

Nouveaux véhicules électriques et thermiques : quel impact sur l'environnement ?

Jean-Claude Bernier est professeur émérite de l'Université de Strasbourg, fondateur et ancien directeur de l'École européenne d'ingénieurs de chimie, polymères et matériaux (ECPM¹) à Strasbourg, ancien directeur scientifique du département de chimie du Centre national de la recherche scientifique (CNRS). Il a été membre du conseil scientifique de Pechiney², d'Alcan³ et de Rio Tinto⁴.

Ce chapitre aborde l'évolution des véhicules automobiles dits propres à la lumière

1. <http://ecpm.unistra.fr>

2. Pechiney est un groupe industriel français spécialisé dans l'aluminium, qui a été racheté en 2003 par Alcan.

3. Alcan est une entreprise canadienne, ex-numéro 3 mondial de la fabrication et de la commercialisation de l'aluminium, racheté en 2007 par Rio Tinto.

4. Rio Tinto est un groupe minier anglo-australien, spécialisé dans l'aluminium, le fer, le charbon et le cuivre.

de la transition énergétique en regardant leurs caractéristiques et en se posant la question de savoir s'ils sont plus ou moins écologiques. Après quelques rappels sur la part du transport dans les dépenses énergétiques et les émissions de gaz carbonique, nous nous pencherons sur les véhicules thermiques, les véhicules électriques puis les véhicules à hydrogène, et enfin, nous terminerons par des considérations économiques et d'évolutions futures.

1 La part du transport dans les dépenses énergétiques et les émissions de gaz carbonique en France

Replaçons-nous tout d'abord dans la perspective, en France, de la transition écologique et ses objectifs liés au changement climatique (Figure 1). On retrouve évidemment la réduction des

gaz à effet de serre, l'évolution de la production électrique en diminuant la part du nucléaire et le Graal de la neutralité carbone en 2050, que de nombreux scientifiques, y compris l'Académie des sciences, trouvent un peu prématuré.

En France, les consommations énergétiques des ressources naturelles et donc les émissions

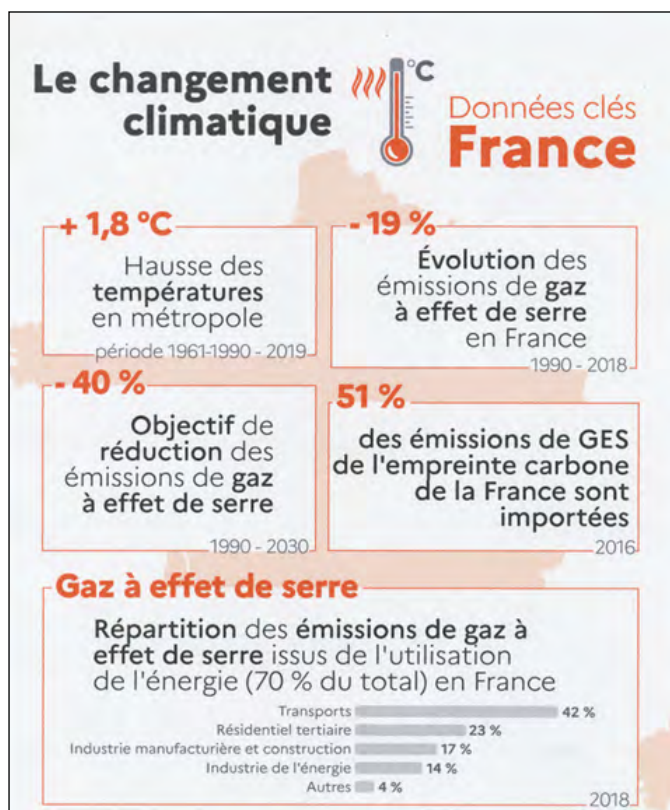


Figure 1

Les objectifs de la transition énergétique « accélérée » en France. « GES importés » correspond à la qualité des objets importés consommés en France. On en évalue la « trace carbone » qui traduit les émissions de gaz à effet de serre dues à la fabrication de ces objets et à leur transport vers la France. À titre d'illustration, rappelons que les panneaux photovoltaïques fabriqués en Chine ont émis 14 fois plus de carbone (ou équivalent) que les européens.

Source : ministère de la Transition écologique
– chiffres clés du climat – édition 2021.

du gaz carbonique sont dues à plusieurs secteurs, dont celui des transports pour environ 30 %, et avant le secteur résidentiel et tertiaire (Figure 2).

Sur les répartitions des émissions de CO₂, on constate que ce sont d'abord les véhicules particuliers pour 54 %, avant les poids lourds et les véhicules utilitaires (Figure 3).

Quand on regarde l'évolution des émissions de CO₂ depuis une trentaine d'années (Figure 4), avec l'augmentation du trafic routier, qui a été de l'ordre de 10 %, nous sommes passés d'environ 111 mégatonnes d'émissions de gaz carbonique à 120, avec une stagnation depuis 2015, que l'on peut attribuer aux réglementations européennes,

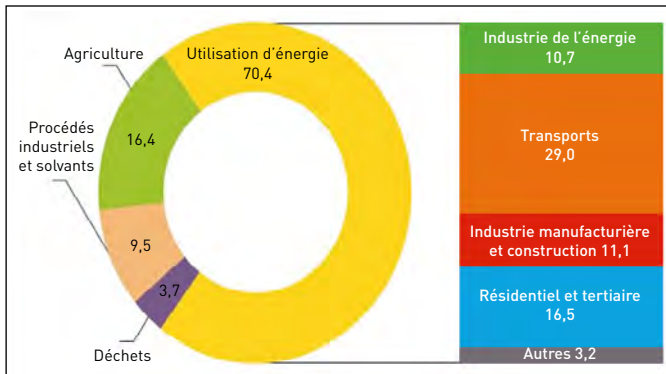


Figure 2

Répartition des émissions de gaz à effet de serre en France en 2017 (en %).
 Source : ministère de la Transition écologique
 - chiffres clé du climat - édition 2021.

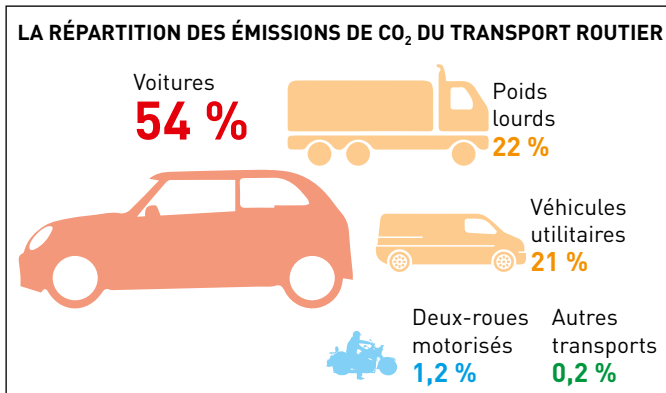


Figure 3

Répartition des émissions de CO₂ du transport routier en France.

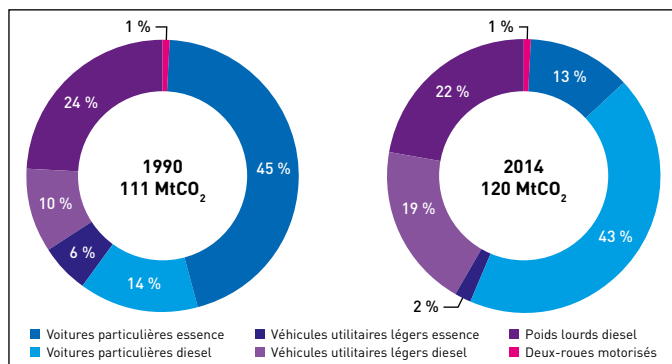


Figure 4

Évolution des émissions de CO₂ dues aux transports.

Source : CITEPA.

qui ont limité les consommations (Euro5 et Euro6⁵), et évidemment les émissions de gaz carbonique.

2 Le véhicule thermique

2.1. L'habitude du consommateur et son impact sur l'environnement

Une étude récente montre que depuis dix ans, il y a eu une réelle économie de consommation sur la plupart des modèles de véhicules thermiques. Si nous prenons l'exemple de quelques modèles de citadines, nous avons d'une part les métallurgistes et les motoristes qui ont travaillé sur la diminution des cylindrées, c'est ce qu'on appelle le « *down-sizing* »⁶,

5. Euro5 et Euro6 : règlements de l'Union européenne qui fixent les limites maximales de rejets polluants pour les véhicules neufs.

6. *Down-sizing* (réduction de taille) : procédé de réduction du cylindre d'un moteur qui permet d'améliorer le ratio puissance/litre afin de diminuer la consommation de carburant et les émissions de gaz toxiques.

également l'adjonction des turbos⁷ avec des alliages réfractaires⁸ à géométrie variable, l'injection directe à haute pression⁹. Les chimistes ont réduit les frottements avec des huiles nouvelles et également des pneumatiques à faible résistance aux roulements. Si nous regardons l'exemple de deux modèles de citadines des fabricants français Peugeot et Renault (*Tableau 1*), nous avons vu en dix ans une diminution assez importante de la consommation, y compris pour les diesels et pour ces nouveaux véhicules que l'on appelle les SUV¹⁰, ou semi tout-terrain.

La *Figure 5* présente les émissions en grammes de gaz

7. Un turbocompresseur permet d'injecter plus d'air dans le moteur, de manière à augmenter la puissance du moteur ou à diminuer la quantité de carburant consommé.

8. Un alliage réfractaire est mélange de métaux qui est très résistant à la chaleur et l'usure.

9. Injection directe à haute pression : le carburant est directement injecté dans la chambre de combustion du moteur, ce qui permet de consommer moins en injectant le moins de carburant possible et en modulant l'injection selon des paramètres extérieurs (pression, température, régime moteur...).

10. SUV : « *Sport Utility Vehicle* », véhicule utilitaire sportif.

Tableau 1

La consommation des véhicules thermiques est en baisse depuis dix ans.

Citadines	Peugeot	27 %
	Renault	40 %
Diesels		12 %
SUV		7 %

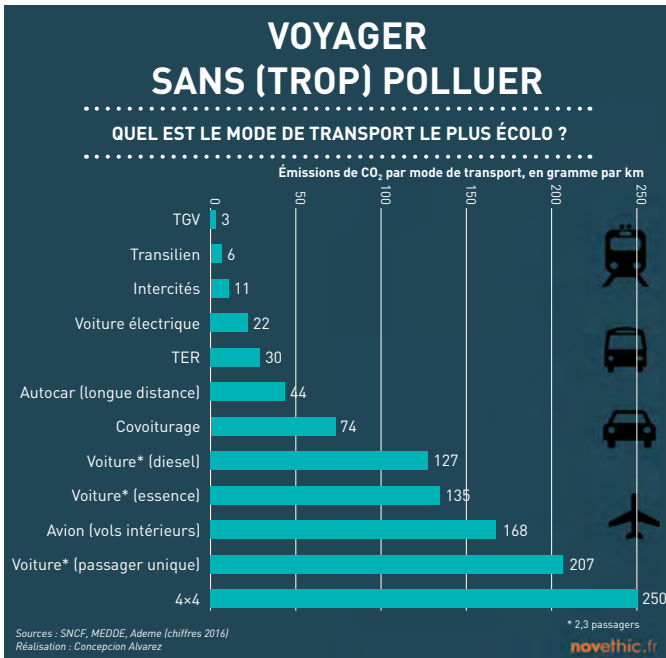


Figure 5

Le train est le moyen de transport le moins polluant.

Source : Novelthic.fr ; SNCF Medoe.

carbonique par kilomètre et par passager pour les différents moyens de déplacement. Il montre que les moyens de transport les moins producteurs de gaz carbonique sont le TGV et les trains en général, grâce au mix électrique¹¹, français qui utilise de l'électricité d'origine nucléaire. Les plus polluants sont, avec l'avion, l'automobile, surtout avec un seul conducteur.

2.2. Les émissions en ville

Abordons maintenant des émissions du trafic routier urbain.

11. Mix électrique : répartition des différentes sources d'énergies primaires utilisées pour les besoins énergétiques. Ces énergies primaires (pétrole, nucléaire, solaire...) sont ensuite utilisées pour produire de l'électricité, du carburant, etc.

À côté du gaz carbonique, qui n'est pas à classer du côté des polluants, on trouve les oxydes d'azote NO_x, le monoxyde de carbone et également les microparticules PM₁₀ et PM_{2,5} (dont les tailles sont au maximum de 10 ou 2,5 microns¹²), qui sont les plus nocives pour la santé (Figure 6).

Pourtant, en vingt ans, grâce à la chimie et contrairement aux idées reçues, de grands progrès ont été réalisés sur la diminution de la pollution automobile. La Figure 7 donne les résultats avec une base 100¹³ en 2000. Pour l'oxyde

12. 1 micron (µm) = 10⁻⁶ mètre.

13. Les chiffres sont en indice base 100, ce qui permet de comparer leur évolution en pourcentage, avec comme valeur initiale 100 % en 2000. Cette méthode permet de comparer les chiffres même s'ils ne s'expriment pas dans la même unité.

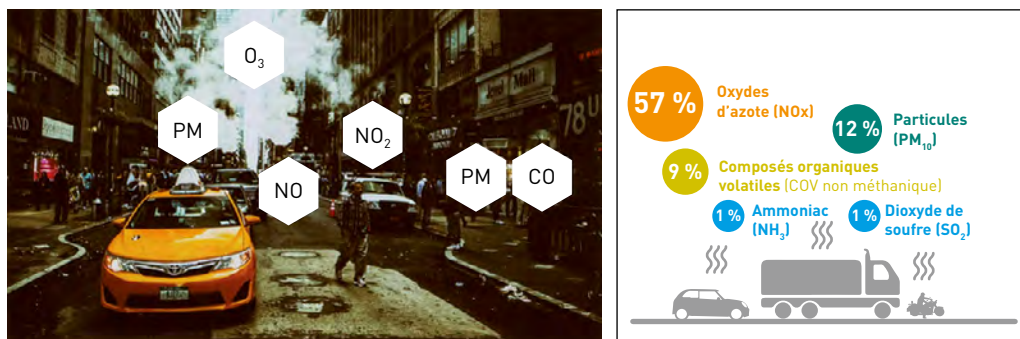


Figure 6

Les émissions du trafic routier en ville. Principaux polluants de l'air émis par les transports routiers en % des émissions totales en France.

de soufre SO_2 , grâce à l'hydrodésulfuration des carburants, de 100 en 2000, on passe à environ 20 en 2020, soit une diminution de plus de 80 % (Figure 7). Sur les oxydes d'azote en vert, nous avons la même évolution grâce aux nouveaux pots catalytiques, puisque nous nous sommes passés de 100 à 60, soit 40 % de diminution. Il en est de

même pour les microparticules PM_{10} et $\text{PM}_{2,5}$, grâce aux nouveaux filtres à particules. Il n'y a que pour l'ozone, qui est une réaction complexe de l'atmosphère avec les composés organiques volatils, pour lesquels la concentration est restée à peu près constante.

Cela nous amène à rappeler que la chimie atmosphérique

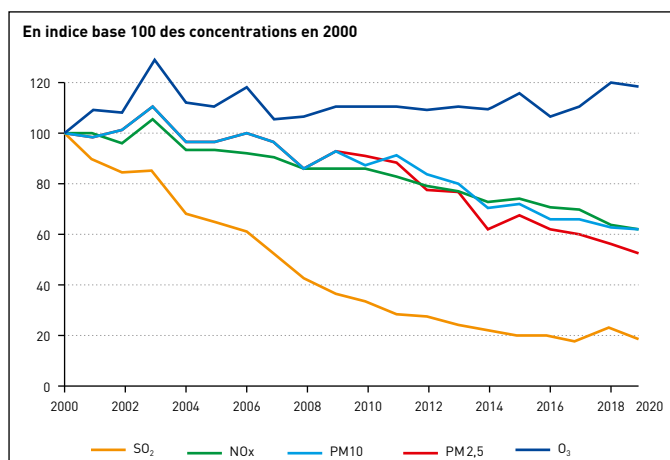


Figure 7

Progrès réalisés entre 2000 et 2020 dans la pollution automobile.

reste extrêmement complexe. Une expérience grandeur nature a été réalisée à Paris lors du confinement de mars à mai 2020. Airparif¹⁴, qui dispose d'un nombre remarquable de capteurs, a rendu publiques l'été dernier ses analyses et ses mesures des divers polluants, dans le cadre d'une diminution du trafic qui a été pratiquement supérieure à 80 %. On constate qu'il y a une baisse effective de l'oxyde de carbone (71 %), des oxydes d'azote (37 %), du dioxyde de soufre (12 %), ces diminutions ne sont pas dans la proportion de 80 %, mais l'évolution est tout de même assez bonne (Tableau 2). Par contre, les microparticules qui sont, rappelons-le, les plus nocives en ville, sont en augmentation. Elles semblent donc provenir d'une autre source que celle des émissions automobiles, preuve s'il en est que les phénomènes chimiques et les solutions préconisées ne sont pas aussi simples que l'on croit.

14. Airparif : association chargée de mesurer et cartographier la pollution en Île-de-France. <https://www.airparif.asso.fr>

2.3. La marche forcée vers le véhicule électrique

Quoi qu'il en soit, l'Europe a pris en main le problème en menaçant de frapper les constructeurs au portefeuille dès 2021 en fixant pour chacun d'entre eux une valeur maximum de grammes de CO₂ émis par km comme moyenne pour toute la flotte qu'ils produisent par an (Figure 8). Cette limite est de l'ordre de 95 à 100 grammes par kilomètre selon les constructeurs, avec de fortes amendes par gramme de dépassement multiplié par le nombre total de production d'automobiles produites dans l'année, ce qui amène à des amendes pouvant être de l'ordre du milliard, voire de plusieurs milliards d'euros.

On peut également rappeler qu'un certain nombre de pays ont publié leur intention d'interdire la commercialisation des véhicules thermiques dès 2040 et même au Royaume-Uni dès 2030. La panique s'est donc emparée des grands constructeurs et plusieurs dizaines de modèles de véhicules électriques ou hybrides se sont fait jour notamment en Asie, mais c'est plus difficile en Europe. Le véhicule

Tableau 2

Pollution à Paris avec et sans confinement.

	Stations	Sans	Avec	Différence
Trafic		93	14	83 %
PM10	23	17,6	24,4	+39 %
PM 2,5	13	7,9	14,7	+87 %
NOx	40	57	36	-37 %
O ₃	22	56,6	67,5	+19 %
CO	5	0,124	0,006	-71%
SO ₂	6	0,66	0,58	-12 %

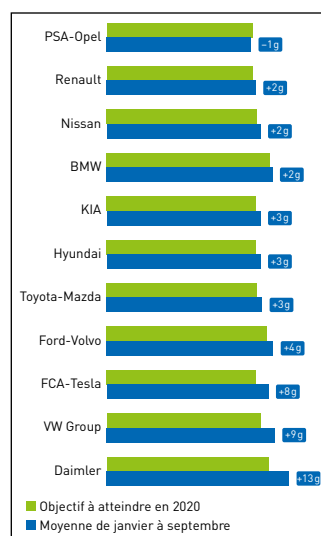


Figure 8

Directives européennes : valeur maximum en gramme de CO₂ émis par km, par an et par type de véhicule.

électrique est évidemment la solution pour éviter la pollution dans les grandes villes et on connaît bien les photographies de Pékin sous un épais brouillard de pollution, ainsi que d'autres grandes villes chinoises (Figure 9).



Figure 9

La pollution de certaines villes en Chine est inquiétante.

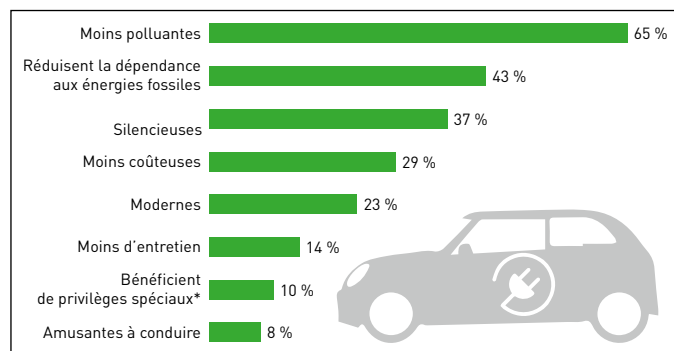


Figure 10

Pourcentage de répondants considérant que les voitures électriques ont ces avantages. Pour les Français, l'avantage premier du véhicule électrique est son faible impact sur l'environnement.

*Par exemple : voies réservées, péages routiers, places de parking.

Source : Dalia Research.

3 Le véhicule électrique

En 2020, on comptait dans le monde 7 millions de véhicules électriques, dont 47 % en Chine (soit 3,3 millions de véhicules électriques), qui dispose aussi de 300 000 bus électriques. Un sondage mené en France sur les qualités du véhicule électrique montrait que c'était la faible pollution qui arrivait en tête, avant l'économie des ressources fossiles (Figure 10).

3.1. Il existe plusieurs types de véhicules électriques

D'abord, on peut citer les véhicules hybrides, qui comportent, un moteur thermique classique et une batterie qui se recharge en roulant, alimentant un moteur électrique. Ce sont donc des véhicules thermiques pouvant rouler de 30 à 50 km en électrique, mais alourdis par le poids d'un moteur supplémentaire et d'une batterie. Ce sont de bons alibis pour Bruxelles parce que les tests normaux WLTP¹⁵ privilégient la circulation en ville et à petite vitesse.

Il y a également les véhicules hybrides avec un moteur thermique et une batterie rechargeable sur une borne, dits « plug in ».

15. La norme WLTP (« Worldwid harmonised Light vehicle Test Procedure ») est obligatoire depuis le 1^{er} septembre 2018 pour les véhicules particuliers neufs ; cette norme d'homologation permet de mesurer la consommation de carburant et les émissions de CO₂ et de gaz polluants.

Enfin, le véhicule tout électrique qui, lui, ne comporte plus de moteur thermique, mais un ou plusieurs moteurs électriques avec une batterie qui peut se recharger sur une borne ou sur une « wall box »¹⁶ à domicile (Figure 11).



Figure 11

La batterie du véhicule tout électrique doit se recharger grâce à une borne.

3.2. La réserve d'énergie du véhicule électrique

C'est évidemment la réserve d'énergie pour la propulsion des véhicules qui est le nœud du problème. Comment lutter contre l'essence ou le gasoil, dont un litre représente une réserve d'environ 10 kW·h pour un litre ? Les électrochimistes, dont quelques brillants chercheurs français, ont réussi au cours du temps à augmenter les puissances spécifiques des batteries¹⁷ (Figure 12), d'abord les accumulateurs au plomb,

puis Nickel-Cadmium et, depuis les années 1970, les batteries avec à la cathode¹⁸ un oxyde mixte Lithium-Cobalt-Oxygène, par exemple en feuillet, et à l'anode¹⁹ du carbone, du graphite et avec un électrolyte²⁰ qui permet la diffusion des ions lithium (Figure 13).

Cette découverte a été majeure, car ces batteries devenues industrielles,

16. Wall box : la borne de recharge de la batterie, à accrocher au mur.

17. La puissance spécifique d'une batterie est la puissance maximale qu'elle peut fournir rapportée à sa masse.

18. Cathode : borne positive de la batterie.

19. Anode : borne négative de la batterie.

20. Électrolyte : solution ou solide permettant de conduire l'électricité grâce à des ions mobiles.

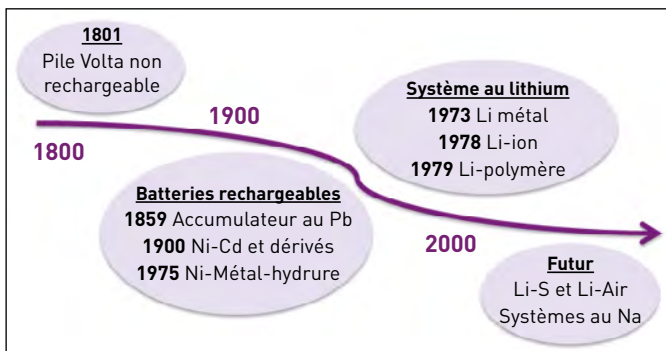


Figure 12

Les progrès dans le stockage de l'énergie permettent le développement de l'électrique.

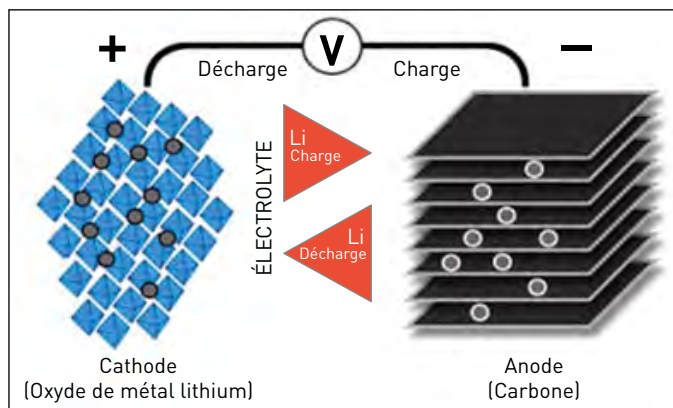


Figure 13

Les progrès faits par les électrochimistes sur le stockage de l'électricité permettent l'industrialisation de véhicules électriques.

produites malheureusement majoritairement en Asie, sont en train de révolutionner le monde automobile.

Faisons maintenant le point sur les sources d'énergie et les carburants pour l'automobile. Si l'hydrogène est le plus énergétique des carburants, il a le défaut d'être très léger, il est donc nécessaire de le comprimer à haute pression pour obtenir une énergie spécifique²¹ qui ne soit suffisante. Les réserves d'énergie issues du pétrole sont remarquables, comme le montre le **Tableau 3**,

21. Énergie spécifique : énergie fournie rapportée à la masse.

Tableau 3

Comparatif des réserves d'énergie selon la source : l'hydrogène en tête.

	d (en kg/litre)	kWh/kg	kWh/L
Hydrogène	0,00009	32,4	0,0035
H ₂ - 700 bars	0,062		2,42
Essence	0,750	11,8	9,4
Diesel	0,850	11,6	10
Ion/lithium	2	0,150-0,200	0,100

de l'ordre de 10 kWh par litre, ce qui explique leur fabuleuse conquête du marché depuis plus d'un siècle. À côté, les batteries de type Lithium-Cobalt-Oxygène ou Lithium-Cobalt-Nickel-Manganèse-Oxygène peuvent stocker environ 150 à 200 W/kg, ce qui fait environ une centaine de W/L. Pour l'équivalent d'1 litre d'essence, il faudrait 47 à 63 kg de batterie Li-Ion, mais heureusement le moteur électrique a un rendement trois fois meilleur que celui du moteur thermique, ce qui fait que pour une consommation de 6 l/100 km d'essence, il faut l'équivalent d'une énergie de 15 à 20 kWh fournie par 75 à 100 kg de batterie.

3.3. La structure des nouveaux véhicules électriques

La propulsion électrique a un avantage : elle a un rendement de la source à la roue de l'ordre de 72 %, alors que le moteur thermique a un rendement inférieur à 30 %, ce qui rend possible l'usage de l'électricité pour l'automobile, d'où l'architecture des nouveaux véhicules électriques légers (**Figure 14**). Ils comportent un ou plusieurs

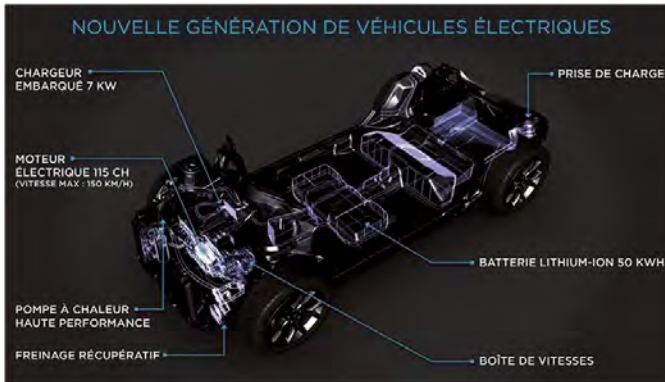


Figure 14

La structure du véhicule électrique.

moteurs électriques, propulsant ici les roues avant, un chargeur embarqué avec une prise de charge en courant alternatif ou en courant continu, dont la puissance va commander le temps de charge et, bien sûr, un pack de batteries qui est souvent disposé sur la plateforme de montage, en position basse pour améliorer la tenue de route. Pour une autonomie de 300 km, la batterie de 50 kWh pèse 250 kg pour la Peugeot électrique 208, et 540 kg pour la Tesla S. Pour l'instant, on peut presque assimiler l'autonomie de ces véhicules électriques en km au poids de la batterie en kg.

4 Les véhicules électriques sont-ils vraiment écologiques ?

4.1. Réduction des émissions de CO₂ : peut-on sauver la planète en passant de la pompe à la prise ?

Prenons l'exemple d'une automobile classique avec moteur thermique à la limite

du malus²² en France, produisant 100 g de gaz carbonique par km soit 10 kg pour 100 km. En supposant un kilométrage annuel de l'ordre de 15 000 km, ce qui est une moyenne haute en France, il produit 1 500 kg de CO₂ par an, donc si on la garde pendant dix ans, la durée de vie moyenne, cela représente environ 15 tonnes de CO₂ émis.

Avant de regarder la consommation et l'émission délocalisée du gaz carbonique pour un véhicule électrique, il convient de voir comment sont produits les kWh qui vont servir à propulser le véhicule électrique. La **Figure 15** donne les origines de la production d'électricité (mix électrique) en France et en Allemagne. Le mix électrique en France est majoritairement décarboné, grâce au nucléaire, à l'hydraulique et au renouvelable. C'est

22. Malus : lors de l'achat d'un véhicule neuf en France, si celui-ci dépasse 133 g de CO₂ émis par km, le propriétaire doit payer un malus. Plus le moteur est polluant, plus le malus est élevé.

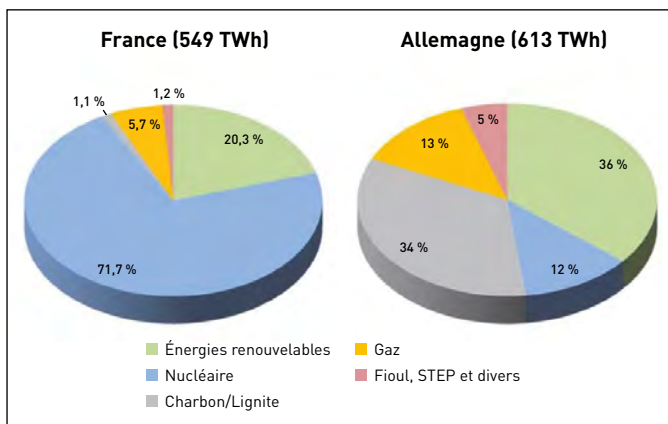


Figure 15

Le mix électrique en France et en Allemagne en 2018.

différent pour l'Allemagne qui, après Fukushima, veut supprimer globalement en 2022 les centrales nucléaires, mais a malheureusement développé les centrales thermiques à charbon ainsi que les renouvelables ; sans pouvoir décarboner totalement le kW.h, le mix électrique allemand n'est décarbonné qu'à 48 %, alors qu'en France il est décarbonné à 92 %.

Donc les mix électriques des différents pays se traduisent par des émissions décalées de gaz carbonique par kWh, qui peuvent être différentes suivant la politique énergétique qui est menée (Tableau 4). Dans des pays comme la Suède ou la France, on est inférieur à 100 g de CO₂ émis par kWh, tandis que des pays comme la Pologne ou la Chine, dépassent 800 g par kWh. Si nous nous reportons au cas du véhicule électrique, calculons donc l'émission décalée de CO₂ de ce type de véhicule pour 100 km sachant que l'on

dépense 15 à 17 kWh en ville et 23-24 kWh sur route ou sur autoroute, soit une moyenne de 20 kWh. En Suède et en France, un véhicule électrique produit donc de l'ordre de 1 kg de CO₂ pour 100 km, alors que l'on est au-delà de 17 kg pour la Pologne et la Chine avec environ 9 kg de CO₂ pour 100 km pour l'Allemagne.

Nous avons vu précédemment que la consommation moyenne en dix ans d'un véhicule électrique faisant 15 000 km/an est d'environ 30 000 kWh

Calculons pour un véhicule électrique en France les émissions de CO₂ sur dix ans. Rappelons : 20 kWh pour 100 km, 200 kWh pour 1 000 km, 3 000 kWh pour 15 000 km, l'usage pendant dix ans, 30 000 kWh. Et donc, avec le mix français, même en prenant pour simplifier 70 g de CO₂ émis par kW.h, on obtient sur dix ans une émission de 2 100 kg de CO₂, alors que le même calcul pour l'Allemagne donne 14,1 tonnes.

Tableau 4

L'émission de CO₂ par un véhicule électrique dépend beaucoup du mix électrique.

Pays	Gr de CO ₂ /kWh	kg CO ₂ pour 100 km (20 kWh)
Suède	50	1
France	66	1,3
Belgique	260	5,2
Espagne	320	6,4
Royaume-Uni	350	7
Italie	410	8,2
Allemagne	470	9,4
Pays-Bas	620	12,4
Pologne	880	17,6
Chine	850	17

4.2. La comparaison thermique/électrique après dix ans d'usage

Si nous effectuons la comparaison après dix ans d'usage, nous avons vu au paragraphe 2.3. que le véhicule thermique avait émis 15 tonnes de CO₂, alors que pour le véhicule électrique, c'était en France 2 100 tonnes, en Allemagne 14,1 tonnes (donc un peu moins que le véhicule thermique), et en Chine 25,5 tonnes. Ce n'est donc pas du tout écologique en Chine et cela montre bien que l'on y a privilégié la dépollution des villes par rapport à la transition écologique.

Pour aller plus loin, il faut également considérer le cycle de vie total, c'est-à-dire de la fabrication jusqu'au recyclage du véhicule. On considère que la fabrication du moteur, de la carrosserie, les vitres, des accessoires sont à peu près les mêmes pour le véhicule

thermique et l'électrique. En revanche pour l'électrique, il faut ajouter la dépense d'énergie pour la fabrication du pack de batteries qui est estimée entre 50 et 60 GJ, soit environ 15 000 kWh en moyenne. Selon le pays de fabrication pour fabriquer le pack de batteries (voir paragraphe 2.3.), il faut donc ajouter les émissions de CO₂ suivantes :

- en France : $15\ 000 \times 0,007 = 1\ 050$ kg ;
- en Allemagne : $15\ 000 \times 0,047 = 7\ 050$ kg ;
- en Chine : $15\ 000 \times 0,085 = 12\ 750$ kg.

C'est un argument supplémentaire pour que la Gigafactory²³ de fabrication des batteries s'implante de préférence en France pour concurrencer les batteries chinoises.

23. Gigafactory : initialement attribué à une usine Tesla, désigne une usine de fabrication de batterie automobile.

Donc, on peut conclure, en prenant en compte la fabrication et les usages d'un véhicule électrique pendant dix ans, qu'il correspondra à une émission de 3,1 tonnes de CO₂ en France, 21,1 tonnes de CO₂ en Allemagne, et 3,825 tonnes de CO₂ en Chine.

Donc le véhicule électrique est plus ou moins écologique, selon le mix électrique des pays dans lesquels on circule ; malheureusement, les batteries importées d'Asie ne sont pas encore recyclées.

4.3. Les problèmes collatéraux d'environnement

L'évolution vers la fabrication de nombreux millions de véhicules électriques fait qu'un certain nombre de d'écologistes radicaux pointent les dégâts environnementaux qui seraient provoqués par le tout électrique. Ils évoquent les salars²⁴ des plateaux andins, pour l'extraction du lithium, dont l'exploitation va polluer les nappes phréatiques des paysans chiliens ou boliviens, les métaux tels que le cobalt, exploité de façon dramatique dans les mines de la République démocratique du Congo, et les risques géopolitiques qui peuvent apparaître sur certains métaux comme le cobalt, le manganèse, le cuivre, et surtout les terres rares, pour lesquelles c'est la Chine qui a pratiquement le monopole de la production.

24. Salar : « désert de sel », lac superficiel dont les sédiments sont en grande partie composé de sels. Ils sont souvent exploités pour leur richesse en lithium.

5 Comparaison des véhicules électriques et thermiques

5.1. Les avantages

- Le véhicule électrique est écologique quand le mix électrique est décarboné.
- La pollution est extrêmement réduite en ville.
- C'est une économie des ressources fossiles si les kW.h ne sont pas produits par des centrales thermiques.
- Le prix au km est faible si la recharge est faite sur une prise ou « wall box » chez soi, à condition que le kW.h ne soit pas trop cher.
- La conduite est agréable et silencieuse.

5.2. Les inconvénients

- Les avantages ne se justifient pas dans les pays où l'électricité est issue de centrales thermiques.
 - L'autonomie est limitée pour l'instant et surtout les recharges sont lentes, souvent encore de quelques heures.
 - En France, les bornes de recharge sont en quantité insuffisante.
 - Le coût à l'achat est encore assez élevé.
 - Si on équipe des centaines de millions de véhicules électriques, certains métaux vont devenir très rares et stratégiques.
- Faisons aussi un peu de science-fiction en évoquant des scénarios auxquels nos politiques n'ont pas vraiment pensé. Si on part sur l'objectif 2030 avec un quart des véhicules en France électriques, rappelons-nous qu'il y a des grands départs en France de

temps en temps en été, avec environ 100 000 véhicules par jour sur l'A6 les jours de grands départs, donc 25 000 véhicules électriques si on en a le quart.

Cela sera la malédiction pour la station de Beaune, à 300 km de Paris, car supposons qu'elle dispose de dix pompes à essence ou Gasoil et que, devenue un « distributeur d'énergie », elle ait réussi à y mettre 100 bornes de puissance 50 kW. Pour une voiture électrique, une charge à 80 % se fait en vingt minutes sur ces bornes rapides, ce qui correspond à trois véhicules électriques par heure sur une borne, donc en 20 heures 60 véhicules, et pour les 100 bornes de la station 6 000 voitures en vingt heures, alors qu'il y avait au départ 25 000 voitures électriques à recharger. On aurait donc 19 000 voitures faisant la queue et bloquant l'autoroute sur à peu près 20 km. D'où la « malédiction de la station de Beaune » ! (Figure 16).

6 Le véhicule à hydrogène

6.1. Le fonctionnement du véhicule à hydrogène

Cette recharge lente de l'électricité nous fait aussitôt penser à un autre vecteur d'énergie : l'hydrogène. La pile à hydrogène est une merveille de chimie. Elle fonctionne à l'inverse d'un électrolyseur²⁵, grâce à des électrodes revêtues de microparticules de platine et une membrane électrolyte qui laisse passer les protons H⁺. D'un côté, on alimente en hydrogène, et de l'autre côté avec l'oxygène de l'air. Si elle est couplée à un moteur électrique, elle ne rejette que de l'azote et de l'eau. Cela est formidable au niveau pollution (Figure 17).

L'idée est donc venue, dans les années 2000, de se servir

25. Électrolyse : réaction chimique forcée par activation électrique.



Figure 16

Les bornes électriques sur les aires d'autoroute risquent de créer de longs embouteillages

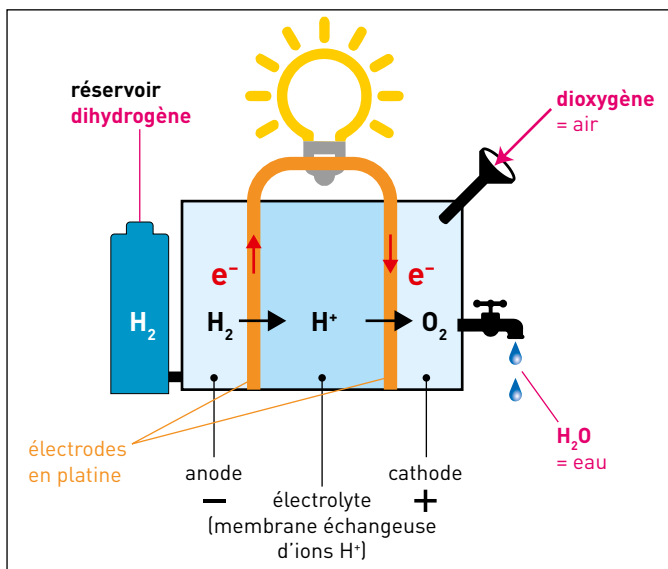


Figure 17

La pile à hydrogène est en apparence sans impact sur l'environnement.

Source : mediachimie.org

de l'hydrogène pour propulser les véhicules. On pourrait le brûler comme l'essence et le conserver dans des réservoirs cryogéniques à moins 250 °C , mais cela pose un problème de sécurité. Sinon, pour avoir une réserve énergétique correcte, il faut le comprimer à 700 bars.

L'automobile à l'hydrogène comportera des réservoirs à hydrogène sous haute pression, une pile à hydrogène couplée à un pack de batteries ion-lithium qui servent de tampon pour alimenter un ou plusieurs moteurs électriques.

La membrane électrolyte en Nafion²⁶, les couches minces de catalyseurs au platine et les réservoirs en matériau

composite représentent plus de la moitié du coût des véhicules.

6.2. L'impact écologique du véhicule à hydrogène

Par contre, comme d'après les constructeurs, 1 kg d'hydrogène permet de parcourir environ 100 km, posons-nous la même question que pour les véhicules électriques : le véhicule à hydrogène est-il écologique ? On serait évidemment tenté de dire oui, puisqu'il ne rejette que de l'azote et de l'eau. Mais il faut tout de même regarder l'origine de cet hydrogène. Pour l'instant, en 2021, 95 % sont fabriqués à partir de « *steam reforming* »²⁷ du méthane

27. « *Steam reforming* » : reformage du méthane. C'est une réaction qui permet de transformer du méthane en hydrogène.

26. Nafion : nom de marque d'un polymère.

et d'hydrocarbures légers, c'est-à-dire que la production d'1 kg d'hydrogène s'accompagne de la production de 5 à 10 kg de gaz carbonique en raffinerie. C'est ce que l'on appelle l'hydrogène gris. L'industrie chimique en utilise à peu près 70 millions de tonnes par an. En France, on en utilise déjà 1 million de tonnes.

Par ailleurs, fabriquer l'hydrogène, soit chimiquement, soit par électrolyse de l'eau, demande de l'énergie. Il faut ensuite le transporter puis le comprimer. Toutes ces opérations consomment environ 70 % de son potentiel énergétique disponible, et après le rendement de la pile, on récupère du réservoir à la roue à peine 25 % de l'énergie.

Dans ce cas, sachant que par électrolyse de l'eau il faut environ 50 kW.h pour produire 1 kg d'hydrogène, et sachant que l'on peut parcourir 100 km avec 1 kg d'hydrogène, on peut regarder l'équivalent de gaz carbonique émis de façon décalée par ces véhicules à

hydrogène selon l'origine de l'hydrogène (Tableau 5).

En « *steam reforming* », pour l'hydrogène gris, on a donc, par kg, 6 à 10 kg de CO₂ émis. Si on stocke ce CO₂ soit dans des réserves sous terre ou par des carbonates, on a ce qu'on appelle l'hydrogène bleu. Mais ce stockage consomme de l'énergie, ce qui correspond à une émission de 2,5 kg de CO₂ par kilogramme d'hydrogène. Si on produit l'hydrogène par électrolyse avec le réseau électrique en France, majoritairement d'origine nucléaire, cela correspond à peu près à une émission de CO₂ de 3,5 kg, mais sur réseau allemand c'est sept fois plus, de l'ordre de 23,5 kg.

Si l'électricité utilisée vient directement des éoliennes, c'est de l'ordre de 350 g. Avec de l'électricité photovoltaïque, c'est environ 2,7 kg. Si l'électricité est d'origine nucléaire ou hydraulique, ce n'est que 300 g. Les références par kW.h sont les bases de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME).

Tableau 5

Empreinte carbone du véhicule à hydrogène : selon le mix électrique de l'électrolyse, la quantité de CO₂ émis diffère.

Procédé	Couleur H ₂	kg CO ₂ par 100 km (1 kg H ₂)
Steam reforming	gris	6 à 10
St ref et stockage CO ₂	bleu	2,5
Électrolyse mix France		3,5
Électrolyse mix Allemagne		23,5
Électrolyse éolienne	vert	0,35
Électrolyse photovoltaïque	vert ?	2,75
Électrolyse nucléaire	jaune	0,3
Électrolyse hydraulique	vert	0,3

6.3. L'hydrogène, plus ou moins adapté selon le type de véhicule

On voit donc que selon que l'on utilise un hydrogène vert, un hydrogène gris ou un hydrogène jaune²⁸, on aura des variations d'émissions de gaz carbonique décalées. On peut estimer, malgré l'emballement médiatique qui a accompagné le plan de relance en France et en Allemagne sur l'hydrogène, que le surcoût et le poids d'un tel équipement ne sont pour l'instant pas vraiment adaptés à un véhicule particulier léger. Il n'y a actuellement que deux constructeurs automobiles qui commercialisent ce type de véhicules pour les particuliers. Par contre, pour les poids lourds, les autobus, des trains, où le poids et le coût de l'équipement ne représentent qu'un faible pourcentage du coût et du poids total, la pile à hydrogène est bien adaptée.

Il y a par exemple des réalisations françaises et européennes qui sont là pour le démontrer. Le train, type TER, CoradiaLint, réalisé par Alstom et qui circule actuellement en Allemagne, est une très belle réalisation qui va remplacer à l'avenir nos TER qui fonctionnent au diesel.

De même, les camions de la firme Gaussin sont une belle

28. L'hydrogène est qualifié de gris quand il est fabriqué à partir de gaz ou de pétrole par procédé chimique sans récupération du CO₂, de bleu lorsqu'on capte et stocke le CO₂ émis par le procédé, de vert quand il est fabriqué par électrolyse de l'eau avec une électricité renouvelable, de jaune lorsque cette électricité est d'origine nucléaire.

réussite, au point que pour le prochain Dakar, leur participation est envisagée.

6.4. Les avantages et inconvénients de l'hydrogène

Bien sûr, il faudra attendre quelques années pour que l'hydrogène vert ou jaune permette aux véhicules à hydrogène d'accéder au mérite écologique, en plus du mérite non-pollution. Alors, à nouveau, comparons les mérites et les défauts de ces nouveaux véhicules :

- parmi les avantages, bien sûr, ils sont très peu polluants puisqu'ils produisent uniquement de l'azote et de l'eau. Ils ont également tous les avantages du véhicule électrique puisqu'ils sont propulsés par des moteurs électriques et des piles lithium-ion. Un gros avantage par rapport à l'électrique est que la recharge de l'hydrogène sous haute pression se fait en 2-3 minutes. Économie des ressources, évidemment, si nous sommes avec de l'hydrogène vert, et il convient très bien au ferroviaire et aux poids lourds ;

- les inconvénients : ces véhicules sont peu écologiques, si la majorité de l'hydrogène est de l'hydrogène gris. Il faut aussi faire accepter aux conducteurs qui vont l'utiliser les dangers des hautes pressions de l'hydrogène, mais il y a déjà pas mal de véhicules industriels qui fonctionnent sans trop de danger. La pile à hydrogène utilise des métaux précieux ; si on construit des millions de véhicules, il est clair que l'on aura des problèmes sur l'approvisionnement des métaux précieux,

en particulier sur le platine. Pour l'instant, le coût d'achat et de fonctionnement est élevé pour un particulier, puisque le kilogramme d'hydrogène est plutôt aux alentours de 5

à 10 euros, voire 15 euros, et il y a encore beaucoup moins de stations de recharge que pour l'électrique. Mais cela est normal puisqu'il y a encore très peu de véhicules.

L'avenir des véhicules

Voyons quelques aspects économiques et d'infrastructures. Même si vous ne voulez pas acheter un véhicule Tesla, un véhicule particulier électrique coûte toujours aux alentours de 30 000 euros. Les véhicules à hydrogène sont plus chers, plutôt aux alentours de 80 000 euros.

Pour le fonctionnement, si vous avez un véhicule thermique et qui fonctionne à l'E85-10, vous dépensez à peu près 8 euros aux 100 km, alors que pour un véhicule électrique, si c'est en France, il ne coûte que 3 euros aux 100 km sur une borne de recharge chez vous, et il y a des bornes gratuites dans les hôtels ou sur des parkings de supermarchés. En Allemagne, le véhicule électrique coûte 7 euros pour 100 km. N'oublions pas que le fisc est toujours là et que déjà en Australie, l'État pense à instituer une taxe pour les véhicules électriques au km qui remplacerait les pertes dues aux taxes sur l'essence et le diesel. Nul doute que le fisc français va trouver cela intéressant.

Regardons les infrastructures. Avant 2019, le nombre de véhicules électriques représentait environ 2,5 % des ventes, en 2020 il est monté à 6 %. Cela veut dire qu'on a vendu, en 2020, 22 000 véhicules électriques et 15 000 hybrides, grâce aux 185 millions d'euros de subventions d'État. On a donc en France environ 300 000 véhicules électriques ou hybrides avec seulement 30 000 bornes et avec des prix à la borne de recharge de 0 à 50 centimes d'euro pour le kWh. En France, nous n'avons actuellement

que 200 véhicules à hydrogène pour seulement 20 stations, dont 6 stations à 700 bars. Donc on voit que les voyages au long cours sont difficiles. Alors quel avenir ?

Il est clair que les véhicules propres ont pour premier but l'économie des ressources fossiles. Mais les véhicules thermiques n'ont pas dit leur dernier mot. Les motoristes, les catalyistes et les pétrochimistes peuvent encore faire des progrès. Les véhicules électriques sont la priorité pour éviter la pollution dans les villes. Ils sont écologiques suivant le mix électrique utilisé, et des progrès vont être réalisés dans l'avenir sur les batteries.

Les véhicules à hydrogène sont les champions de la dépollution de l'atmosphère des villes. Des progrès sont évidemment attendus pour la production de l'hydrogène vert, mais il reste encore à trouver un remplaçant au catalyseur platine.

N'oublions pas que l'essor des véhicules électriques va induire une mutation profonde de l'industrie automobile. On a beaucoup moins de main-d'œuvre nécessaire pour la production de véhicules électriques que pour un véhicule thermique, et il y a forcément du chômage à prévoir dans l'industrie automobile européenne. Enfin, on constate que les habitants des villes sont extrêmement sensibles à la pollution et donc, pour les populations urbaines, le caractère non polluant est une qualité première. Mais pour les populations à la campagne, loin d'une métropole, c'est d'abord l'autonomie et le coût de fonctionnement qui sont mis en avant. Il ne faudrait donc pas que tous ces nouveaux véhicules agrandissent le fossé de discrimination sociale et territoriale.