

TITRE : Ressources, énergie et propulsion de véhicules

Christian Piguet, Mai 2021

Résumé

Ce texte a pour but de faire le point sur l'extraction de ressources, la production d'énergie renouvelable et l'évolution des voitures y compris électriques. En effet, on entend souvent des contre-vérités qu'il s'agit de confronter à la vérité.

Quand des gens dénoncent l'utilisation de précieuses ressources pour des panneaux PV, des éoliennes ou des batteries de voitures électriques, ils négligent de dire que ces mêmes ressources sont déjà utilisées pour de nombreux objets qu'ils utilisent depuis longtemps. Ce genre de discours est souvent le fait de compagnies qui redoutent à juste titre la concurrence des énergies renouvelables (compagnies pétrolières, le nucléaire). Ou ce sont des publications qui datent déjà de plusieurs années et qui ne reflètent pas l'état de la technologie d'aujourd'hui, comme les batteries de voitures électriques.

Pour la production d'énergie renouvelable, il existe des panneaux PV spécialisés qui utilisent des ressources rares, mais de loin pas tous. Les panneaux PV les plus fréquents n'en utilisent pas. Même situation pour les éoliennes, un petit nombre utilisent une terre rare pour leur alternateur. Concernant les batteries, considérées comme le point faible des voitures électriques, ce qui était le cas jusqu'à aujourd'hui, on constate des progrès importants. On parle de 2^e vie comme stockage d'électricité dans des bâtiments et on parle aussi de recyclage des matériaux, dont le lithium.

La dernière partie de ce texte fait une analyse des technologies de propulsion pour les voitures. Bien sûr que la meilleure des voitures est celle que l'on ne possède pas, suivie d'une voiture en autopartage. Mais ensuite, si une voiture reste nécessaire pour certaines activités spécifiques, quel type de voiture est à recommander. On entend souvent des gens faire état de tous les défauts d'une voiture électrique, à commencer par la batterie. Mais comme dit plus haut, il y a des progrès intéressants. Le choix d'une voiture ne se limite pas au choix de la propulsion, mais il faut également considérer le poids de la voiture ainsi que l'énergie de fabrication. La mode des SUV de 2 à 2,5 tonnes est un désastre écologique, y compris les SUV électriques ou Tesla qui doivent embarquer une très grosse batterie qui pèse beaucoup trop. L'énergie de fabrication (avec son dégagement de CO₂) est en gros proportionnelle au poids. Donc la première recommandation est en faveur d'une petite voiture légère. Puis il faut choisir la propulsion durable, soit électrique, hybride, gaz naturel ou hydrogène. On constate que le moteur électrique (rendement environ 80%) est environ 2,5 fois plus efficace que le moteur thermique (20-30% de rendement). C'est le très grand avantage de la voiture électrique. Donc la voiture électrique émet seulement le 30 % de CO₂ d'une voiture à essence sur toute sa durée de vie si le courant de recharge provient d'énergie renouvelable. La voiture à gaz vient ensuite si c'est du biogaz. Mais ce n'est facile de trouver que du biogaz, c'est la plupart du temps un mix. Les deux dernières catégories ne sont pas recommandables. Les hybrides rechargeables ou non (Prius), considérées comme vertes il y a 10 ans, sont aujourd'hui de grosses voitures qui cumulent le défaut du moteur à essence (fossile) et électrique (qui n'est presque jamais utilisé, mais qui pèse son poids). Et ne négligeons pas le poids en énergie et

CO2 pour extraire de l'or noir et de le raffiner et le transporter en Suisse. Quant à l'hydrogène, pourquoi utiliser de l'électricité pour produire de l'hydrogène qui sera lui-même utilisé pour produire de l'électricité pour faire avancer la voiture. C'est trois fois moins efficace qu'une voiture électrique. Donc autant utiliser directement une batterie lithium-ion.

Introduction

Historiquement, la révolution industrielle est née avec le charbon.

Puis, la 2^e forme d'énergie qui a façonné notre société est le pétrole. Un rôle important est aussi joué depuis plusieurs décennies par le gaz naturel.

La 3^e forme d'énergie qui transforme aujourd'hui notre société est l'électricité. Notons que l'électricité est une énergie secondaire, produite malheureusement encore aujourd'hui avec du charbon et du fuel, mais aussi par de l'hydraulique, des panneaux photovoltaïques et des éoliennes.

Si tout le monde est d'accord pour dire que dans l'idéal, le meilleur gisement d'énergie est constitué par les économies d'énergie, la transition énergétique vers l'électrique est à la fois saluée par les uns et critiquée par les autres.

On peut lire et entendre ici et là tout et son contraire. Est-ce que la voiture et le gros véhicule électrique est la bonne réponse, est-ce que la digitalisation de l'économie va dans le mur, quelles sont les plus grandes menaces envers notre planète, est-ce que les panneaux solaires PV et les éoliennes consomment des terres rares à profusion ? C'est à ce genre de questions qu'il s'agit de répondre de manière conséquente et non par des impressions, des fake news, etc...

Pour fabriquer n'importe quel objet, il faut à la fois faire appel à des ressources et à de l'énergie, à laquelle il faut ajouter l'énergie nécessaire à l'utilisation de l'objet. Il faut encore de l'énergie pour extraire des ressources de notre planète. Et l'extraction inconsidérée de ressources peut mener à leur disparition.

Il est parfois avancé que les panneaux solaires, les éoliennes et les voitures électriques sont truffées de terres rares [1], ce qui est à peu près tout faux !

1. Ressources

1.1 Terres rares ou métaux rares.

En fait, ce sont des éléments pas si rares. Contrairement à ce que laisse entendre leur dénomination, les terres rares sont relativement abondantes dans la croûte terrestre, plus en tout cas que l'or ou l'argent. On retrouve ces métaux sous forme de traces dans la plupart des environnements naturels.

Leurs propriétés électroniques, magnétiques, optiques ou encore catalytiques, en font des éléments particulièrement recherchés par l'industrie (aéronautique, automobile, technologies de l'information, etc...). C'est de ce point de vue que le terme « terres rares » trouve sa cohérence puisque les quantités disponibles restent considérées comme faibles,

compte tenu de leur poids économique. On les qualifie d'ailleurs également de « métaux stratégiques ».

Selon un panorama établi par le BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières), la production minière mondiale de terres rares avoisinait, en 2014, quelque 144.000 tonnes pour une consommation d'environ 120.000 tonnes et un marché qui pesait près de 3,2 milliards d'euros. La demande globale en terres rares devrait encore croître.

Même si les terres rares sont relativement abondantes dans la croûte terrestre, elles sont souvent peu concentrées dans les minerais, et leur production est aujourd'hui essentiellement concentrée en Chine.

1.2 Métaux traditionnels

Pour fabriquer des objets, on utilise aussi des métaux traditionnels comme l'argent, l'aluminium, le cobalt, le fer, le plomb, le cuivre, le lithium, le manganèse et le nickel.

1.3 Métaux rares critiques

Les métaux rares (5% du marché des métaux) sont distincts des métaux précieux (23% du marché avec l'or, le platine et l'argent) et des métaux dits « majeurs » (cuivre, aluminium, zinc, à 72%). Produits en faible quantité dans un petit nombre de pays, ils sont peu substituables. Le cuivre, abondamment utilisé en électricité, présente des réserves mondiales de 630 millions de tonnes pour une production annuelle de 16 millions de tonnes.

1.4 Néodyme et Samarium

Le néodyme est une terre rare utilisée dans un alliage de fer et de bore, dopé au dysprosium (aussi une terre rare) pour fabriquer les aimants permanents les plus puissants. Le marché est dominé par des manufacturiers chinois (3/4 de la production d'aimants au néodyme, 75'000 tonnes en 2013), la Chine comportant beaucoup de terres rares. Ces aimants permanents contiennent, en masse, 31 % de néodyme et 5,5 % de dysprosium. Les véhicules automobiles actuels en contiennent de 1 à 2 kg. Il existe aussi des aimants permanents avec du Samarium, qui est aussi une terre rare.

Ces aimants à base de terres rares ne sont pas utilisés que pour des éoliennes et des voitures électriques, mais pour une gamme de produits très large, comme les ordinateurs, l'éclairage, les télécommunications, la médecine, les disques durs, l'aérospatial, l'avionique, capteurs, haut-parleurs, microphones et pour bien d'autres applications où un moteur électrique est nécessaire.

1.5 Cobalt et Nickel

Le cobalt est un métal assez rare (50'000 tonnes produites par année, 6 millions de tonnes de réserve) et surtout utilisé dans les batteries de voitures électriques. Mais les batteries utilisées dans la Tesla Model 3 contiennent déjà beaucoup moins de cobalt que celles des autres constructeurs. En juillet 2019, le fabricant chinois de cellules pour batteries SVOLT Energy Technology annonce avoir mis au point une nouvelle technologie de batteries lithium-ion sans cobalt. On peut aussi remplacer le cobalt par du nickel, dont les réserves sont de 94 millions de tonnes et la production annuelle de 2,5 millions de tonnes. On parle aussi de batteries avec un électrolyte solide qui ne nécessite pas de cobalt pour leurs électrodes. On le voit, des

progrès considérables sont menés par beaucoup de fabricants de batteries y compris en Europe.

2. Énergie

2.1 Charbon (énergie primaire¹ fossile)

Il existe encore énormément de centrales à charbon pour produire de l'électricité et de la chaleur. La Chine est le pays qui construit le plus de centrales à charbon (57% de l'énergie chinoise provient du charbon). Au niveau mondial, c'est 30%. D'où les réticences d'acheter des biens (batteries, etc...) chinois dont on sait que l'énergie de fabrication provient majoritairement du charbon.

2.2 Pétrole (énergie primaire fossile)

Le pétrole est une énergie qui a dominé tout le XXe siècle. Cela a suscité des guerres, engendré de la pollution de l'air, des marées noires, contribué au CO2 et finalement à l'extraction de gaz de schiste. Mais on est, au début du XXIe siècle, au pic de production de pétrole, et l'arrivée de la voiture électrique est une menace grandissante pour les compagnies pétrolières. Celles-ci, et c'est un signe, tentent de se diversifier dans les énergies renouvelables, l'hydrogène et le stockage d'électricité ou bien vont pratiquer des fusions et des acquisitions [4].

2.3 Gaz naturel (énergie primaire fossile)

En 2018, c'est la troisième source d'énergie primaire utilisée dans le monde avec 22,8% de la consommation d'énergie primaire, après le pétrole (31,6 %) et le charbon (26,9 %) ; sa part progresse rapidement (16 % seulement en 1973), de même que sa production mondiale (+234% en 46 ans, de 1973 à 2019, dopée par l'exploitation des gaz non conventionnels comme le gaz de schiste). Le gaz naturel est utilisé dans l'industrie, les usages domestiques (chauffage et eau chaude), la production d'électricité et, en moindre mesure, la mobilité. Malgré le fait qu'il s'agisse d'une énergie fossile, les gaziers la présentent comme une énergie verte et durable pour remplacer le charbon dans la production d'électricité et le pétrole dans le chauffage des bâtiments et la mobilité.

2.4 Électricité (énergie secondaire² qui peut être d'origine fossile, nucléaire ou renouvelable)

La production mondiale d'électricité était issue en 2018 des combustibles fossiles pour 63,9 % (charbon 38%, pétrole 2,9%, gaz naturel 23%), du nucléaire pour 10,1 % et des énergies renouvelables pour 25,5 % (hydroélectricité 16,2 %, éolien 4,8 %, solaire 2,1 %, biomasse 1,9 %, géothermie 0,3 %). A l'avenir, et surtout en Suisse, le solaire photovoltaïque devra se développer de manière beaucoup plus importante (en 2018 avec 3,4%, vers 5% en 2021).

2.5 Hydrogène [2] (énergie secondaire qui peut être d'origine fossile, nucléaire ou renouvelable)

On parle aussi d'hydrogène, en particulier les piles à combustibles. Celles-ci fonctionnent à l'inverse de l'électrolyse de l'eau, soit utilisent de l'hydrogène (H2) et de l'oxygène (O2) pour

¹ L'énergie primaire correspond à l'ensemble des produits énergétiques non transformés

² L'énergie secondaire est toute l'énergie obtenue par transformation d'une énergie primaire

produire de l'électricité et comme déchet que de l'eau. Le principe est simple, mais il faut analyser la manière de produire l'hydrogène. Il est également aisé d'utiliser l'hydrolyse de l'eau, mais l'électricité nécessaire doit alors être produite par de l'énergie renouvelable. Néanmoins, le rendement est faible (électrolyse 70% et pile à hydrogène 50%), soit 35%. Et on se demande quel intérêt il y a de créer de l'hydrogène avec de l'électricité et ensuite d'utiliser l'hydrogène pour créer de l'électricité dans la voiture. Pourquoi ne pas utiliser directement l'électricité pour charger une batterie classique (lithium-ion). Les trois autres problèmes sont le coût, le stockage (sécurité) et le recyclage (surtout le platine qui est le catalyseur d'une telle pile). La conclusion est que la pile à combustible a peu de chances de concurrencer la batterie lithium-ion, sauf dans quelques niches exigeant à la fois de très grandes autonomies pour des véhicules très lourds. Il n'en reste pas moins que le potentiel d'utilisation des piles à combustible est vaste (alimentation de petits appareils électroniques, approvisionnement énergétique fixe – par la production d'électricité ou par la cogénération de chaleur et d'électricité – voire propulsion de très gros camions). Une autre utilisation de l'hydrogène permet le stockage de l'énergie électrique sous forme gazeuse (Power to Gas) – par exemple dans les réseaux de gaz naturel – pour une utilisation ultérieure dans la production de chaleur ou d'électricité.

2.6 Panneaux solaires photovoltaïques

Dans le domaine du solaire photovoltaïque, très peu de métaux rares sont utilisés. 94 % du marché mondial est assuré par des technologies à base de silicium cristallin, soit du sable purifié. Les rendements sont entre 14 et 18%. Le silicium est la deuxième matière la plus présente dans la couche terrestre. Seule la technologie photovoltaïque dite de couches minces CIGS (cuivre-indium-gallium-diséléniure) utilise deux métaux rares : l'indium et le gallium et est parvenue à un rendement de 22% en laboratoire.

Les modules photovoltaïques contiennent plusieurs métaux rares, dont le recyclage devrait être largement développé :

- l'argent (Ag) : dans les capteurs de technologie silicium cristallin ;
- l'indium (In) : dans les technologies silicium amorphe, CIS, CIGS ;
- le gallium (Ga) : dans les technologies CIGS, cellules à haut rendement ;
- le germanium (Ge) : dans les technologies silicium amorphe, cellules à haut rendement.

2.7 Éoliennes

Une éolienne comporte un alternateur pour produire le courant, qui est en fait un moteur électrique qui tourne à l'envers, le mouvement des pales créant de l'électricité (et non de l'électricité qui produit du mouvement comme pour les voitures). Ainsi, un alternateur avec des aimants permanents peut utiliser une terre rare néodyme, mais ce n'est pas obligatoire. Le champ magnétique nécessaire peut donc être créé par un aimant permanent ou peut être créé par l'électricité, comme les éoliennes de la compagnie ENERCON.

Comme exemple d'éoliennes qui utilisent du néodyme, on trouve des éoliennes offshore qui comportent 155 kg de néodyme, 27,5 kg de praséodyme et de 2,8 à 24 kg de dysprosium par MW de puissance.

Mais évidemment, il y a déjà des milliards de moteurs électriques sur la terre, dont une bonne partie utilise des aimants permanents et donc la terre rare néodyme. Donc tenter de faire croire que les éoliennes doivent utiliser des terres rares a pour seul but de décrédibiliser le renouvelable face aux combustibles fossiles.

2.8 Batteries [2, 8]

Les batteries ou accumulateurs lithium-ion sont rechargeables. Quasiment inexistantes en l'an 2000, elles dominent (95%) le marché des batteries en 2016 (à cause de la voiture électrique), si l'on ne tient pas compte des vieilles batteries plomb-acide toujours utilisées pour d'innombrables applications.

Le coût des batteries lithium-ion s'est effondré ces 8 dernières années. En 2010 le kWh de stockage avec une batterie Lithium coûtait 1000 dollars. Puis 650 dollars en 2012, un peu plus de 500 dollars en 2014, un peu moins de 300 dollars en 2016 et un peu moins de 200 dollars aujourd'hui. Il tombera à 100 dollars en 2026 et à 73 dollars en 2030 d'après les experts de l'agence Bloomberg.

Comme le montre un rapport de l'agence Bloomberg (juillet 2017) les batteries représentent en 2018 42% du coût économique d'une voiture électrique. Ce chiffre tombera à 27% en 2024 et à 18% en 2030. C'est précisément en 2024 que le coût global (à l'achat) d'une voiture électrique à batterie sera égal à celui d'une voiture thermique.

La production de batteries lithium-ion en 2021 (300 GWh) sera faite en Chine (67%), USA (16%), Corée (8%), Japon (5%) et l'Europe (4%). Les réserves de Lithium sont de 17 millions de tonnes avec une production annuelle de 77'000 tonnes par an.

Le recyclage et l'élimination des batteries lithium-ion pour voitures est un point très important. Dès que la capacité de la batterie n'atteint que 70% du nominal, il faut soit la changer soit la remettre à niveau en changeant les cellules qui sont en fin de vie. Cette dernière solution coûte de 60 à 80% du prix d'une batterie neuve, donc c'est très peu attrayant. Mais la batterie à 70% de sa capacité peut être utilisée dans des applications stationnaires de stockage d'électricité pour des panneaux solaires de bâtiments. La durée de vie d'une batterie lithium-ion est de 6 à 10 ans dans une voiture, et sa réutilisation dans des bâtiments équipés de panneaux solaires prolonge sa vie de 5 à 10 ans.

Les batteries Lithium-ion pour voitures électriques « normales » font en moyenne 35 kWh, mais on estime qu'elles feront en moyenne 60 kWh en 2030. Pour des voitures électriques de haut de gamme, on voit des batteries de 100 kWh (Tesla, par exemple). Une telle batterie est caractérisée par 4 (les plus récentes) à 8 kg/kWh. Pour 35 kWh on a donc un poids de la batterie de 140 à 280 kg. Pour 70 kWh, le double, soit 280 à 560 kg. Et pour la Tesla avec 100 kWh, le poids est de 400 à 800 kg. Il est déraisonnable de fabriquer de telles voitures électriques avec des batteries si lourdes.

Pour une batterie lithium-ion de voitures pesant 250 kg (de 6 à 8 kg par kWh), il y a 3 kg de lithium-métal, soit 200 dollars (2017). Or une telle batterie de 35 kWh coûte 7700 dollars (220 dollars/kWh). La demande en lithium augmente chaque année, mais les réserves mondiales sont bien suffisantes même pour le long terme. Aujourd'hui, peu de lithium est recyclé, mais

cela est une question de temps pour y parvenir à grand échelle. Dans [8], on indique que grâce au recyclage, dans les 10 prochaines années, on réduira d'un facteur 3 le besoin en lithium et de 2,5 les besoins en cobalt et nickel.

On parle aussi de batteries avec un électrolyte solide, qui seraient plus légères à puissance égale que le lithium-ion liquide. Aussi plus sûre, car elle ne peut pas s'enflammer, donc pas besoin de protection contre le feu (gain de poids). On pourrait atteindre environ 3 kg par kWh. Début 2021, un constructeur chinois annonce une voiture électrique avec une batterie à électrolyte solide.

Il est certain que l'on parviendra à éliminer ces batteries lithium-ion après leurs secondes vies. Ce processus débute par la collecte de batteries, le tri, le test (seconde vie ou pas) et le recyclage, comportant le désassemblage des cellules, leur broyage puis des traitements chimiques. Cela montre que l'on sait éliminer des batteries même si le nombre de batteries à éliminer est encore aujourd'hui très faible (début des voitures électriques en 2010). Reste que ces processus sont assez coûteux. On estime qu'en 2030, on devra éliminer 200'000 tonnes par an de batteries lithium-ion en Europe, également 200'000 tonnes par an aux USA et 600'000 tonnes par an en Chine. Mais les capacités d'élimination ne sont pas encore là (pas assez de batteries en fin de vie en 2020). Notons qu'il faudra rester très attentif pour que ces batteries usagées ne soient pas envoyées comme déchets dans des pays pauvres.

Le coût de station de recharge est de 3 à 4'000 € pour une station lente et jusqu'à 40'000 € pour une station rapide.

Il sera très intéressant de suivre l'évolution technologique des batteries pendant ces prochaines années.

3. Véhicules

Le moyen le plus écologique pour se déplacer est bien évidemment la marche à pied, le vélo, puis les transports publics (trains, trolleybus, bus) pour autant que ce ne soit pas des véhicules à énergie fossile. Ces derniers restent quand même toujours une meilleure option que les véhicules individuels (notamment les voitures) à énergie fossile.

On peut aussi citer des voitures en autopartage (par exemple Mobility), location, taxi, avec une préférence pour des véhicules ne fonctionnant pas avec des énergies fossiles. Mobility annonce une flotte de véhicules uniquement électriques d'ici 2030.

Si vraiment une voiture personnelle ou en partage avec 3-4 personnes est nécessaire, alors le choix d'une voiture et de sa motorisation se pose. Ci-dessous, les différentes motorisations alternatives et durables (électrique, hybride rechargeable, hydrogène, biogaz) sont décrites.

3.1 Voitures électriques

Les voitures électriques sont aujourd'hui (2021) considérées comme voitures « vertes », alors que d'autres personnes critiquent cette affirmation car les batteries nécessitent une importante énergie de fabrication et d'élimination et l'électricité consommée peut être

d'origine non renouvelable (nucléaire ou fossile). Il est dès lors important de faire le tour de la question.

Le type de motorisation est bien sûr important, mais pas seulement. Le poids et la puissance des voitures, de même que la vitesse de pointe, sont aussi des éléments importants pour juger du caractère « vert » d'une voiture.

La plupart des voitures atteignent aujourd'hui 200 à 220 km/h en vitesse de pointe. Or une voiture atteignant cette vitesse pèse 50% de plus qu'une voiture atteignant les 120 km/h, limite de vitesse sur autoroute. Ainsi, le tiers du poids des voitures actuelles n'est pas utile, donc on consomme 30% de plus en énergie de fabrication, on produit 30% de plus de CO2 et 30% de plus de matériau de construction.

L'énergie de fabrication d'une voiture est en gros la moitié de l'énergie totale que consommera une voiture lors de toute sa vie. Et cette énergie de fabrication est proportionnelle au poids de la voiture. L'évolution du poids des voitures va dans le mauvais sens :

- VW Golf I, 1974, 750 kg
- VW Golf V, 2003, 1329 kg
- VW Golf VII, 2013, 1375 kg

Le poids moyen d'une voiture en Suisse est proche de 1'500 kg (grosse proportion de SUV). Mais une Tesla Model S entièrement électrique pèse de 2'100 à 2'300 kg. Ceci est dû au 500-600 kg supplémentaires de la très grosse batterie de 100 kWh pour atteindre 600 km d'autonomie. Une Renault Zoe pèse près de 1'500 kg avec une batterie de 52 kWh pesant 325 kg. Une Renault Twingo à essence pèse 900 kg mais la version électrique avec une batterie de 22 kWh pèse 1'100 kg avec une autonomie de 190 km.

Toujours en rapport avec le poids, une voiture électrique n'a pas de boîte de vitesse et pas d'embrayage, ceci grâce à son grand couple à bas régime. Cela supprime du poids (150 à 200 kg) et de la complexité. Mais c'est le poids de la batterie qui produit des voitures électriques plus lourdes d'environ 20% comparé aux modèles thermiques équivalents. Or plus une voiture est lourde, plus elle émet de particules fines (freins et pneus) et plus elle consomme d'énergie (carburant ou électricité). C'est un désavantage des voitures électriques.

Si les véhicules électriques ont besoin de lithium, les véhicules hybrides préfèrent le plomb et les véhicules à hydrogène le platine. Les moteurs électriques Tesla (tout comme les éoliennes d'Enercon) ne contiennent pas un seul gramme de néodyme (terre rare) et nombreux sont les fabricants qui construisent des batteries lithium sans consommer un seul gramme de cobalt.

Les voitures électriques qui utilisent des aimants permanents pour leurs moteurs électriques utilisent une terre rare Néodyme. Mais cela n'est pas obligatoire, les moteurs électriques d'autres voitures utilisent l'électricité pour réaliser le champ magnétique nécessaire, et donc n'utilisent aucune terre rare (c'est le cas des Tesla par exemple).

Les voitures électriques d'il y a quelques années étaient des petites voitures légères avec de relatives petites batteries mais qui coûtaient fort chères et nécessitaient beaucoup d'énergie

de fabrication. Or aujourd'hui (2021), on constate qu'à côté de petites voitures électriques, une partie importante de ces voitures électriques sont des grosses et puissantes voitures avec de grosses batteries, ce qui ne va pas dans le bon sens.

En outre, on trouve une multitude d'études démontrant que la voiture électrique est plus « verte » que la voiture thermique, ou le contraire ! Il faut faire attention aux études des constructeurs de voitures thermiques dénigrant les voitures électriques et à la date de l'étude. N'importe quelle étude de 2010 (donc trop vieille) prend en compte l'état embryonnaire des voitures électriques et des batteries (comptées pour la moitié de l'énergie de fabrication totale), ce qui est reflété dans le prix exorbitant de ces voitures à l'époque.

Sur le plan de l'énergie de fabrication (le coût de fabrication, donc de la voiture, suit la même courbe), on a la proportion suivante du coût de la batterie par rapport au coût total de la voiture [3] :

2020 : 36% (quasiment un tiers pour la batterie)

2022 : 31%

2024 : 27% (le coût d'une voiture électrique est comparable à celui d'une voiture thermique)

2026 : 24%

2028 : 21%

2030 : 18%

En 2024, le coût moyen d'une voiture thermique ou électrique sera de 30'000 \$. Mais après 2024, le coût de fabrication d'une voiture électrique sera plus petit que celui d'une voiture thermique. De plus, l'entretien de la voiture électrique est moins onéreux que celui de la voiture thermique. Donc aujourd'hui encore (2021), une voiture électrique nécessite davantage d'énergie de fabrication qu'une voiture à essence.

Il est temps de faire une comparaison entre une voiture électrique et une voiture thermique de même catégorie. Cette comparaison va se faire sur le plan « énergie » et sur le plan « émission de CO2 ».

Pour l'énergie d'utilisation (essence ou électricité), il faut retenir deux chiffres (pour une voiture de catégorie moyenne) :

- Voiture thermique : 50-70 kWh par 100 km (1 litre d'essence = 10 kWh environ)
- Voiture électrique : 15-20 kWh par 100 km

Cela donne pour 150'000 km effectuées durant le cycle de vie d'une voiture :

- Voiture thermique : 75'000-100'000 kWh
- Voiture électrique : 22'500 à 30'000 kWh

On constate que le moteur électrique (rendement environ 80%) est environ 2,5 fois plus efficace que le moteur thermique (20-30% de rendement). C'est le très grand avantage de la voiture électrique.

Ajoutons que le kWh électrique peut être produit localement (panneaux solaires photovoltaïques), ce qui n'est pas le cas du litre d'essence dans une voiture. Celui-ci doit être

extrait, raffiné et transporté. On compte que cela accroît l'énergie due au carburant de 15% pour les voitures à essence que l'on devrait ajouter dans le calcul ci-dessus.

Pour l'énergie de fabrication (appelée souvent énergie grise), différentes publications donnent des chiffres quelque peu différents et souvent plus grands pour les voitures électriques (importance de la batterie).

Pour les voitures thermiques respectivement électriques, retenons les chiffres suivants pour l'énergie de fabrication :

- 20'000 (petite voiture) à 40'000 kWh (SUV, >2 tonnes) pour les voitures thermiques
- 25'000 (petite voiture) à 45'000 kWh (genre Tesla, >2 tonnes) pour les voitures électriques, donc un peu plus important que pour les voitures thermiques
- Pour les voitures électriques, nous tenons compte que l'on doit remplacer les batteries à mi-vie de la voiture et qu'elles sont recyclées. Une législation de l'Union Européenne pour les batteries [5] se met en place (normes sociales et environnementales).
- L'énergie de fabrication par rapport au total est donc plus importante pour les voitures électriques (55%) que pour les voitures thermiques (25%), mais l'énergie totale est en gros deux fois plus petite pour les voitures électriques que pour les voitures thermiques.

Pour l'ensemble de l'énergie consommée sur un cycle de vie des voitures, on obtient donc la somme des énergies d'utilisation et de fabrication :

- 95'000 (petite voiture) à 115'000 kWh (SUV, >2 tonnes) pour les voitures thermiques
- 47'500 (petite voiture) à 75'000 kWh (genre Tesla, >2 tonnes) pour les voitures électriques

Cela fait une sérieuse différence entre les deux types de motorisation. Il faut néanmoins souligner que le poids de la voiture est un élément crucial. L'énergie de fabrication est en gros proportionnelle au poids. Mais l'énergie d'utilisation est aussi fortement dépendante du poids de la voiture. Donc une voiture « verte » ne peut pas peser plus de 2 tonnes !

La voiture électrique est « verte » si son poids est dans la fourchette inférieure (donc une Tesla ou un gros SUV électrique ne le sont pas). Et si l'électricité de recharge vient du renouvelable (hydraulique, solaire photovoltaïque), et si les batteries sont fabriquées en utilisant aussi du renouvelable et si elles sont recyclées. Néanmoins, il faut 400'000 litres d'eau pour fabriquer une voiture, et donc se passer de voiture sera toujours bien mieux (il faut quand même 300 à 600 litres d'eau pour fabriquer un kg d'acier).

Pour les émissions de carbone, on cite les chiffres de 10-20 gr CO₂/km pour la voiture électrique, et même un peu moins avec de l'électricité totalement renouvelable de panneaux solaires. C'est 95 gr CO₂ pour la voiture thermique, mais en Suisse, la moyenne est au-dessus de 130 gr/km. Donc la voiture électrique émet seulement le 30 % de CO₂ d'une voiture à essence sur toute sa durée de vie si le courant de recharge provient d'énergie renouvelable et si la voiture n'est pas trop lourde.

Dans [8], on indique qu'une voiture électrique va utiliser 58% de moins d'énergie durant son cycle de vie comparé à une voiture à essence et 64% de moins de CO₂.

3.2. Voitures hybrides (voir [5])

Il existe deux types de voitures hybrides, soit les non-rechargeables et les rechargeables. Hybride car elles sont équipées de deux moteurs, l'un thermique et l'autre électrique. En principe, elles sont vendues comme offrant le meilleur des deux motorisations. Or c'est loin d'être le cas, et il faut fortement recommander de ne pas acheter ce genre de véhicule [5]. D'une part en mode thermique, on traîne un poids supplémentaire non négligeable dû au moteur électrique (non utilisé) et à la batterie d'environ 8 à 15 kWh (50 à 100 kg). Et en mode électrique, c'est le poids du gros moteur thermique (non utilisé) qui rend la voiture beaucoup plus lourde que nécessaire.

D'autre part, selon [5], la quantité de CO₂ émise en conditions réelles est plus grande comparée à une voiture thermique de même catégorie. C'est dire que le mode électrique utilisé trop rarement n'arrive pas à compenser l'énergie supplémentaire due au poids accru de la voiture hybride. De plus, les mesures de CO₂ données par les fabricants sont outrageusement fausses de plusieurs facteurs car calculées comme si la voiture ne fonctionnait qu'en mode électrique.

De plus en plus de voitures hybrides rechargeables sont vendues. Dû à la complexité des deux motorisations, ce sont de grosses voitures de luxe ou de type SUV (donc plus chères que les petites voitures électriques).

Les voitures hybrides non rechargeables, avec un petit moteur électrique et une petite batterie (4 kWh), existent depuis plus de 10 ans avec les premières Prius. La batterie est uniquement chargée lors des freinages et des décélérations. Le moteur électrique vient en appoint au moteur thermique lorsqu'il faut accélérer. Donc c'est une voiture thermique qui n'a plus beaucoup d'intérêt. D'ailleurs, les dernières Prius sont hybrides rechargeables.

Concernant la pollution de l'air, les voitures hybrides sont aussi un mauvais choix [7]. On sait qu'un catalyseur à froid n'est pas du tout efficace (démarrage). Or le moteur à combustion en régime urbain est très souvent arrêté au profit du moteur électrique. Le moteur à combustion se refroidit, augmentant ainsi la production de polluants.

Ce choix est à rejeter.

3.3. Voitures à hydrogène ou piles à combustibles [6]

L'électro-mobilité avec stockage batterie a une efficacité environ trois fois supérieure à celle de la thermo-mobilité. En revanche le remplacement de la batterie par de l'hydrogène comprimé à 700 bars, produit par électrolyse et consommé par une pile à combustible dégrade fortement l'efficacité. Il faut consommer environ trois fois plus d'électricité (et venant de panneaux solaires) pour parcourir un kilomètre en voiture à hydrogène qu'avec une voiture électrique à batterie. Cela conduit à un gaspillage des surfaces et des métaux (Cuivre, Argent etc.) pour construire trois fois plus de centrales solaires, éoliennes et hydrauliques. Il faut donc davantage de mines dont l'impact environnemental n'est pas neutre.

En effet, pourquoi fabriquer de l'hydrogène par électrolyse (il faut de l'électricité), puis stocker cet hydrogène à très haute pression dans un réservoir très solide, puis reconvertir cet hydrogène en électricité pour faire avancer notre voiture. On comprend dès lors ce facteur 3 en efficacité énergétique par rapport aux voitures électriques, qui utilisent directement l'électricité produite par des panneaux solaires.

Le pronostic est que cette filière hydrogène ne va pas survivre face à l'arrivée des voitures électriques. D'ailleurs, dans [5], il y a 62 voitures électriques contre 2 voitures à hydrogène. Et les stations de recharge d'hydrogène en Suisse sont au nombre d'une dizaine environ.

3.4. Voitures au biogaz

Ce type de voiture est bien placé au point de vue environnement. Donc c'est une voiture thermique avec du carburant non fossile, puisque c'est du biogaz. Le mix suisse de gaz est aujourd'hui de 20% de biogaz.

Le problème est de trouver pas loin de chez soi une station délivrant que du biogaz, les stations de gaz (GNC) avec 20 % de biogaz étant fréquentes et distantes d'environ 30 km sur le plateau suisse, et bien implantées aussi en Allemagne et Italie (seule la France est peu équipée, obligeant temporairement l'utilisation du réservoir d'essence dont sont pourvus les véhicules à GNC). A noter que le meilleur véhicule thermique selon [5] fonctionne au gaz naturel.

Remerciements

A Olivier Neuhaus, Stefano Giamboni et Marie-Claire Pétremand pour leur lecture attentive et leurs propositions de clarification.

Bibliographie

[1] Guillaume Pitron, « La Guerre des Métaux rares », Ed. Les Liens qui Libèrent, 2018

[2] F. Sanchez, « Recyclage et réemploi des batteries », Association RECORD, rapport final 17-0915/1A, juillet 2019

[3] Claire Curry, « Lithium-ion Battery Costs and market », Bloomberg, July 5, 2017

[4] Laurent Horvath, « Le périlleux avenir des compagnies pétrolières » LE TEMPS, 25 février 2021, page 8

[5] « Evaluation des modèles de voitures », Revue Ecomobiliste, ATE Suisse, Mars 2021

[6] « [Air Liquide s'interroge à propos de la voiture électrique à batterie | Techniques de l'Ingénieur \(techniques-ingenieur.fr\)](#) »

[7] « Un danger invisible », Revue l'environnement, 1/2021, Office Fédéral de l'Environnement

[8] Lucien Mathieu and Cecilia Mattea, «From dirty oil to clean batteries », Transport & Environment (March 2021) www.transportenvironment.org