

BIBLIOGRAPHIE

T. Folger, **Vers une redéfinition du kilogramme**, *Pour la Science*, n° 473, pp. 62-69, mars 2017.

R. Davis, « **Le nouveau kilogramme sera plus pratique** », *Pour la Science*, n° 473, pp. 70-71, mars 2017.

T. J. Quinn, **From Artefacts to Atoms. The BIPM and the Search for Ultimate Measurement Standards**, Oxford university press, 2012.

J.-P. Uzan et R. Lehoucq, **Les Constantes fondamentales**, Belin, 2005.

J.-M. Lévy-Leblond, **On the conceptual nature of the physical constants**, *La Rivista del Nuovo Cimento*, vol. 7(2), pp. 187-214, 1977.
En français : <https://bit.ly/2QnQd5g>

ET LA SECONDE ?

Toutes les unités du système international (hormis la mole) vont bientôt toutes découler d'une seule unité, la seconde. Mais la définition de celle-ci, fondée sur les propriétés d'un atome, reste tributaire de nos connaissances actuelles. Pour l'instant, on ne sait pas mesurer G , la constante fondamentale de la gravitation, avec une précision suffisante pour redéfinir la seconde à partir de cette constante. Mais d'autres pistes sont à l'étude...

compte ces désaccords en déterminant, sur la base des résultats expérimentaux disponibles, la meilleure estimation possible de chaque constante. Or ce travail met en œuvre une rationalité non seulement théorique, mais aussi pratique. Confrontés à des résultats expérimentaux qui ne s'accordent pas entre eux, obtenus par une pluralité d'agents humains, les membres du Codata doivent tout d'abord passer par une phase de délibération.

Cette délibération est fondée sur un examen critique de la qualité des différentes expériences et des incertitudes qui accompagnent leurs résultats. Certes, les considérations scientifiques y sont au premier plan, mais pas seulement. Le Codata doit en effet arbitrer entre plusieurs objectifs concurrents : comment traiter les discordances ? Que faire des valeurs isolées ? Faut-il opter pour le consensus et retenir toutes les valeurs, quitte à élargir l'incertitude du résultat ? Ou plutôt réduire les incertitudes et s'exposer au dissensus et à l'erreur en écartant les valeurs discordantes ? Le conflit ne peut être tranché par la seule raison théorique, car il appelle à établir une hiérarchie entre des valeurs humaines. La délibération comporte donc nécessairement des aspects subjectifs et politiques. C'est seulement à l'issue de cette étape délibérative que commence la phase d'estimation calculatoire, où l'on déduit des résultats expérimentaux retenus la valeur de la constante, en appliquant une méthode d'ajustement de type méthode des moindres carrés.

Dans ce travail d'ajustement, l'objectif des métrologues du Codata est à l'opposé de celui des expérimentateurs qui testent les théories et des explorateurs : lorsqu'ils testent des théories, les expérimentateurs s'efforcent d'ajuster celles-ci au monde pour le décrire. Les explorateurs cherchent eux aussi à ajuster leurs valeurs au monde dans un but descriptif. Tandis que les métrologues imposent à des constantes de satisfaire les relations que dictent les théories admises, et ajustent ainsi au contraire les valeurs numériques des constantes aux théories existantes. L'objectif des métrologues du Codata est non pas de décrire la réalité, mais de fournir à tous les agents de par le monde des repères communs visant à régler leurs activités de manière à ce que les expériences, les actions et les décisions qu'ils sont susceptibles d'élaborer de façon indépendante s'accordent et soient compatibles. Par là, ils s'assurent en même temps de la cohérence de nos théories entre elles. Ainsi, l'ajustement mis en œuvre dans le processus d'estimation revêt-il une fonction pratique de coordination, et non pas une fonction descriptive attachée au monde tel qu'il est.

Cependant, la table des valeurs « recommandées » des constantes fondamentales est provisoire : le Codata la révisé tous les quatre

ans afin de tenir compte des avancées théoriques et expérimentales. Il en ira tout autrement pour les valeurs des constantes h , k , e et N_A dont le Codata a annoncé les valeurs lors d'une séance extraordinaire en septembre 2017 : ces valeurs sont désormais fixées, sans incertitude, et serviront, après la ratification définitive de la réforme lors de la Conférence générale des poids et mesures, du 13 au 16 novembre 2018, à redéfinir les unités de masse, de température, de courant électrique et de quantité de matière.

Le travail d'ajustement se prolonge ainsi par un travail normatif, un acte législatif qui participe de l'édiction d'une norme. Là encore, la démarche est opposée à celle des expérimentateurs qui testent les théories : ici, le monde est appelé à s'ajuster aux normes – non pas certes le monde réel muet, indépendant de nous, mais le monde conceptualisé, mis en forme, dans lequel se déploie l'action humaine, résultat d'un travail tout à la fois normatif, expérimental et institutionnel ; le monde social et technique construit par nous et dans lequel nous pouvons organiser et coordonner nos actions.

DEUX VISIONS, DEUX MONDES

Finalement, la réforme du système international articule deux directions d'ajustement, l'une théorique, l'autre pratique, dont la conjugaison éclaire le processus de développement de nos connaissances. D'un côté, les expérimentateurs explorateurs cherchent à s'ajuster au monde. Ils font des erreurs systématiques inassignables puisque nous sommes tous dans l'ignorance du monde réel. De l'autre, les métrologues transforment, par un travail spécifique, les tentatives de description des explorateurs en directives auxquelles devra se conformer le monde technique et social humain afin que les usagers puissent y coordonner leurs actions.

Les deux types d'ajustement ne sont pas étanches. D'un côté, l'explorateur se laisse inévitablement guider par les résultats des autres, et pas seulement par le monde réel. Ses nouveaux résultats de mesure ont ainsi tendance à se rapprocher de ceux déjà obtenus du simple fait qu'il a connaissance des résultats antérieurs. Cet effet nuit à la recherche des erreurs systématiques inconnues en masquant les désaccords qui auraient pu surgir entre les résultats. D'un autre côté, les actions des usagers, toutes charpentées qu'elles soient par l'infrastructure du monde humain construit, sont néanmoins bel et bien plongées dans le monde réel et sont toujours susceptibles de mettre au jour un écart irréductible au monde tenu pour vrai.

C'est ainsi que du nouveau, de l'inédit, peut jaillir, telle une étincelle, du frottement entre les deux mondes, jamais parfaitement ajustés l'un à l'autre. ■

L'ESSENTIEL

> Pour l'heure, l'empreinte écologique des voitures électriques est presque aussi négative que celle des voitures à moteur thermique.

> De grandes quantités de gaz à effet de serre sont émises lors de la fabrication des batteries des véhicules électriques. De plus, la production de l'électricité

nécessaire à la recharge des batteries est souvent associée à d'importantes émissions, notamment en Allemagne.

> Le bilan ne s'améliorera que lorsqu'on produira davantage d'électricité « propre ».

> D'autres formes de pollution que les gaz à effet de serre sont aussi à prendre en compte.

L'AUTEUR



CHRISTOPHER
SCHRADER
journaliste
scientifique
à Hambourg,
en Allemagne

Les voitures électriques sont-elles écologiques?

On présente l'adoption des voitures électriques comme une étape décisive de la transition énergétique. Mais un long chemin reste à parcourir avant que ces véhicules soient vraiment moins polluants que les voitures classiques. Le cas allemand, notamment, l'illustre.



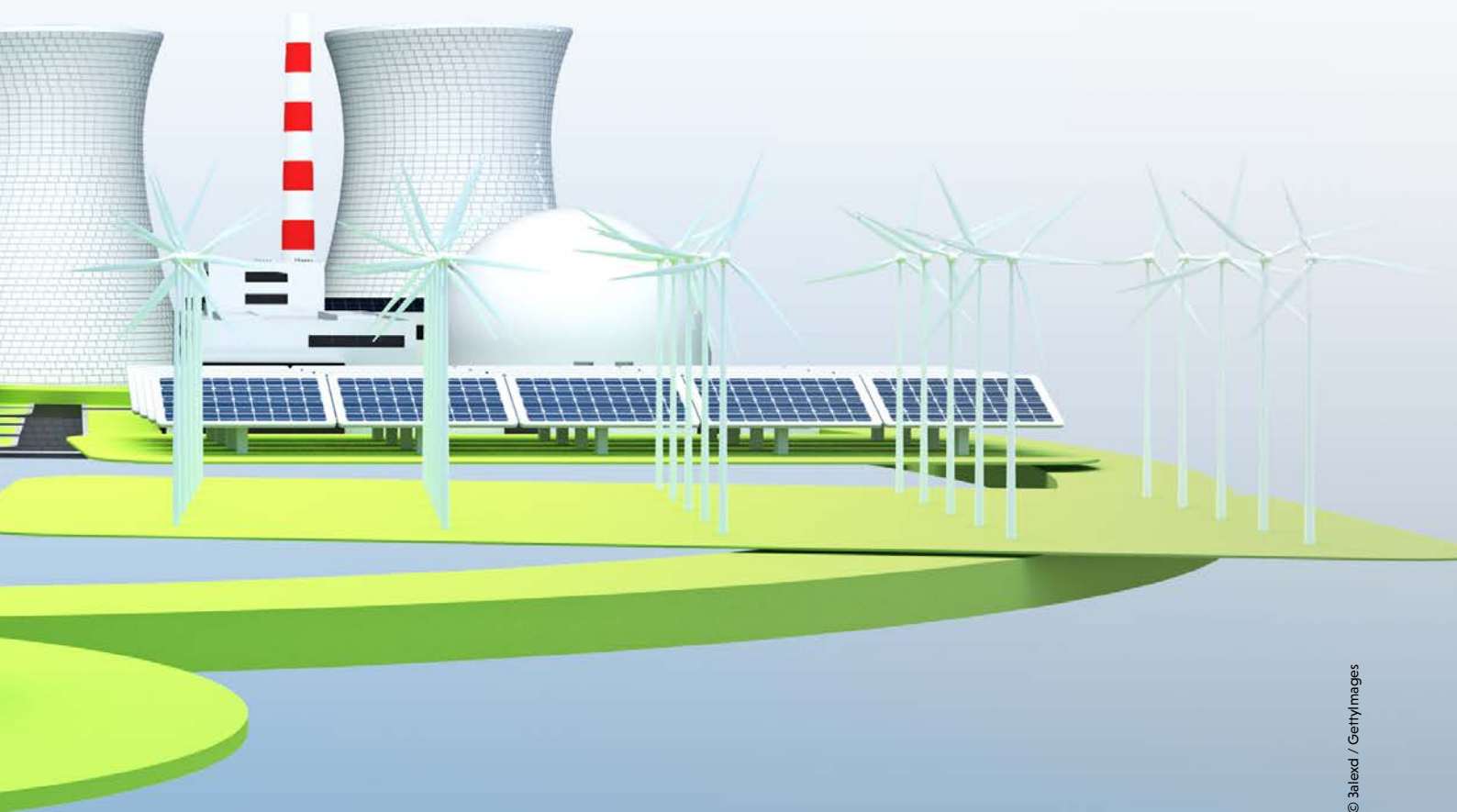
Un passant regardant une voiture électrique circuler peut avoir l'impression que l'on roule désormais sans émettre de gaz à effet de serre. Plusieurs gouvernements européens placent les véhicules électriques au centre de leur stratégie de décarbonation et les classent comme propres. Ainsi, dans son « plan climat », le gouvernement français prévoit de « mettre fin à la vente des voitures émettant des gaz à effet de serre d'ici à 2040 ». L'électromobilité « propre » serait-elle donc pour bientôt ?

Hélas non ! Les voitures électriques sont aussi à l'origine d'émissions de gaz à effet de serre. Certes, les Tesla, Smart, Golf et autres BMW électriques n'ont pas de pot d'échappement, mais elles consomment de l'électricité qui, elle, n'est pas « verte ». Leur propreté dépend donc de la part d'électricité provenant de sources renouvelables dans le pays où elles roulent. En 2017, en Allemagne, l'électricité provenait à 51% de centrales thermiques et à 31,1% de sources d'énergie renouvelables. La même année en France, plus de 72,3% de l'électricité ont été produits par des centrales nucléaires, tandis que la part des énergies renouvelables

n'atteignait que 16,1%. L'arrivée d'électricité provenant de sources d'énergie renouvelables réduit, mais ne fait pas disparaître, les effets climatiques des voitures électriques. « L'électromobilité a un coût écologique », assène Eckart Helmers, chimiste à l'université de Trèver, en Allemagne, qui s'est spécialisé dans le bilan écologique des véhicules électriques. « Faire circuler de tels véhicules d'au moins 800 kilogrammes implique une émission notable de dioxyde de carbone (CO₂) ».

UN BILAN ÉCOLOGIQUE LIÉ À DE NOMBREUX FACTEURS

Établir le bilan écologique d'une voiture électrique est complexe. Ici, on examinera cette question en se concentrant sur les seules émissions de gaz à effet de serre associées à la production et à l'usage d'une voiture électrique au cours de son cycle de vie ; on laissera de côté nombre de formes de pollutions périphériques au transport automobile, telles les effets de l'extraction pétrolière sur l'environnement ou encore l'élimination des batteries usagées. La question sera étudiée en s'appuyant sur les calculs que l'on fait dans mon pays, l'Allemagne. Même si, en France, où le mix énergétique est différent, d'autres calculs >



> doivent être proposés (voir l'encadré page 66), le cas allemand et les raisonnements menés sont caractéristiques de cet aspect de la transition énergétique, et instructifs.

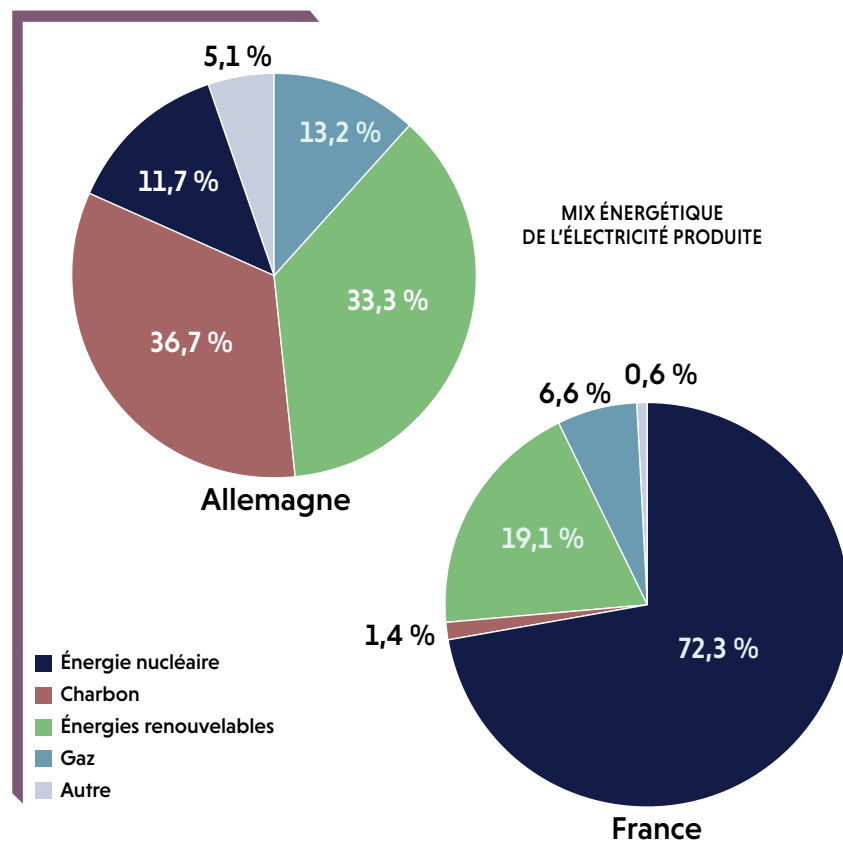
Aucun bilan écologique sérieux ne semble indiquer une innocuité climatique de l'électromobilité. Dans le meilleur des cas, les émissions de gaz à effet de serre associées à la production et à l'utilisation des véhicules électriques sont inférieures à celles des voitures à carburant. Dès lors, la bonne question à se poser est celle-ci : une fois leur usage terminé, les voitures électriques ont-elles un meilleur bilan écologique que les voitures classiques ?

Ce n'est pas facile à déterminer, tant les facteurs entrant en ligne de compte sont nombreux : consommation du véhicule, origine de l'électricité utilisée, effet du climat sur la batterie, puissance et durée de vie du véhicule, politique vis-à-vis du transport électrique... Tous ces facteurs déterminent le bilan écologique du cycle de vie. D'où les avis contrastés des experts : pour Eckart Helmers, l'électromobilité est le « plus grand progrès écologique dans le secteur automobile depuis 100 ans », tandis que pour Dieter Teufel, qui dirige l'Institut pour l'environnement et la prévision à Heidelberg (l'*Umwelt- und Prognose-Institut* ou UPI) « les voitures électriques aggravent beaucoup le problème climatique ».

LES BATTERIES, UN POINT CENTRAL

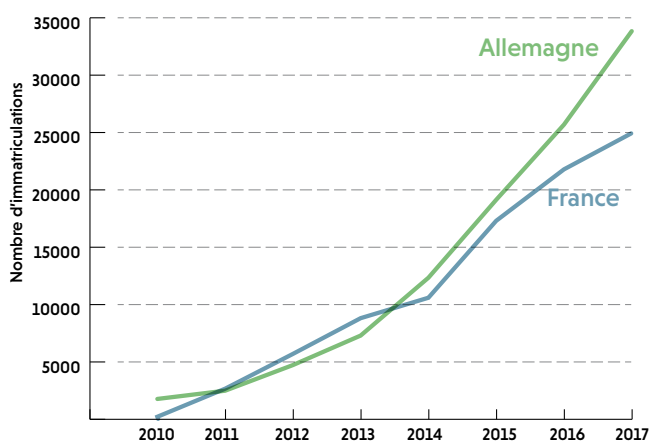
De temps à autre, une nouvelle étude met en avant tel ou tel aspect et l'image de la voiture électrique dans le public évolue. Par exemple, au cours de l'été 2017, l'institut suédois de recherche sur l'environnement (IVL) a publié de nouvelles données sur la production des batteries. L'encre en était à peine sèche que le puissant hebdomadaire *Der Spiegel* titrait déjà « Les illusions électriques » et évoquait carrément une « fraude écologique ». Peu après, l'Öko-Institut, une association allemande de recherche sur l'environnement, présentait un rapport sur les moyens de renforcer l'intérêt écologique de l'électromobilité. Le ton impliquait que cet intérêt ne peut absolument pas être mis en doute... Aussi, en novembre 2017, un groupe de quinze experts choqués que la discussion sur l'électromobilité semble se dérouler « sans tenir compte des lois de la physique » s'est rassemblé autour de Klaus Beckmann, ex-directeur de l'institut allemand d'urbanisme, pour mettre de l'ordre dans les idées en publiant une lettre ouverte.

Tout bilan écologique commence par un examen de ce qui se passe en production. Les véhicules électriques sont d'une construction bien plus complexe que les voitures classiques. Quoique de façon discrète, Volkswagen et BMW l'expliquent dans les brochures



environnementales accompagnant la e-Golf et la BMW i3 : il en ressort que la fabrication de ces véhicules entraîne l'émission de deux fois plus de CO₂ que celle d'une voiture classique comparable. Concrètement, 9 tonnes sont émises dans le cas de la Volkswagen et 4 dans celui de la BMW. La différence entre ces deux valeurs est liée à la fabrication des batteries. Dans l'étude de l'IVL mentionnée plus haut, on évalue les émissions dues à leur production entre 150 et 200 kilogrammes d'équivalent CO₂ par kilowattheure d'électricité stockée (certains des divers gaz émis ont, à masse égale, un effet de serre plus puissant que le CO₂, d'où la notion d'« équivalent CO₂ » pour tenir compte de cette réalité).

D'autres chercheurs parviennent à des valeurs comparables. Ainsi, dans une étude de 2017, l'équipe dirigée par Jens Peters, de l'Institut de technologie de Karlsruhe, trouve que la fabrication des batteries entraîne l'émission de 110 kilogrammes d'équivalent CO₂ par kilowattheure de stockage. Chargé par l'Agence fédérale de l'environnement de procéder aux mêmes estimations, l'Ifeu (*Institut für Energie und Umweltforschung*, l'Institut pour la recherche sur l'énergie et l'environnement de Heidelberg) arrive à 140 kilogrammes par kilowattheure de stockage. Une équipe dirigée



LES IMMATRICULATIONS DE VÉHICULES ÉLECTRIQUES

De plus en plus de véhicules électriques roulent sur les routes de France et d'Allemagne, pour prendre ces deux exemples (voir le graphique ci-contre). La signification de cette évolution est cependant différente en Allemagne, où la transition énergétique est plus avancée, mais où l'on produit 48 % de l'électricité en brûlant des carburants fossiles, et en France, où l'on n'en brûle que 10,2 %, mais où 76,1 % de l'électricité est d'origine nucléaire.



par Linda Ellingsen, écologue à l'université des sciences et technologies de Norvège, trouve un peu plus de 170 kilogrammes d'équivalent CO₂ par kilowattheure.

La Golf électrique, par exemple, disposait à l'origine d'une batterie de seulement 24 kilowattheures; cela correspond à des émissions comprises entre 3 et 5 tonnes d'équivalent CO₂, soit à peu près la valeur mentionnée dans la présentation dont, en 2014, Volkswagen s'est servi pour vanter sa voiture. Mais la capacité de stockage de la même

voiture est désormais passée à 36 kilowattheures, ce qui implique une augmentation de moitié des émissions de gaz à effet de serre associées à la production de ses batteries.

Si le principe chimique des batteries n'a pas d'impact notable sur les émissions, ce n'est pas le cas de leur provenance géographique, puisque les usines qui les fabriquent consomment de l'électricité. Beaucoup de batteries sont fabriquées en Chine, où une grande part de l'électricité est produite dans des centrales thermiques au charbon particulièrement polluantes, ce qui a un effet très négatif sur le bilan écologique des voitures. «Du reste, tout dépend de la région chinoise de provenance des batteries, précise Peter Kasten, de l'Öko-Institut. Au sud de la Chine, des sources d'énergie renouvelables fournissent un tiers de l'électricité; au nord, ce sont surtout des centrales au charbon.»

En résumé, les batteries pour voitures électriques ont une très forte empreinte écologique: l'émission associée à la production d'une batterie représenterait en moyenne quelque 5 tonnes d'équivalent CO₂, ce qui équivaut à l'émission due à la combustion de 1900 litres d'essence ou de 1670 litres de diesel. Cela implique que les véhicules thermiques les plus économes ont quelque 40 000 kilomètres >

Fabriquer une batterie équivaut, en moyenne, à brûler 1900 litres d'essence

> d'avance avant que leurs émissions n'atteignent celles de la seule production d'une voiture électrique.

Notons que dans cette comparaison, les émissions de gaz à effet de serre de ce que l'on nomme la « chaîne amont » (c'est-à-dire, dans le cas des carburants fossiles, de l'extraction, du raffinage et du transport à la pompe) ont été prises en compte. À cet égard, le Centre de recherche sur l'économie de l'énergie de Munich (*Forschungsstelle für Energiewirtschaft*) a publié des chiffres précis: la production de 1 kilowattheure d'énergie par combustion de diesel entraîne l'émission de 299 grammes de CO₂, dont 33 grammes d'émissions amont. Pour l'essence, les chiffres sont de 295 et de 61 grammes respectivement. Lorsqu'on brûle 1 litre d'essence, un peu moins de 9 kilowattheures d'énergie sont libérés, contre près de 10 kilowattheures dans le cas du diesel.

L'EMPREINTE CARBONE DE L'ÉLECTRICITÉ

Quiconque croit que les voitures électriques n'émettent pas de gaz à effet de serre commet une erreur de raisonnement: il ou elle suppose que ces véhicules sont rechargés à l'électricité verte, c'est-à-dire à l'électricité produite par des sources d'énergie renouvelables. Le courant du réseau ne saurait cependant être séparé en une part « verte », une part « carbonée », une part « nucléaire », etc. Un mélange de courants de diverses et nombreuses provenances circule dans les câbles! Selon l'Agence allemande fédérale de l'environnement (*l'Umweltbundesamt*), en 2016, en Allemagne, chaque kilowattheure de recharge était associé à l'émission de 527 grammes de CO₂ en moyenne. À chaque recharge, une Ioniq de Hyundai émet ainsi, indirectement, 60 grammes de CO₂ par kilomètre parcouru, une Opel Ampera-e 76 grammes, une Citroën Berlingo 93 grammes, la Ford Focus Electric 81 grammes et le modèle S de Tesla pas moins de 125 grammes (*pour l'équivalent en France, voir l'encadré ci-contre*).

En l'absence de données fiables sur la consommation électrique dans le trafic réel, on doit fonder ce genre de calcul sur les consommations annoncées par les constructeurs. Mais on peut supposer que ces derniers enjolivent les chiffres, comme ils l'ont si souvent fait avec les véhicules thermiques, dont les consommations réelles se révèlent souvent supérieures d'un tiers à celles annoncées... Les données se rapportant aux véhicules hybrides doivent aussi être considérées avec prudence: derrière les déclarations des constructeurs, il y a parfois une hypothèse jamais vérifiée, quant à la fréquence à laquelle l'utilisateur recharge vraiment ses batteries.

On peut cependant affirmer que, à l'usage, les véhicules électriques ont un impact

ET EN FRANCE ?

L'Ademe (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) souligne dans son document *Le véhicule électrique dans la transition écologique en France* (2017) que les « impacts de ce véhicule sur le climat et l'environnement varient en fonction du mix électrique qui est utilisé pour la charge des véhicules. » Au pire, ce mix électrique sera celui du réseau général, dont l'empreinte carbone en 2017 était de 119 grammes de CO₂ par kilowattheure (au lieu de 527 g/kWh en Allemagne).

Cette empreinte carbone implique qu'en appliquant le même principe de calcul que Christopher Schrader dans son article, à chaque recharge de sa batterie, une Ioniq de Hyundai est responsable de l'émission de quelque 13 grammes par kilomètre (60 outre-Rhin), une Opel Ampera de 18 grammes (76 outre-Rhin), une Citroën Berlingo de 93 grammes (60 outre-Rhin), une Ford Focus de 18 grammes (81 outre-Rhin)

et un modèle S de Tesla de seulement 28 grammes (125 outre-Rhin). Ces bons chiffres résultent des 72,3 % d'électricité d'origine nucléaire, produite avec relativement peu d'émissions de CO₂ (de l'ordre de 20 à 30 g/kWh). Mais il ne faut pas oublier que la production d'électricité d'origine nucléaire a ses propres inconvénients, notamment celui d'engendrer des déchets nucléaires dangereux et difficiles à gérer.

Par ailleurs, en 2017, 24 910 voitures électriques ont représenté de l'ordre de 1 % des 2 649 628 véhicules neufs immatriculés en France ; à ce rythme-là, il faudra environ 450 ans avant que le parc automobile français (quelque 30 millions de véhicules) soit électrique à 99 %...

FRANÇOIS SAVATIER

climatique inférieur à celui des voitures classiques. En effet, si les petits véhicules thermiques les plus économiques émettent un peu moins de 100 grammes de CO₂ par kilomètre, tous les autres se situent dans une fourchette à trois chiffres, parfois même au-dessus. Les véhicules électriques n'épargnent cependant pas à l'environnement autant d'émissions, mais seulement 20 ou 30, au maximum 40 grammes de CO₂ par rapport aux voitures à moteurs thermiques économiques. Les économies à trois chiffres ne sont possibles que dans la classe de



La Gigafactory du constructeur Tesla, aux États-Unis, est une immense usine de batteries lithium-ion conçue pour réduire nettement leur coût. Cette image est une représentation par ordinateur de l'immense installation, inachevée à ce jour.

© tesla.com

lux, dont fait partie la voiture de Tesla. Bien que la Tesla S ait, en termes d'émissions de CO₂, l'une des plus piètres performances parmi les véhicules électriques, elle ne se compare vraiment qu'aux tout-terrain utilitaires (les SUV) et aux voitures de sport dotées de moteurs thermiques. D'autres véhicules électriques de cette taille seront sans doute proposés bientôt. C'est pourquoi l'équipe d'experts de Klaus Beckmann souligne aussi qu'«il faut absolument limiter la taille et le poids des voitures particulières, même non électriques, et ce, au plus tard lors de leur électrification.»

Quoi qu'il en soit, avec le mix énergétique allemand actuel, l'étude des chiffres montre qu'étant donné les économies de CO₂ au kilomètre des véhicules électriques par rapport aux véhicules thermiques de même catégorie, ce n'est qu'après environ 150 000 kilomètres qu'un véhicule électrique aura compensé l'empreinte écologique de 5 tonnes de CO₂ émises lors de la fabrication de ses batteries. En Allemagne, le conducteur moyen ne peut y parvenir qu'au bout de 10 à 12 ans.

La situation serait différente si l'on pouvait compter sur une véritable électricité verte. Il ne suffit pas pour cela de commander l'une des offres «vertes» des fournisseurs d'électricité, car le courant correspondant proviendra des mêmes centrales classiques, même s'il a été déclaré vert, par exemple à l'aide de certificats norvégiens (l'électricité norvégienne est verte car elle provient de barrages). D'une façon ou d'une autre, le mix énergétique reste le même: si l'on attribuait de l'électricité verte aux voitures, il faudrait

faire fonctionner le reste à l'aide d'électricité non verte: un jeu à somme nulle.

Pour améliorer la situation, il faudrait que l'électricité destinée au transport provienne d'éoliennes ou de parcs solaires construits à cet effet. C'est du moins ce que propose en Allemagne la Plate-forme nationale pour l'électromobilité (*nationale Plattform für Electromobilität*), un organe consultatif du gouvernement. La contrainte est très forte! Les sources d'énergie renouvelables ne pourraient être exploitées que pour le transport électrique et ne pourraient bénéficier d'aucune subvention ni d'aucun tarif préférentiel de rachat. Cette logique exclut aussi toute la production photovoltaïque des toits, qui existait déjà en Allemagne bien avant l'arrivée des voitures électriques.

L'ÉLECTRICITÉ D'ORIGINE ÉOLIENNE OU PHOTOVOLTAÏQUE N'EST PAS PROPRE

Comprenant cependant l'intérêt de cette logique, certains constructeurs automobiles ont pris l'initiative d'alimenter le réseau avec de l'électricité propre pour la recharge des batteries. Dans l'un de ses rapports de 2017, l'Öko-Institut loue par exemple le fait que Daimler ait financé une éolienne et «informe activement ses clients sur l'électricité verte.» En menant cette démarche, l'institut délivre une sorte de certificat de bonne pratique aux acheteurs de la première génération des Smart électriques. «Il est peu probable que Daimler continue dans cette voie malheureusement», regrette Peter Kasten (Öko-Institut). C'est seulement lorsque le courant servant à propulser les voitures électriques ne proviendra que de telles installations dédiées que l'on pourra éviter les 527 grammes de CO₂ par kilowattheure du mix énergétique allemand en le remplaçant par le facteur d'émission réel de l'électricité produite avec la source d'électricité utilisée.

Pour autant, même avec de l'électricité entièrement verte, les émissions ne seraient pas entièrement nulles: selon l'Agence fédérale de l'environnement, 11 grammes de CO₂ par kilowattheure sont émis lors de la production d'énergie éolienne terrestre et 68 grammes lors de la production d'énergie photovoltaïque. Ces chiffres sont calculés d'après les émissions associées à la production, au transport et à la maintenance des cellules solaires et des supports, pales, mâts et autres engrenages des éoliennes. Les émissions dues à ces opérations sont ensuite réparties en fonction de la quantité d'énergie produite.

Si la batterie d'une Tesla S était effectivement chargée exclusivement avec de l'électricité provenant d'une éolienne construite spécialement à cette fin, il en résulterait l'émission de 3 grammes de CO₂ par kilomètre >



> sur la route au lieu de 125 grammes. Et ceux qui, à l'avenir, équiperont le toit de leur maison de cellules solaires capables de fournir toute l'énergie d'une voiture n'émettraient plus que 10 grammes, au lieu des 76 grammes de CO₂ par kilomètre émis en rechargeant la batterie avec de l'électricité allemande de 2016.

Beaucoup d'écobilans sérieux présentent les voitures électriques rechargées avec de l'électricité allemande actuelle comme à peu près aussi polluantes que les voitures à moteurs thermiques économiques. Cependant, la Plate-forme nationale pour l'électromobilité et le ministère de l'Environnement accordent un avantage de 12 à 16% à la propulsion par batterie, et, dans une étude récente, Eckart Helmers considère les voitures électriques comme moins polluantes que les voitures thermiques. Selon lui, c'est déjà le cas si l'on tient compte du mix électrique allemand de 2013; or, depuis, les émissions par kilowattheure ont diminué de quelque 10%.

LES ÉTUDES SE SUIVENT ET NE SE RESSEMBLENT PAS

Dans un rapport publié en 2017, Dieter Teufel et son équipe de l'UPI donnaient un léger avantage écologique aux véhicules électriques. Récemment, seuls ses collègues de l'Ifeu attribuaient encore une meilleure note au diesel économique. Dans une étude de 2016, l'Agence fédérale de l'environnement montre par des calculs – que ses chercheurs ont mis à jour en août 2017 – que les véhicules électriques ont de l'avance si l'on suppose que la transition énergétique va se poursuivre. Les avantages écologiques de l'électromobilité ne seraient toutefois acquis que vers la neuvième année d'utilisation...

Ce qui sépare ces études tient à des détails: si l'on compare des véhicules de taille similaire, le diesel, qui émet plus de particules et d'oxydes d'azote, mais moins de CO₂ que l'essence, se rapproche des voitures électriques, du moins quand la batterie de celles-ci est assez importante. En revanche, lorsque c'est le nombre moyen de voitures immatriculées que l'on examine, alors l'influence des nombreuses voitures thermiques massives et surpuissantes se fait sentir: plus petites en moyenne, les voitures Tesla ont alors un avantage intrinsèque. Les présupposés des études et les années qui y sont prises en référence influent aussi beaucoup sur les conclusions. «Lorsque des travaux sont publiés, leurs hypothèses de départ sont souvent déjà dépassées, tant la situation évolue vite sur le marché des voitures électriques», pointe Peter Kasten.

Comme on l'a déjà mentionné, le bilan écologique est très différent si l'on ne recharge son véhicule électrique qu'avec de l'électricité verte produite par une installation spéciale.



Dans ce cas, les voitures électriques deviennent insurpassables, quels que soient les bilans existants. Selon une étude de l'Ifeu, une fois que l'on a tenu compte de tous les facteurs, rouler au diesel produit environ 190 grammes de CO₂ par kilomètre parcouru pendant le cycle de vie d'un véhicule, tandis qu'une voiture électrique alimentée à l'électricité éolienne n'en produit que 60 grammes.

Soit dit en passant, en Allemagne, ces chiffres portent en eux-mêmes une tentation: le pays pourrait améliorer son bilan carbone en réduisant les émissions sur la route à l'aide de ses éoliennes, et en passant sous silence les émissions importantes entraînées par la fabrication à distance – des batteries qu'il utilise. Où qu'ils soient produits, les gaz à effet de serre ont cependant le même effet sur le climat. Une telle approche n'aurait rien de sérieux.

DE NOMBREUX AUTRES FACTEURS À CONSIDÉRER

Nombre de facteurs modifient par ailleurs le bilan écologique des véhicules électriques. Des inconvénients se font jour, par exemple, si l'on souhaite que les voitures électriques aient une autonomie de 400 kilomètres au lieu des 150 à 200 kilomètres habituels. Pour ce faire, une batterie deux fois plus grosse est nécessaire, et il faudra parcourir un trajet irréaliste de 300 000 kilomètres pour compenser l'empreinte écologique initiale. En outre, un tel véhicule devra transporter une batterie deux fois plus lourde et consommera donc plus d'énergie.

En Allemagne, le climat, froid et brumeux pendant l'hiver, est un autre facteur à

La Chine est un important fabricant de batteries. Or une grande partie de son électricité, qui sert notamment à cette fabrication, est produite par des centrales thermiques au charbon. Cela détériore gravement le bilan écologique des véhicules électriques.

considérer. Le chauffage et le ventilateur du véhicule puiseront dans la batterie, alors que dans une voiture à moteur thermique, la chaleur utilisée pour chauffer l'habitacle est un sous-produit du fonctionnement du moteur thermique. C'est pour cette raison que des chercheurs de l'université technique de Munich ont envisagé sérieusement de chauffer l'habitacle en brûlant du bioéthanol.

Lorsque des millions de véhicules électriques seront en circulation, des problèmes surgiront aussi si ces voitures sont rechargées à un moment défavorable. L'augmentation de la demande en énergie à des moments où il y a peu d'électricité renouvelable disponible aurait un impact négatif sur le mix électrique. Les voitures devront donc être dotées d'un système intelligent de contrôle de la charge, qui communique avec le réseau électrique afin de déterminer quand faire le plein d'énergie.

Dans des pays où le mix énergétique contient une proportion élevée d'énergie renouvelable, comme le Danemark, l'Autriche ou la Suisse, les bilans écologiques des véhicules électriques sont bien meilleurs. En Autriche, par exemple, environ 150 grammes de dioxyde de carbone sont libérés par kilowattheure, soit seulement 28% de la valeur allemande d'après 2016, ce qui réduit les émissions calculées d'une BMW i3 de 66 à 19 grammes par kilomètre parcouru.

démarrages et de freinages fréquents, elles récupèrent une grande part de l'énergie cinétique, contrairement aux moteurs thermiques, particulièrement inefficaces sur ce point. Leur inconvénient est cependant de devoir propulser un poids plus important.

En Allemagne, tout indique que les voitures électriques deviendront de plus en plus propres, non pas en raison des progrès techniques à venir, mais plutôt grâce à l'amélioration prévisible du mix énergétique. Même un véhicule électrique acheté en 2017 contribuera probablement à la baisse des émissions calculées en 2025. Selon le Ministère fédéral de l'environnement, le bilan écologique au kilomètre d'une voiture électrique pourrait s'améliorer d'environ un tiers au cours de 12 ans de durée de vie. En 2029, le facteur d'émission de l'électricité devrait tomber à environ 350 grammes d'émissions de CO₂ par kilowattheure. Un ordre de grandeur considéré comme réaliste selon plusieurs scénarios. Ainsi, l'Öko-Institut et l'Institut Fraunhofer pour la recherche sur les systèmes et l'innovation (ISI) ont compilé huit de ces prévisions et trouvé des facteurs d'émission variant de 233 à 376 grammes de CO₂ par kilowattheure produit.

LA GIGAFACTORY DE TESLA RÉDUIRA-T-ELLE L'IMPACT DE LA FABRICATION DES BATTERIES ?

La production de batteries augmentera aussi beaucoup dans les années à venir. Dès que le fondateur de Tesla, Elon Musk, aura achevé au Nevada sa Gigafactory pour batteries, conçue pour une production moins émettrice de gaz à effet de serre, les experts s'attendent à une réduction de moitié des émissions associées à la fabrication des batteries. Bien entendu, produire dans des pays comme la Norvège ou l'Islande, où beaucoup d'électricité propre est disponible grâce à l'hydroélectricité et à la géothermie serait encore mieux. En revanche, des usines allemandes de batteries n'auraient qu'un léger avantage sur des usines chinoises.

Tout cela ne joue aucun rôle dans le bilan écologique d'une voiture électrique immatriculée aujourd'hui, puisque sa batterie est déjà produite. Pour autant, de nombreux constructeurs ne vendent pas les batteries, mais les louent, afin d'apaiser les inquiétudes des acheteurs de voitures au sujet de cette nouvelle technologie. Dès lors, si ce composant essentiel d'un véhicule électrique devait être remplacé, il faudra ajouter une nouvelle empreinte écologique à l'analyse du cycle de vie, mais sur la base de conditions de production améliorées.

La batterie remplacée ne serait donc pas qu'une perte sur le plan écologique, mais pourrait amener un gain. Par ailleurs, de nombreux >

Une batterie chauffe quand on en tire du courant au-delà de 85 % de sa charge

Il est aussi important de tenir compte de la façon dont les batteries sont employées : les utiliser presque vides ou les charger à plein diminue leur durée de vie. Autre aspect : une batterie chauffe quand on en tire du courant au-delà de 85% de sa capacité de charge. Le premier retour d'expérience acquis avec les modèles Tesla suggère cependant qu'il est possible de faire durer les batteries plus longtemps qu'on ne le craignait.

Les voitures électriques ont aussi beaucoup d'avantages en usage urbain. En cas de



Dans un projet pilote visant à donner une seconde vie aux batteries de voitures électriques, le constructeur automobile Daimler a constitué, à partir de celles des Smart électriques, un stockage d'électricité de 13 kilowattheures, qu'il a relié au réseau électrique.

> experts pensent aujourd'hui qu'il est aussi possible de donner une seconde vie aux batteries de voiture. Si une batterie a des performances dégradées, cela ne tient peut-être qu'à quelques dizaines d'éléments parmi les milliers dont elle est composée. Des réparateurs pourraient les remplacer puis vendre des batteries «révisées». Ou bien on pourrait réutiliser les batteries usagées pour stocker l'électricité produite sur les panneaux photovoltaïques des toits pendant la journée, afin de s'en servir le soir.

IL N'Y A PAS QUE LES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE

Jusqu'à présent, nous n'avons parlé que des émissions de gaz à effet de serre. La prise en compte d'autres polluants ou dégradations environnementales conduirait à des chiffres très différents. À cet égard, le cas des pneumatiques est typique: l'abrasion des pneus est en effet une source importante de particules fines, et c'est parfois un problème sur les carrefours fréquentés. Or le conducteur d'un véhicule électrique peut, dès le démarrage, exploiter tout le couple moteur. Il en résulte d'importantes forces au niveau du contact pneu-chaussée, et donc le dégagement de davantage de poussières fines. Les quinze experts de Klaus Beckmann proposent pour cette raison de régler les moteurs électriques de façon à éviter les accélérations trop violentes.

Autre point à considérer: les véhicules électriques ne fonctionnent pas tous avec une batterie. Dans les voitures à pile à combustible, de l'hydrogène est transformé en électricité pour entraîner un moteur électrique. À l'avenir, cet hydrogène, aujourd'hui obtenu surtout à partir de gaz naturel, pourrait être produit à partir de l'énergie éolienne excédentaire. Or le ravitaillement d'une voiture à pile à combustible est

rapide, ce qui est un gros avantage. Toutefois, pour que des voitures ainsi équipées deviennent utilisables au quotidien, il faudrait créer tout un réseau de stations-service à l'hydrogène, un gaz hautement explosif, et les investissements nécessaires seraient énormes.

Une autre possibilité serait de transformer l'hydrogène en méthane par hydrogénation du CO₂, puis de stocker ce méthane de synthèse dans le réseau de gaz. Les voitures à gaz naturel pourraient fonctionner à partir de ce gaz produit pour ainsi dire à l'électricité. Une telle expérience est en cours chez Audi. Dans des projets similaires, on tente de produire des combustibles artificiels liquides à partir de l'électricité. En novembre 2017, le président du Club de Rome, Ernst Ulrich von Weizsäcker, évoquant ces deux possibilités, a mis en garde contre l'adoption prématurée des moteurs électriques fonctionnant sur batterie.

Ainsi, les voitures électriques ne sont pas automatiquement la panacée climatique que présentent les industriels et les politiques. Elles pourront cependant contribuer de façon significative à rendre le transport routier plus respectueux de l'environnement. Certains pensent même que l'électromobilité représente la seule stratégie réaliste. Pour que cela soit le cas, il faut dès aujourd'hui tracer la bonne voie: la production et l'utilisation des véhicules alimentés par batterie doivent devenir plus efficaces; l'électricité nécessaire doit provenir de davantage de sources d'énergie renouvelables; et les voitures de luxe équipées de moteurs et de batteries surpuissantes doivent être réglementées. Les automobilistes habitués à pouvoir à tout moment se déplacer confortablement en voiture devront aussi faire évoluer leurs attentes et limiter le kilométrage parcouru. ■

BIBLIOGRAPHIE

D. Hall et Nic Lutsey (dir.), **Effects of battery manufacturing on electric vehicle life-cycle greenhouse gas emissions**, International Council on Clean transportation (ICCT), février 2018.

E. Helmers et M. Weiss, **Advances and critical aspects in the life-cycle assessment of battery electric cars**, *Energy and Emission Control Technologies*, vol. 5, pp. 1-18, 2017.

M. Chéron et al., **Quelle contribution du véhicule électrique à la transition écologique en France ?**, Fondation pour la nature et l'homme, décembre 2017 (rapport téléchargeable sur <https://bit.ly/2EeQUN4>).

J. F. Peters et al., **The environmental impact of Li-ion batteries and the role of key parameters – A review**, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 67, pp. 491-506, 2017.

POUR LA  Édition française de Scientific American

SCIENCE

numéro collector

NOVEMBRE 2018
N° 1



Les paradoxes du TEMPS

Le temps
est-il
une illusion ?

Le temps
a-t-il
une fin ?

Le temps
est-il
un luxe ?

Le temps
est-il le même
pour tous ?

BEL : 00 € - CAN : 00 CAD - DOM/5 : 00 € - Réunion/A : 00 € - ESP : 00 € - GR : 00 € - ITA : 00 € - LUX : 00 € - MAR : 64 MAD - TOM : 0000 XPF - PORT. CONT. : 00 € - CH : 00 CHF - TUN/5 : 00 TND

Chez votre marchand de journaux
le 7 novembre

L'eau, le géologue et la Grande Guerre

Comment abreuver un million de chevaux à raison de 15 à 60 litres par jour et par animal ? Comment protéger de la boue les myriades d'hommes terrés dans les tranchées ? Tels étaient les défis des géologues, acteurs méconnus de la guerre de 14-18.

Août 1914. La progression des troupes allemandes en Belgique est fulgurante. L'armée a pénétré les Flandres du nord, des plaines basses lardées de canaux et de cours d'eau qu'une simple bande de dunes sépare de la mer du Nord. L'armée belge résiste difficilement. Le 21 octobre, en ultime recours, alors que les Allemands s'approchent de Nieuport, les Belges décident d'inonder artificiellement la plaine. Ils ouvrent les portes de l'écluse de la vieille Yser, par lesquelles l'eau de mer se déverse sur 4 kilomètres carrés dans la dépression du fleuve. Puis, dans la nuit du 29 au 30 octobre, des soldats belges rejoignent à bicyclette des écluses situées sur la ligne allemande et les ouvrent. Bientôt, non seulement 50 kilomètres carrés de terrains inondés barrent la route aux Allemands, mais les tranchées qu'ils avaient creusées alentour sont noyées et inexploitable.

Le revers de Nieuport a marqué les ingénieurs militaires allemands. Très vite, ils ont compris l'importance des connaissances hydrogéologiques dans la conduite de cette guerre. De fait, la géologie a contraint chaque instant de la Première Guerre mondiale. Comme par le passé, dès le début du conflit, la topographie a

guidé la guerre de mouvement. Il fallait prendre les points hauts pour s'y retrancher et ancrer son artillerie en surplombant de préférence les rivières, véritables barrières naturelles. Mais le rôle clé de la géologie, et notamment de l'hydrogéologie, est vraiment apparu lorsque, à l'automne 1914, le front s'est stabilisé du fait de la puissance inédite de l'artillerie. Le conflit est alors devenu une guerre de position, qui ne faisait pas partie de la stratégie. Il imposa des contraintes nouvelles comme l'approvisionnement en eau et en matériaux, la construction d'abris et de tranchées, l'exploration du sous-sol. C'est ainsi que, pour la première fois, des géologues ont été employés pour leur métier durant un conflit. En examinant cette guerre avec des yeux de géologue, on mesure à quel point le rôle de cette discipline y a été essentiel, en particulier pour la gestion de l'eau.

DE L'EAU POTABLE POUR LES SOLDATS

Avec la stabilisation du front fin 1914, les puits existants ne suffisaient plus à approvisionner les soldats et leurs chevaux en eau potable, et les eaux de surface sont polluées. Or, en moyenne, un cheval consomme entre 15 et 60 litres d'eau par jour, et les Français ont mobilisé un million de chevaux. Pour son corps expéditionnaire >



© Coll. La contemporaine, cote VAL 416.108