

Voiture électrique : 697.612 km pour devenir verte ! Vrai ou faux ?

Auteur : Prof. Damien ERNST, University of Liège

Très récemment, la RTBF, un média belge, publiait un article intitulé « Voiture électrique : 697.612 km pour devenir verte ! » J'avais donné pour cet article une interview au journaliste Gérald Wéry et fait quelques calculs. Et effectivement, sous certaines hypothèses, je trouvais que lorsque l'on prenait en compte le CO₂ émis par la fabrication de la batterie d'un véhicule électrique, ce n'était qu'à partir de 697612 km parcourus que l'on pouvait considérer que le véhicule électrique émettait moins de CO₂ qu'une voiture à essence. On parle ici d'un véhicule électrique ayant une batterie de 80 kWh. On notera que certains véhicules électriques haut de gamme peuvent même être livrés avec des batteries plus grosses. A titre d'exemples, l'Audi E-Tron a une batterie de 95 kWh. Et le nouveau Tesla roadster une batterie de 200 kWh. Gérald Wéry et moi-même avons été vivement attaqués suite à la publication de cet article qui a été très mal compris sur le fond. J'ai d'ailleurs tweeté à ce sujet pour bien expliquer, de manière assez directe, ce qu'était le fond de mon intervention : <https://twitter.com/DamienERNST1/status/1104060419897991168>

Pour éviter la controverse et ces attaques sur les réseaux sociaux, la RTBF a décidé de le retirer de son site web. On soulignera qu'en dehors de son titre provocateur, l'article n'attaquait pas du tout la filière du véhicule électrique. L'article mentionnait par exemple que les véhicules électriques, contrairement aux véhicules thermiques en circulation à l'heure actuelle, n'émettent pas de NO_x et nettement moins de particules fines, ce qui a un effet très bénéfique sur la santé humaine.

La méthodologie utilisée pour calculer ce nombre de kilomètres a été vivement attaquée sur les réseaux sociaux par ce que l'on pourrait appeler, en étant un rien ironique, la secte des gens qui pensent qu'acheter une grosse voiture électrique de plus de 2 tonnes – comme la Jaguar I-Pace (2200 kg) par exemple – fait d'eux des exemples en matière de lutte contre le réchauffement climatique. Les attaques sur Twitter ont souvent été faites avec très peu de classe. On passera les détails. Néanmoins, certaines de ces attaques étaient instructives et comme je suis un scientifique, je n'hésite jamais à remettre en cause les choses que j'avais affirmées lorsque l'on me présente de nouveaux éléments d'information. Une telle attitude est à la base même de la pensée scientifique. Je vais donc refaire ci-après mes calculs, mais en y intégrant l'information collectée à partir de ces attaques pour discuter les hypothèses que j'avais utilisées pour faire mes calculs et même pour en changer une qui se doit de l'être. Je n'ai aucun problème à le reconnaître. Pour calculer le nombre de kilomètres à partir desquels une voiture électrique ayant une batterie de 80 kWh devenait « verte », on avait considéré que l'énergie totale nécessaire à sa fabrication était de 296 GJ. Ce chiffre provient de l'article "Manufacturing energy analysis of lithium ion battery pack for electric vehicles". L'article est disponible à l'adresse suivante : <https://bit.ly/2VMa4hA>

Comme ce chiffre de 296 GJ fait référence à une installation de petite taille, on peut s'attendre à ce que des économies d'échelle puissent être réalisées avec des installations industrielles de fabrication de batteries, ce que l'article mentionne. Il avance même un chiffre de 72% d'économie d'énergie, sans néanmoins citer de source derrière ce dernier. Je n'en n'avais pas tenu compte dans mes calculs précédents. C'était une erreur. On va donc travailler ici en en tenant compte. On notera que cette réduction de 72% d'énergie sur la partie manufacturière ne signifie pas 72% de réduction des 296 GJ nécessaires pour fabriquer la batterie dont j'avais tenu compte lors de mes calculs réalisés pour la RTBF. En effet, pour fabriquer une batterie il y a deux grandes étapes qui consomment beaucoup d'énergie : la fabrication des matières premières (100 GJ environ d'après l'article) et la fabrication de la batterie à partir de ces matières premières (196 GJ d'après l'article). Cette réduction de 72% ne s'applique dès lors qu'aux 196 GJ, ce qui nous donne comme énergie totale nécessaire pour fabriquer

la batterie de 80 kWh le chiffre de $100 + 54.88 = 154.88$ GJ au lieu des 296 GJ sur lesquels on s'était basé. Par la suite, on n'utilisera plus le GJ comme unité d'énergie, mais bien le kWh, une unité d'énergie qui me semble être plus conviviale. Exprimé en kWh, cette quantité d'énergie équivaut à 43022 kWh. A titre de comparaison, un ménage moyen en Belgique consomme environ 3500 kWh d'électricité par an.

Notre première hypothèse de travail sera donc la suivante :

Hypothèse 1 [énergie pour fabriquer une batterie]. *La quantité d'énergie nécessaire pour fabriquer une batterie de 80 kWh est égale à 43022 kWh.*

On notera que c'est la seule hypothèse que je change dans un premier temps par rapport à l'article publié par la RTBF. Je reviendrai avec un nouveau jeu d'hypothèses par la suite.

Voici la suite des calculs et les hypothèses associées. Ces hypothèses sont également discutées.

Hypothèse 2 [CO₂ émis par kWh de batterie fabriqué]. *1 kWh d'énergie utilisée pour fabriquer la batterie émet la même quantité de CO₂ que la combustion de 1 kWh d'essence.*

On rappelle que dans 1 litre d'essence, il y a 9.63 kWh d'énergie et que la combustion d'un litre d'essence produit 2.28 kg de CO₂. Le kWh d'énergie consommé pour fabriquer notre batterie équivaut donc à 0.236 kg de CO₂.

La fabrication de la batterie émet donc $0.236 \text{ [kg/kWh]} \times 43022 \text{ [kWh]} = 10153$ kg de CO₂ soit un peu plus de dix tonnes de CO₂.

Discussion hypothèse 2 : Considérer 236 gr de CO₂ par kWh d'énergie utilisé dans la fabrication du véhicule électrique est en fait fort peu. Prenons par exemple la phase fabrication de la batterie à partir des matières premières. Cette partie consomme principalement de l'énergie électrique. Aux USA, produire 1 kWh d'électricité conduit à une production d'environ 500 grammes de CO₂. En Chine, c'est encore plus. On est plus proche de 1 kilo de CO₂ que de 500 grammes. Un tiers de l'énergie utilisée pour fabriquer notre batterie est liée à la partie manufacturière. Ce tiers pourrait donc être associé à quatre fois plus d'émissions de CO₂ que ce que l'on avait considéré précédemment. Ce qui nous ferait *doubler* le nombre de tonnes de CO₂ émis pour la fabrication de la batterie. Il est donc probable que la fabrication d'une batterie de 80 kWh en Chine conduise en fait à la production de 20 tonnes de CO₂ si l'on adapte l'Hypothèse 2 pour tenir compte des spécificités du mix électrique chinois. Vive le made in China ! On notera que les émissions de gaz à effet de serre en Belgique sont de l'ordre de 8.5 tonnes de CO₂ par an par personne.

Hypothèse 3 [consommation des véhicules]. *Le véhicule électrique consomme 20 kWh aux 100 km et la voiture à essence 6 litres aux 100 kilomètres.*

Discussion hypothèse 3 : Pour une Tesla S, le 20 kWh par 100 km semble être plus ou moins valable même si sur les réseaux sociaux, les plus grands défenseurs de la voiture électrique parlaient plutôt d'un 23 kWh par 100 km. Un ami qui a une Tesla X me dit qu'il est plutôt à 26-27 kWh par 100 km en ayant un style de conduite économe. Un petit véhicule électrique du type Nissan Leaf consommera plutôt 15 kWh. Pour une Jaguar I-Pace, on serait plutôt au-dessus de 30 kWh par 100 km. Le journaliste Gérald Wery m'a fait savoir que lors de ses essais, il a obtenu une valeur de 28 kWh pour l'Audi E-Tron sans l'air conditionné allumé, et 34 kWh pour la Jaguar I-Pace avec l'air conditionné allumé. Il m'a également précisé que ces valeurs ont été obtenues en adoptant le mode de roulage « efficiency » des voitures, avec, je le cite, le pied très très léger.

Le 6 litres aux 100 km est sans doute faible pour une voiture premium, comme le sont les Tesla S ou la Jaguar I-Pace. On pourrait être plutôt autour de 8 litres aux 100 kilomètres pour une voiture premium essence. Pour ma voiture, une Citroën C1, je suis à 5.5 litres aux 100 km. On notera que l'on aurait pu aussi prendre pour la comparaison une voiture diesel qui émet environ 10% moins de CO₂ qu'une voiture à essence de même gabarit. Sans oublier de souligner que le champion de la filière véhicules thermiques en terme d'émissions de CO₂ est le véhicule roulant au gaz naturel (CNG). On parle même pour cette filière de plus de 10% de réduction d'émissions de CO₂ par rapport au diesel lorsque l'on considère le début de la chaîne de production jusqu'au pot d'échappement. Mieux encore. La voiture hybride roulant au gaz naturel ! Avec des petites batteries de moins de 5 kWh, les voitures hybrides arrivent à afficher des performances impressionnantes. La première génération de Toyota Prius, c'était par exemple une petite batterie de 4.4 kWh et une consommation bien en dessous des 5 litres aux 100 km. On notera aussi qu'une personne qui veut avoir 400 km d'autonomie avec son véhicule électrique est obligée d'opter pour un véhicule ayant une batterie de l'ordre de 80 kWh, ce que l'on ne trouve pour l'instant que dans les modèles premium. Il y a fort à parier que d'ici 2-3 ans, des voitures plus modestes seront également proposées avec des batteries de 80 kWh. A cet égard, il est bon de souligner que la Nissan Leaf e+ qui sortira en juin 2019 aura une batterie de 62 kWh.

Hypothèse 4 [grammes de CO₂ par kWh électrique] *Le kWh électrique stocké dans la batterie – et donc utilisable par le véhicule électrique – est associé à 550 grammes d'émissions de CO₂.*

Avec cette nouvelle hypothèse, on peut donc calculer que rouler 100 km avec notre véhicule électrique produit $20 \times 0.55 = 11$ kg de CO₂.

Discussion hypothèse 4 : Le chiffre de 550 grammes est l'intensité en CO₂ du mix électrique allemand. Au niveau européen la moyenne tourne plutôt autour de 300 gr par kWh, voir un peu plus. Au début des années 2000, on tournait plutôt autour de 400 gr par kWh en Europe. On notera que ces chiffres sont parfois controversés, notamment parce qu'il est difficile de quantifier exactement les émissions de CO₂ d'une filière de production d'électricité sur l'ensemble de son cycle de vie et l'ensemble de son périmètre. On a souvent tendance à les sous-estimer. Pour la filière nucléaire les estimations peuvent varier de 15 à ... 140 grammes de CO₂ par kWh produit. Pour les filières renouvelables comme le solaire, l'éolien et l'hydraulique, on parle souvent de valeurs variant entre 10 et 40 grammes de CO₂ par kWh sur leur cycle de vie. Notons que pour un panneau photovoltaïque installé dans le nord de l'Europe, cela pourrait être significativement plus que 40 grammes. On remarquera aussi qu'il y a des pertes en rechargeant la batterie du véhicule électrique. On parle de 5% environ et cela dépend de la vitesse de chargement. Plus la vitesse est élevée, plus il y a des pertes. Il y a aussi des pertes dans la batterie lors de la décharge et ces dernières sont plus élevées lorsque la puissance soutirée des batteries est grande. C'est la raison pour laquelle les performances énergétiques de la batterie d'un véhicule électrique s'effondrent un peu quand vous roulez à grande vitesse avec. Il y a aussi des pertes au niveau du réseau électrique pour acheminer cette électricité de sa source de production vers la voiture. Elles sont de l'ordre de 10% en France pour acheminer le courant vers un utilisateur connecté au réseau basse tension. On pourrait donc en tenant compte de ces pertes être à plus de 630 grammes de CO₂ produit par kWh d'électricité stockée dans la voiture si effectivement la voiture était alimentée par le mix électrique allemand

Hypothèse 5 [grammes de CO₂ par litre d'essence consommé par la voiture] *Un litre d'essence consommé par une voiture correspond à l'émission de 2.28 kg de CO₂*

Avec cette hypothèse, notre véhicule à essence émettra 6×2.28 kg = 13.68 kg de CO₂ par 100 km parcourus.

Discussion hypothèse 5 (et un peu la 4 aussi) : 2.28 kg correspondent à la quantité de CO2 produit par la combustion de 1 litre d'essence. Cependant, l'extraction du pétrole, son transport et son raffinage émettent aussi du CO2. Un chiffre m'a été communiqué plusieurs fois : brûler un litre d'essence dans votre voiture émettrait en fait une quantité de CO2 égale à la quantité de CO2 produite par la combustion de 1.4 litre d'essence. On serait dès lors peut-être à $1.4 \times 13.68 = 19.15$ kg de CO2 par 100 km parcourus. On notera que le gaz utilisé pour produire de l'électricité doit aussi être extrait et transporté. De plus, l'extraction du gaz, surtout du gaz de schiste, émet aussi du CH4 dans l'atmosphère, un puissant gaz à effet de serre. On n'a pas tenu compte de cela pour évaluer les émissions de gaz à effet de serre de notre voiture électrique. On n'a également pas tenu compte du fait que construire et maintenir un réseau électrique a un coût CO2 non négligeable.

Hypothèse 6 [CO2 émis par la fabrication des voitures] *La fabrication de la voiture électrique émet une quantité de CO2 égale à la quantité de CO2 utilisée pour fabriquer la voiture à essence plus la quantité de CO2 émise pour fabriquer la batterie.*

Discussion hypothèse 6 : On pourrait raisonnablement considérer qu'avec cette hypothèse, la voiture électrique est défavorisée notamment dû au fait qu'un moteur électrique est plus simple qu'un moteur thermique et donc que la fabrication de ce dernier émettrait moins de CO2. C'est très difficile d'y voir vraiment clair à ce sujet, il manque des chiffres. On en profite au passage pour souligner que plus la voiture est grosse (essence, diesel ou électrique), plus son processus de fabrication aura tendance à émettre du CO2. On ne comprend dès lors pas vraiment cet engouement simultané pour les gros SUVs et les marches pour le climat dans le monde. Quelque chose m'échappe.

Et maintenant le calcul !

Sur base de ces hypothèses, calculons le nombre de kilomètres parcourus à partir duquel une voiture électrique commence à émettre moins de CO2 qu'une voiture à essence.

Par 100 km parcourus, notre véhicule électrique va produire $13.68 - 11 = 2.68$ kg de CO2 de moins qu'un véhicule à essence. Mais il partait avec un « petit » désavantage : les 10153 kg de CO2 produits lors de la fabrication de la batterie. Il lui faudra donc rouler $10153 / 2.68 \times 100 = 378843$ km pour rattraper ce retard. C'est moins que les 697612 km initialement annoncés.

Un nouveau jeu d'hypothèses

Venons maintenant avec un nouveau jeu d'hypothèses que je trouve fort intéressant, et qui est plus favorable aux véhicules électriques. Je revisite tout d'abord l'Hypothèse 3 qui devient maintenant :

Hypothèse 3 [consommation des véhicules]. *Le véhicule électrique consomme 23 kWh aux 100 km et la voiture à essence 6 litres aux 100 kilomètres.*

Le 20 kWh par 100 km était même de l'avis des grands défenseurs de l'électrique, beaucoup trop optimiste pour une grosse voiture électrique. On est sans doute d'ailleurs plus proche de 30 kWh que de 23 kWh dans la réalité.

Je revisite également l'Hypothèse 4. La nouvelle Hypothèse 4 est la suivante :

Hypothèse 4 [grammes de CO2 par kWh électrique] *Le kWh électrique stocké dans la batterie – et donc utilisable par le véhicule électrique – est associé à 317 grammes d'émissions de CO2.*

Pour arriver à ce nouveau chiffre de 317 grammes par kWh, je fais en fait deux sous-hypothèses. Premièrement, je choisis un mix électrique ayant une intensité carbone de 275 grammes par kWh, soit la moitié de l'intensité carbone du mix électrique allemand actuel. Je pense que l'intensité carbone moyenne du mix électrique européen au cours de ces 10 prochaines années, une période de temps compatible avec la durée de vie d'une voiture électrique pourrait tourner autour de cette valeur. Le renouvelable se développe bien mais on va également perdre beaucoup de capacité nucléaire en Europe dans les 7-8 années à venir, environ 15 GW. Cela va être à mon avis assez difficile de passer avant 2025 sous cette intensité carbone de 275 grammes de CO2 par kWh généré pour le mix électrique européen. Deuxièmement, je considère que pour 1 kWh stocké dans la batterie, il faut générer 1,15 kWh d'électricité pour prendre en compte les pertes au niveau du réseau de distribution et les pertes lors de la recharge de la batterie. Encore une fois cette sous-hypothèse me semble être assez optimiste pour la filière électrique.

La dernière hypothèse que je change est l'Hypothèse 5. La nouvelle Hypothèse 5 est la suivante :

Hypothèse 5 [grammes de CO2 par litre d'essence consommé par la voiture] *Un litre d'essence consommé par une voiture correspond à l'émission de 3.2 kg de CO2.*

Je considère avec cette nouvelle hypothèse que consommer 1 litre d'essence équivaut en terme d'émissions de CO2 à brûler en fait 1.4 litre d'essence. Cela permet de prendre en compte les émissions de CO2 liées à l'extraction, au raffinage et au transport des produits pétroliers. On notera que je devrais sans doute aussi pour être juste avec la filière véhicules à essence considérer qu'il y a un coût CO2 caché derrière la construction, la maintenance et l'opération des réseaux électriques, ce que je ne fais pas.

Avec ce nouveau jeu d'hypothèses, on peut voir que par 100 km parcourus, notre véhicule électrique va maintenant produire $6 \times 3.2 - 23 \times 0.317 = 19.2 - 7.291 = 11.90$ kg de moins de CO2 qu'un véhicule à essence. Il lui faudra donc rouler $10153 / 11.90 \times 100 = 85319$ km pour devenir plus vert qu'un véhicule à essence. On remarquera que si j'avais pris 28 kWh pour 100 km pour le véhicule électrique, comme Gérald Wery l'a observé pendant ses essais, j'aurais obtenu une valeur égale à $10153 / (6 \times 3.2 - 28 \times 0.317) = 98343$ km.

Essayons maintenant de rediscuter aussi un rien l'Hypothèse 1 et l'Hypothèse 2. Ces deux hypothèses nous amènent à des émissions de CO2 de l'ordre de 10153 kg pour la fabrication de la batterie de 80 kWh. Comme discuté précédemment, les émissions de CO2 liées à la fabrication de la batterie peuvent varier assez fort, en fonction de l'endroit où la batterie est fabriquée. C'est très difficile d'y voir clair à ce sujet. J'ai l'impression que l'on doit se situer quelque part en 2019 dans l'intervalle 8000 kg – 18000 kg de CO2 émis pour la fabrication de 80 kWh de batteries. Avec notre nouveau jeu d'hypothèses, un véhicule électrique ayant une batterie de 80 kWh commencerait à avoir une empreinte carbone inférieure à celle d'un véhicule à essence quelque part entre plus ou moins 67226 km et 151259 km parcourus. Avec l'ancien jeu d'hypothèses, on serait plutôt dans l'intervalle 298507 km – 671641 km.

Que conclure de ces chiffres ?

Je vous laisse conclure ce que vous voulez de ces chiffres, mais il y a certainement beaucoup à dire. Comme les hypothèses sont parfaitement détaillées et les calculs bien expliqués, vous pouvez même penser générer d'autres résultats en variant les hypothèses. Un cas très intéressant à traiter est celui de la voiture hybride roulant au gaz naturel ou à l'hydrogène. Il implique sans doute une revisite de l'Hypothèse 6.

J'ai juste envie de terminer cet article en discutant un rien du cas de la Chine. La Chine développe massivement sa filière véhicule électrique, principalement pour des raisons de santé publique. La

qualité de l'air est terriblement mauvaise dans les grandes villes chinoises. Remplacer les anciens véhicules thermiques par des véhicules électriques, c'est réduire les émissions de NOx et de particules fines qui sont toxiques et donc améliorer la qualité de l'air. Dans le cas de la Chine, avec un mix électrique qui avoisine le kilo de CO2 par kWh produit, et qui restera à mon avis bien au-dessus des 600 grammes par kWh dans les 10 ans à venir, même la substitution du véhicule à essence par des véhicules électriques ayant des batteries modestes d'une taille d'environ 40 kWh, risque de s'accompagner d'une hausse des émissions de CO2. Vu la taille du marché chinois, cela n'est pas rassurant lorsque l'on garde à l'esprit que le GIEC nous dit qu'il faut impérativement réduire rapidement nos émissions de CO2 pour éviter une catastrophe planétaire.

Autre point important concernant la Chine : les entreprises chinoises qui fabriquent des batteries ne sont pas soumises à une taxe CO2 comme le sont les entreprises européennes qui rentrent dans le système ETS. D'un point de vue de la lutte contre le réchauffement climatique c'est ridicule, car c'est un incitant à fabriquer les batteries des véhicules électriques en Chine où l'intensité carbone est plus élevée qu'en Europe. Il est vraiment urgent que l'Europe instaure une taxe carbone sur les importations. Je ne suis pas le seul à le dire mais rien ne semble bouger.

Epilogue

Un excellent ami à moi, que l'on pourrait qualifier d'écologiste radical, m'a dit avec une pointe d'humour : « Il est totalement scandaleux que le titre de cet article publié sur le site web de la RTBF puisse laisser penser qu'un véhicule électrique puisse être vert ! ». Cela donne à réfléchir.