

## La fée électricité sous le capot ?

Quand on analyse les nouvelles motorisations proposées pour les véhicules on s'aperçoit vite qu'elles reposent pratiquement toutes sur l'emploi de moteurs électriques pour fournir l'énergie mécanique nécessaire mais différent sur la façon de produire ou de stocker cette électricité à bord du véhicule.

Benjamin Dessus

### De quoi s'agit-il ?

Quand on pense à la voiture électrique on a en général en tête une automobile qui fonctionne avec un moteur électrique à la place du moteur thermique et une transmission mécanique classique, mais dont le coffre est rempli de lourdes batteries. Bref un véhicule classique où l'on a simplement remplacé le moteur et le réservoir à essence par un moteur électrique et des batteries.

En fait l'introduction de l'électricité dans la traction d'un véhicule recouvre bien d'autres possibilités qui ont toutes en commun le recours à un moteur ou à plusieurs moteurs électriques pour fournir l'énergie mécanique nécessaire au véhicule.

C'est d'abord au niveau de la fourniture de l'énergie électrique aux moteurs que se distinguent les différentes filières selon que l'électricité est stockée dans le véhicule à partir d'une source fixe ou est fabriquée dans le véhicule lui-même à partir d'un combustible embarqué :

- véhicules électriques « classiques » dont les batteries sont rechargées à partir du réseau,
- véhicules qui brûlent du méthanol embarqué dans un réformeur qui fournit l'hydrogène nécessaire à une pile à combustible qui fournit à son tour l'électricité nécessaire au moteur de la voiture,
- véhicules « hybrides » à moteur thermique brûlant de l'essence ou du fuel associé à un alternateur qui fournit l'électricité nécessaire au moteur de la voiture,
- véhicules à pile à combustible alimentés par un stock d'hydrogène embarqué, lui-même obtenu par électrolyse ou reformage dans des installations fixes et distribué dans des stations service, etc.

Bien entendu, il existe de nombreuses combinaisons possibles de ces différentes façons de procéder, selon le programme de trajets prévu pour le véhicule, depuis le véhicule purement électrique sur batterie à faible autonomie jusqu'aux véhicules hybrides actuels qui peuvent utiliser les deux modes de traction (thermique ou électrique) en fonction des conditions des trajets (ville ou route) et disposent de l'autonomie que leur procure leur réservoir d'essence ou de fuel.

### Des avantages certains pour la chaîne de traction

Dans tous les cas, l'introduction d'un moteur électrique et d'une batterie dans la chaîne de traction présente deux intérêts :

- le premier est l'excellent rendement mécanique d'un moteur électrique (supérieur à 90 %) quel que soit le régime auquel il travaille. C'est un point important puisqu'on sait qu'un moteur thermique ne dépasse guère 40 % de rendement nominal et que ce rendement dépend très largement des conditions d'usage (démarrage à froid, accélérations brutales, ralenti, etc.).
- le second est la possibilité de récupérer l'énergie de freinage pour recharger partiellement la batterie du véhicule.

Si de plus, on parvient à placer les moteurs électriques directement sur les roues du véhicule pour les entraîner (« moteur roue »), on évite les frottements mécaniques qu'entraîne la transmission de l'énergie mécanique d'un moteur jusqu'aux roues (bielles, arbre de transmission, boîte de vitesse, différentiel, etc). Ces pertes sont de l'ordre de 10 % de l'énergie mécanique produite.

La traction électrique présente donc des avantages certains en termes d'efficacité, mais il faut évidemment vérifier qu'ils ne sont pas en partie perdus, en amont du moteur électrique, pour produire l'électricité et éventuellement la transporter et la stocker dans le véhicule.

### En amont du moteur électrique

C'est en amont du moteur électrique que le tableau s'inverse. Alors que la mise à disposition du carburant dans le réservoir d'une voiture s'effectue

avec un rendement de 80 à 85 % pour l'essence et de 85 à 90 % pour le diesel (en tenant compte des dépenses énergétiques d'extraction du pétrole, du raffinage et du transport jusqu'à la pompe), il en va bien différemment pour la mise à disposition de l'électricité nécessaire au véhicule à traction électrique.

### La voiture électrique

Dans le cas de la voiture électrique « classique », il faut produire l'électricité, la transporter, charger les batteries de la voiture et extraire de ces batteries l'électricité nécessaire au moteur électrique.

Toutes ces étapes comportent des pertes, souvent importantes comme le montre le tableau 1.

Les centrales électriques présentent des rendements de 30 à 60 % pour les filières thermiques qui brûlent un combustible (nucléaire 33 %, charbon, 35 à 40 %, fuel 40 à 45 %, gaz naturel 50 à 60 %). Les pertes de transport et de distribution d'électricité sont de l'ordre de 7 % pour un réseau moderne. Le rendement de charge et décharge des batteries est de l'ordre de 65 % pour les batteries actuelles et pourrait atteindre 70 à 75 % pour les nouvelles batteries.

**Tableau 1 : rendement global de la mise à disposition de l'électricité aux bornes du moteur d'une voiture électrique selon les filières de production d'électricité**

Filière	Rendement de Production	Rendement de Transport distribution	Rendement de charge et décharge des batteries	Rendement global
Nucléaire	30 - 35%	93%	65-75%	18 - 24%
Charbon	35 - 40%	93%	65-75%	21 - 28%
Fuel	40 - 45%	93%	65-75%	24 - 31%
Gaz naturel	50 - 60%	93%	65-75%	30 - 42%

### Les voitures à hydrogène

Elles utilisent à travers une pile à combustible de l'hydrogène embarqué et stocké dans le véhicule ou de l'hydrogène fabriqué à partir d'un carburant liquide, en général le méthanol, à bord même du véhicule.

#### L'hydrogène produit dans des installations fixes.

L'hydrogène peut être fabriqué par électrolyse mais avec un très mauvais rendement: de 15 à 25 % si l'on tient compte du rendement des usines de production d'électricité (voir tableau 1), de celui des électrolyseurs (inférieur ou égal à 60 %) de la compression et du stockage à bord du véhicule (de l'ordre de 75 %).

Mais on peut aussi le produire avec un meilleur rendement à partir de méthane dans des unités industrielles (75 %). Compte tenu de la compression et du stockage le rendement global de l'hydrogène à bord du véhicule est alors de l'ordre de 55 %.

**L'hydrogène produit à bord des véhicules.** On peut enfin produire l'hydrogène à bord même du véhicule par reformage de méthanol stocké à bord. Le rendement global de l'opération se situe dans la fourchette de 50 à 60 %.

### Les véhicules hybrides

Reste la possibilité d'alimenter le moteur ou les moteurs de la voiture électrique à partir d'une batterie elle-même chargée à bord par un alternateur entraîné par un moteur à essence ou diesel. C'est le principe sur lequel est fondé le véhicule hybride actuel (par ex. la Prius). Le rendement du groupe propulseur peut atteindre 40 % dans le meilleur des cas car cette solution permet d'utiliser le moteur thermique à sa puissance nominale où son rendement est maximum.

Le tableau 2 résume les résultats obtenus pour ces différents véhicules.

**Tableau 2 Fourchettes de rendements « du puits à la roue » des différents « véhicules non conventionnels susceptibles d’être mis sur le marché dans les 10 années qui viennent, et utilisés en cycle urbain**

	Rendement jusqu’au moteur	Rendement du groupe motopropulseur	Rendement total
Véhicule électrique à moteur central	18 à 42%	85%	15 - 36%
Véhicule électrique « moteur roue »	18 à 42%	95%	17 - 40%
Véhicule pile à combustible hydrogène compressé (électrolyse)*	15 à 25%	55%	8 - 14%
Véhicule pile à combustible hydrogène compressé (ex gaz naturel)*	55 à 60%	55%	30 - 33%
Véhicule pile à combustible ex méthanol*	50 à 60%	45%	22- 27%
Hybride essence 2005	80 à 82%	35 à 40% (cycle urbain)	28 - 33%

\* hypothèse : tous les véhicules à PAC sont équipés de « moteurs roues »

Ces rendements sont à comparer avec les rendements des filières de motorisation actuelles: autour de 17 % pour les moteurs à essence à injection modernes, et de 22 % pour le diesel injection directe « common rail ».

On voit sur ce tableau indicatif que les rendements énergétiques des différentes filières évoluent dans une large fourchette, de 8 % à 10 % pour la filière hydrogène ex-électrolyse quand l’électricité est produite à partir d’énergie nucléaire ou de charbon, jusqu’à 40 % pour la filière électricité directe, lorsque cette électricité est produite à partir de gaz naturel dans une centrale à cycle combiné. Mais cet avantage ne s’applique qu’à des véhicules de faible autonomie (de l’ordre de 100 à 150 km) et à délai de recharge élevé (plusieurs heures), qui sont limités à un usage en ville.

Il faut également observer qu’à l’exception notable du véhicule « moteur roue » électricité ex gaz naturel, les meilleures filières ne permettent que des gains, relativement modestes par rapport aux meilleurs diesels actuels (au maximum de 11 points), même s’ils restent souvent appréciables par rapport aux meilleures filières essence actuelles (jusqu’à 16 points).

Du point de vue des ressources énergétiques et de la sécurité d’approvisionnement en pétrole, la voie la plus prometteuse semble être l’usage direct d’électricité, soit dans des véhicules dont les missions sont réduites aux faibles déplacements soit à des véhicules possédant à la fois un moteur thermique et des batteries de capacité suffisante et susceptibles d’être rechargées sur le réseau électrique. Mais cela suppose bien entendu de disposer d’un réseau électrique et de moyens de production d’électricité suffisants.

### Les émissions de gaz à effet de serre

A partir du tableau 2 précédent, on peut aisément comparer les fourchettes d’émissions de gaz à effet de serre, engendrées par les différentes filières, par rapport à la filière la plus répandue aujourd’hui, la filière essence.

C’est l’objet du tableau 3 ci-dessous où la comparaison est effectuée par rapport à un véhicule type à essence censé émettre 130 grammes de CO<sub>2</sub> par km à l’échappement (5 litres au 100 km). Compte tenu des pertes de raffinage et de transport du carburant (de l’ordre de 15 %) un tel véhicule émet en fait de l’ordre de 150 g de CO<sub>2</sub> par km.

Filières automobiles	Emissions de CO2 (g/km) (compte tenu de l'amont du carburant)
Véhicule essence de référence (130g/km)	150 g
Diesel common rail	115g
Hybride essence	75g - 90 g
<b>Véhicule électrique classique :</b>	
Electricité Gaz naturel	50g - 70 g
Electricité Nucléaire ou renouvelable	5g - 10g
Electricité Charbon	125g - 165g
Mix électrique européen	48g - 68 g
<b>Véhicule électrique avancé (moteur roue)</b>	
Electricité Gaz naturel	45g - 63 g
Electricité Nucléaire ou renouvelable	4g - 9 g
Electricité Charbon	110g -150 g
Mix électrique européen	43g - 60 g
<b>Véhicule PAC hydrogène ex électrolyse</b>	
Electricité Gaz naturel	145 g
Electricité Nucléaire ou renouvelable	5g -10 g
Electricité Charbon	350 g
Mix électrique européen	140 g
<b>Véhicule PAC hydrogène ex méthanol</b>	75g ñ 90 g
<b>Véhicule PAC hydrogène ex gaz nat</b>	60g - 70 g

**Le rapprochement des deux tableaux précédents permet de mettre en évidence les points suivants :**

- La filière voiture électrique ex-gaz affiche les meilleurs performances combinées sur le plan de la préservation des ressources et des émissions de GES (rendement 40 %, émissions 45 à 70 g/km). A noter que même avec de l'électricité ex-charbon, elle n'engendre pas d'émissions plus importantes que la filière essence actuelle, ce qui met bien en relief l'avantage de rendement qu'apporte une motorisation électrique.
- Ensuite on trouve la filière PAC à hydrogène ex-gaz naturel qui combine une efficacité énergétique honorable (30 % à 33 %) et des émissions légèrement supérieures à la filière précédente de 60 à 70 g/km.
- Les véhicules hybrides à essence et PAC à hydrogène ex-méthanol à reformeur embarqué font jeu à peu près égal avec une efficacité énergétique de l'ordre de 30 % et des émissions de 75 à 90 g/km.

Par contre les filières PAC à hydrogène électrolytique, plombées par leur très mauvais rendements,

affichent de mauvaises performances d'émissions. L'exception nucléaire, où les émissions de CO2 sont évidemment faibles, se paye d'un très mauvais rendement énergétique et des différents risques associés à cette énergie. Cet inconvénient disparaît si l'électricité est produite par de l'hydraulique par exemple.

En Europe par exemple, l'introduction de véhicules électriques dans le parc partout où cela est possible, est de nature à diminuer sensiblement la pression sur l'approvisionnement en pétrole, puisque celui-ci ne contribue que marginalement à la production d'électricité (<10%), et à diminuer les émissions spécifiques de gaz à effet de serre des nouveaux véhicules d'un facteur 2, par rapport aux véhicules équivalents à essence et de 70 %, par rapport aux véhicules diesel.

L'introduction de véhicules hybrides, ou de véhicules PAC méthanol, est susceptible d'engendrer des économies de pétrole de 30 à 35 % par rapport au diesel actuel et de 40 % des émissions de CO2.

Ce rapide tour d'horizon montre qu'il existe encore des marges de progrès non négligeables en matière de nouvelles motorisations électriques. Elles seraient susceptibles, si elles parvenaient à

pénétrer sur le marché de façon massive, malgré de nombreuses contraintes de nature technique ou organisationnelles<sup>1</sup>, de permettre une réduction sensible des consommations unitaires de pétrole, une diversification des sources de carburants vers d'autres énergies fossiles, du nucléaire ou des renouvelables et une réduction des émissions CO<sub>2</sub>.

La combinaison de l'ensemble des progrès techniques décrits ci dessus pourrait au mieux se traduire, à terme de 35 à 40 ans, par une consommation équivalente moyenne mondiale des véhicules d'entrée de gamme de l'ordre de trois litres au cent km contre un peu plus de cinq aujourd'hui et une réduction des émissions spécifiques de CO<sub>2</sub> d'un facteur deux au grand maximum.

C'est évidemment loin d'être négligeable mais attire néanmoins plusieurs commentaires.

Il n'est pas inutile de rappeler qu'au début des années 80, sous la pression de la crise pétrolière, et avec un appui important des pouvoirs publics, la plupart des constructeurs (et par ex. en France Renault et Peugeot) avaient déjà mis au point des « voitures 3 litres » qu'elles se proposaient de commercialiser. Le contrechoc pétrolier a rendu caduc ce projet. Il est donc assez surprenant de

voir aujourd'hui réapparaître cet objectif comme l'aboutissement d'un long et coûteux processus, alors qu'il était acquis il y a plus de vingt ans<sup>2</sup>.

D'autre part, si l'on met en regard les effets potentiels maximaux du progrès technique que nous venons de décrire, à supposer qu'il se répande dans l'ensemble du monde avec la dynamique nécessaire pour que ses effets jouent à plein en 2050, ce qui est loin d'être acquis, on constate que ces effets sont loin d'être suffisants pour assurer une stabilisation des consommations de pétrole et, a fortiori, l'indispensable diminution des émissions de gaz à effet de serre que la croissance prévue des trafics automobiles risque d'entraîner<sup>3</sup>. L'AIE par exemple anticipe une multiplication par 2,2 du parc mondial de voitures individuelles d'ici 2030. Sans même compter les risques liés à la montée en gamme des véhicules que le monde pourrait connaître, si l'on en croit l'évolution constatée ces 20 dernières années, il n'est manifestement pas possible de se reposer sur le seul succès éventuel des percées technologiques potentielles, décrites plus haut, pour répondre aux défis que constitue la raréfaction du pétrole et le réchauffement climatique.



« La fée électricité » Raoul Dufy - 1937

1 - Parmi lesquelles la question du véhicule dédié à la seule ville, la création d'un réseau de recharge ou de recharge de batteries électriques, la distribution dans des stations service d'hydrogène sous pression etc.

2 - Les constructeurs automobiles répliquent que la puissance, le confort et la sécurité des véhicules actuels (beaucoup plus lourds que les prototypes 3 litres) sont sans commune mesure avec les véhicules 3 litres des années 80, ce qui est peut être vrai, mais pas forcément pertinent...

3 - Dans la plupart des scénarios les trafics automobiles mondiaux sont multipliés par un facteur supérieur à 4 en 2050 par rapport à 2005 (une croissance moyenne de 3,5 % par an), alors que le progrès technique envisagé ne permet qu'un gain d'un facteur inférieur à 2 à cette même date sur les émissions (1,6 % par an).