électrique			39,6
Variation absolue des rejets			+24,3
Variation relative des rejets (% du VT)			+156%

Source et note : modèle et valeurs des paramètres présentés dans les sections ci-dessus. Les coefficients α et γ sont le contenu en CO₂ d'un litre de gazole et d'un kWh d'électricité. L'énergie consommée et le CO₂ rejeté se rapportent au cycle de vie de véhicules parcourant 130000 km en dix ans.

Deux des lignes du tableau 2, la première et la troisième, sont indépendantes du cas considéré. Les rejets de CO₂ du véhicule traditionnel (15,6 tonnes) sont à peu près identiques dans tous les pays monde. La raison en est que la quantité de gazole utilisée, ainsi que le coefficient α sont en première approximation les mêmes partout. Il en va de même des rejets liés à l'énergie utilisée pour produire et transporter les matériaux qui servent à fabriquer les batteries (1,9 tonne) ; on a dit

que cette énergie prend la forme de gazole qui a partout dans le monde les mêmes rejets de CO₂ par litre.

Il en va tout autrement pour les deux autres types de rejets de CO₂ considérés : ceux qui sont liés à l'usage du véhicule électrique (25,2 tonnes) et ceux qui sont liés à la fabrication des batteries (12,7 tonnes). Ces deux processus consomment tous les deux beaucoup d'électricité, pour un montant identique partout, mais qui génère des quantités de CO₂ bien différentes selon le pays, ou si l'on préfère qui ont des coefficients γ différents – quinze fois plus élevé en Chine qu'en France par exemple.

Au total, dans le cas considéré (un véhicule muni de batteries chinoises et utilisé en Chine), le véhicule électrique rejette 39,6 tonnes de CO₂, soit 24,3 tonnes de plus que le véhicule traditionnel, qui en rejette 15,6. Le remplacement d'un véhicule traditionnel par un véhicule électrique entraîne une augmentation de 156% des rejets de CO₂.

Bien entendu, ce cas est le plus défavorable des neufs cas envisageables en combinant pays des batteries et pays d'utilisation. Le tableau 3 présente pour ces 9 combinaisons la valeur d'un indicateur synthétique : la variation en pourcentage des rejets de CO₂.

Tableau 3 – Variation de rejets de CO₂, selon le pays d'usage et le pays d'origine de la batterie

Pays d'utilisation :	France ($\gamma=0,051$)	Japon ($\gamma=0,543$)	Chine ($\gamma=0,776$)
Pays de la batterie :			
France	-71%	+31%	+56%
Allemagne, Japon	-20%	+83%	+131%
Chine	+5%	+132%	+156%

Note : Lecture du tableau : -71% est la variation, ici la diminution, des rejets de CO₂ causée par un véhicule équipé d'une batterie fabriquée en France, et qui roulerait en France, relativement aux rejets de CO₂ d'un véhicule traditionnel. Un tel cas de figure est totalement virtuel et hautement improbable. Il en va de même pour les autres cas de cette première ligne. Le cas de figure d'un véhicule équipé d'une batterie fabriquée au Japon et roulant en Chine est presque aussi virtuel et improbable. Les chiffres en italique se rapportent à ces cas théoriques virtuels. Les cas de l'Allemagne ($\gamma=0,523$) de la Corée ($\gamma=0,553$) et des Etats-Unis ($\gamma=498$) sont très semblables à celui du Japon ($\gamma=0,543$).

Dans sept des neufs cas considérés, le remplacement d'un véhicule traditionnel par un véhicule électrique entraîne une augmentation – pas une diminution – des rejets de CO₂, et une augmentation souvent considérable. Dans deux cas seulement, on observe une diminution des

rejets de CO_2 . Le premier est celui d'un véhicule électrique muni d'une batterie fabriquée en France, et utilisé en France. Ce cas, auquel correspond une réduction des rejets de CO_2 substantielle (-71%) est actuellement totalement irréaliste. Dans le cas d'un véhicule électrique équipé de batteries japonaises ou allemande et utilisé en France, cas un peu moins improbable, on observe aussi une réduction des rejets de CO_2 , plus modeste (-20%) mais réelle. Globalement cependant, le vaste mouvement de remplacement des véhicules traditionnels par des véhicules électriques concernera des cas comparables aux cas de la partie droite et inférieure du tableau 3, et se traduira, toutes choses égales par ailleurs, par une augmentation forte (environ un doublement) des rejets de CO_2 liés à l'automobile.

Analyses de sensibilité

La qualité des résultats obtenus ne vaut pas mieux que la qualité des valeurs des paramètres utilisés. Certains de ces paramètres, comme la distance (D), le contenu en CO_2 du litre de gazole (α), ou encore les coefficient de transformation de l'énergie en litres de carburants (μ) ou en kWh d'électricité (λ) peuvent être considérés comme très solides, et peu susceptibles de varier dans le temps. D'autres paramètres sont moins assurés pour aujourd'hui et/ou susceptibles de varier sensiblement dans les décennies à venir.

C'est notamment le cas des consommations (aux 100 km) en carburant (c_t) ou en électricité (c_e) des deux types de véhicules ; ces chiffres (qui ont beaucoup diminué au cours des décennies passées pour le véhicule traditionnel) vont certainement diminuer dans les années à venir, pour les deux types de véhicules. Il est intéressant d'utiliser le modèle pour évaluer l'impact d'une diminution de 50% de ces deux grandeurs.

C'est également le cas des contenus en CO_2 de l'électricité (γ). Ils déclinent partout. Ils vont continuer à diminuer. On évaluera l'impact d'une diminution de 30% de ces contenus.

C'est enfin le cas de l'énergie utilisée pour produire les matériaux de la batterie (PM) et pour produire la batterie elle-même (PB). Les valeurs utilisées sont déjà fragiles pour le présent. Elles le sont davantage encore pour le futur. On évaluera l'impact d'une diminution de 30% de ce paramètre.

Le tableau 4 présente ces différentes simulations, pour chacune de ces quatre diminutions, puis pour des combinaisons de ces diminutions. On pourrait évidemment se livrer à cet exercice pour chacun des 9 cas de la figure 3, mais le grand nombre de chiffres ainsi produits découragerait la lecture et l'analyse. On se limitera au cas d'un véhicule avec une batterie chinoise et qui circule en Chine (comme dans le tableau 2). C'est un cas extrême, mais en pratique important, et de toute façon illustratif, même s'il doit être extrapolé avec prudence. Le tableau donne simplement la différence entre les rejets du véhicule électrique et ceux du véhicule traditionnel, en tonnes de CO₂.

Tableau 4 – ΔCO₂ en fonction de diminutions de paramètres clés

	ΔCO ₂ (en tonnes)
Cas de base	24,3
Diminution :	
(1) de 50% de la consommation du VT (c_t)	+32,1
(2) de 50% de la consommation du VE (c_e)	+11,7
(3) de 30% du contenu en CO ₂ de l'électricité (γ)	+12,9
(4) de 30% de l'énergie incorporée dans batterie (PM, PB)	+19,9
(5) de (1) et (2)	+19,5
(6) de (1), (2) et (3)	+11,3
(7) de (1), (2) et (4)	+15,2
(8) de (1), (2), (3) et (4)	+12,4

Notes : ΔCO₂ est la différence entre les rejets de CO₂ du véhicule électrique et ceux du véhicule traditionnel. Le véhicule électrique considéré est utilisé en Chine, et il a une batterie fabriquée en Chine. Le cas de base est décrit dans le tableau 2. VT = véhicule traditionnel. VE = véhicule électrique

Le tableau 4 suggère que des modifications plausibles - en fait des diminutions - de la valeur des paramètres réduisent l'augmentation des rejets de CO₂ causée par l'introduction de véhicule électrique, mais ne l'éliminent nullement. Ce sur-rejet, qui était de 24 tonnes de CO₂ dans le cas de base, est compris entre 19 et 12 tonnes dans les scénarios (5) à (8). Il reste très élevé. Ces scénarios réduisent à environ 8 tonnes les rejets du véhicule traditionnel. Le véhicule électrique continue de rejeter presque deux fois plus de CO₂ que le véhicule traditionnel. Le tableau serait moins sombre pour des véhicules électriques fabriqués et/ou utilisés dans des pays à électricité moins carbonée que l'électricité chinoise, mais le bilan carbone du véhicule électrique y resterait négatif.

Conclusion

Cette analyse a montré que, contrairement à une opinion complaisamment répandue, le remplacement d'un véhicule traditionnel par un véhicule électrique a globalement pour effet une augmentation des rejets de CO₂. On notera que le calcul a été fait sans actualisation, en donnant aux rejets de CO₂ de l'année zéro le même poids qu'aux rejets de l'année 10. La question de savoir s'il est ou non souhaitable d'actualiser des flux de rejets de CO₂ est discutée, et l'on n'entrera pas ici dans ce débat. Mais il est sûr que ne pas actualiser est favorable au véhicule électrique. Bien entendu, un débat sur les coûts et les avantages du véhicule électrique ne se réduit pas cette dimension CO₂. Il faut également considérer les dimensions pollution, silence, industrie, ressources naturelles, stockage de l'électricité, coûts, etc. Il n'en reste pas moins que la dimension CO₂, généralement présentée comme un avantage, apparaît plutôt comme un coût, au moins si l'on accepte la revendication dominante de l'impérieuse nécessité de tout faire pour réduire les rejets de CO₂.

Références :

ADEME. 2013. *Elaboration selon les principes des ACV des bilans énergétique [...] des véhicules.*

CGDD. 2017. *Analyse coûts-bénéfices des véhicules électriques.* 95p.

Quiju Qiao, et al. 2017. « Comparative Study of the Life Cycle CO₂ Emissions from the Production of of Electric and Conventional Vehicles in China ». *Energy Procedia*. Vol 105. pp. 3584-95

Romare, Mia & Lisbeth Dahllof. 2017. *The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emission from Lithium-Ion Batteries.* IVL Swedish Environment Research Institute. 47p.

Yuan, Chris, et al. 2017. « Manufacturing energy aqnalysis of lithium-ion battery packs for electric vehicles ». *CIRP Annals*, vol. 66-1, pp. 53-56.

