

## Entre batteries et hydrogène, quelle motorisation remplacera les moteurs thermiques ?

### Table des matières

<b>1. Du déclin des hydrocarbures à l'hydrogène .....</b>	<b>2</b>
<b>2. Comparaison entre hydrogène et carburants usuels.....</b>	<b>3</b>
2.1 Energie et CO2 rejeté.....	3
2.2 Rendement de la chaîne électrique avec des batteries. ....	4
<b>3. Les limites pratiques du choix.....</b>	<b>5</b>
3.1 La distribution de l'hydrogène .....	5
3.2 Limites de puissance des postes de recharge des batteries ! .....	5
<b>4. Comment sera produite l'électricité nécessaire aux véhicules ? .....</b>	<b>5</b>
<b>5. Conclusion.....</b>	<b>6</b>
<b>6. Annexe : Contenu énergétique de l'hydrogène et des carburants actuels. ....</b>	<b>6</b>

## 1. Du déclin des hydrocarbures à l'hydrogène

Nous déplacer en automobile, train, bateau ou avion implique d'emporter avec nous l'énergie nécessaire. Nos moyens de transport routiers privés ou publics, voyageurs ou marchandises consomment en France l'équivalent de plus de 40 Mt de pétrole sous formes d'hydrocarbures : essence, diesel, gaz de pétrole liquéfié (GPL), gaz naturel comprimé.

Limiter le rejet de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère implique de remplacer les carburants hydrocarbures par une énergie exempte de carbone : l'hydrogène ou l'électricité.

L'hydrogène est abondant sur terre : lié à l'oxygène dans la molécule d'eau ou lié au carbone dans les hydrocarbures, sa source à grande échelle actuelle. Une seule source d'H<sub>2</sub> demeure acceptable : l'eau, par électrolyse ou thermolyse ! Donc à condition d'avoir de l'électricité !

Il faudra produire l'électricité à partir de sources primaires exemptes de carbone :

- ⇒ Réacteurs nucléaires devenus économes en uranium,
- ⇒ Champs solaires photovoltaïques ou thermiques,
- ⇒ Fours solaires,
- ⇒ Parc d'éoliennes.

Le solaire et l'éolien sont intermittents.

il faut donc un « vecteur d'énergie stockable » : H<sub>2</sub> ou batteries ?



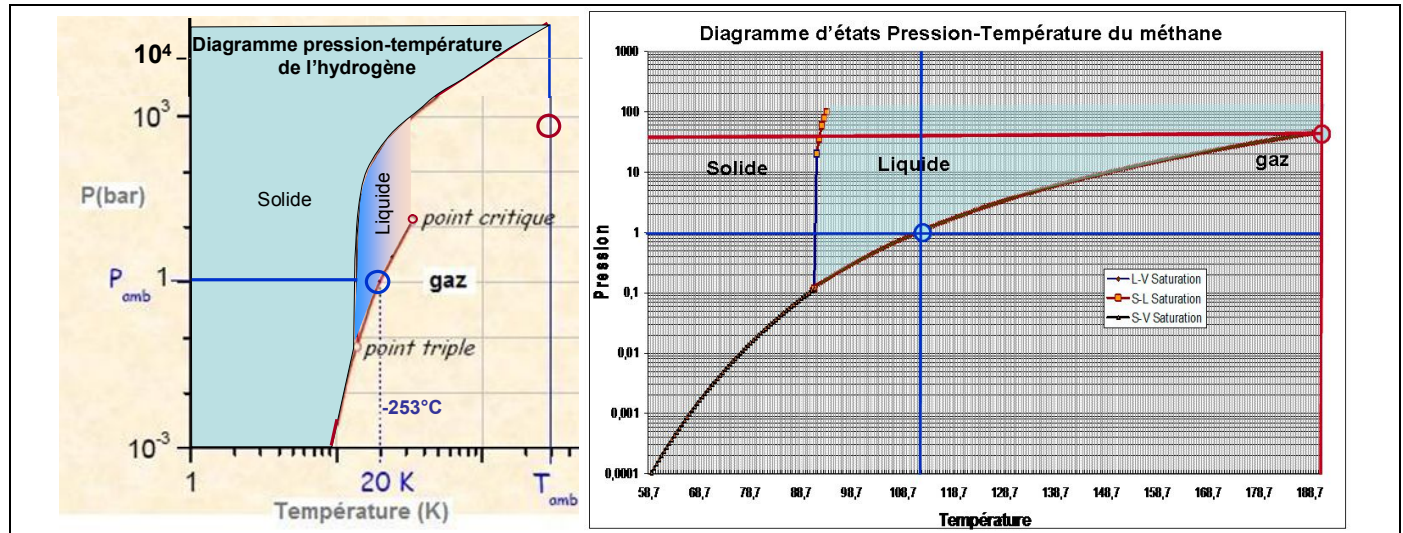
Nous savons :

- ⇒ fabriquer l'électricité sans CO<sub>2</sub> ;
- ⇒ la transporter ;
- ⇒ l'utiliser dans l'éclairage, les transports de passagers et marchandises guidés, les communications ; mais encore peu dans les réseaux diffus, dernier km par exemple ;
- ⇒ Électrolyser l'eau ;
- ⇒ Stocker l'électricité dans des batteries.

Mais, pour un besoin de longue durée, nous ne disposons pas encore de batteries de capacité massique et volumique suffisante

## 2. Comparaison entre hydrogène et carburants usuels

### 2.1 Energie et CO2 rejeté



Les conditions de stockage de l'hydrogène sont complexes :

CARBURANT	kWh/l	kg CO2 rejetés par litre de carburant consommé	kg CO2 rejetés par kWh
Hydrogène liquide à -253 °C	2,35	0	0
Hydrogène comprimé à 800 bars	1,48	0	0
Méthane comprimé à 500 bars	3,93	0,78	0,20
GPL	6,3 à 7,3	1,47	0,23 à 0,24
Essence	9,6	1,74	0,26
Diesel	10,2	2,45	0,26
Ethanol	5,9	2,70	0,26

L'énergie emmagasinée dans un réservoir de 60 l dépend du carburant :

L'hydrogène liquide à température ambiante contient 6 fois moins d'énergie au litre qu'un hydrocarbure.

Energie emmagasinée (réservoir de 60 litres)	Hydrogène comprimé (supercritique)	Méthane comprimé (supercritique)	Essence	Diesel	éthanol
kWh	89	236	576	613	353
% par rapport à l'essence	<b>15%</b>	<b>41%</b>	<b>100%</b>	<b>106%</b>	<b>61%</b>

Il faudrait donc un réservoir de 390 litres d'hydrogène pour emmagasiner la même quantité d'énergie que l'essence.

Energie emmagasinée utile dans un réservoir de 60 litres	Hydrogène gaz comprimé (supercritique)	Essence	Diesel
Hydrolyse générant de l'hydrogène	70%		
Chaîne de traction pile à combustible ou thermique	Pile + batterie + moteur	Thermique	Thermique
Rendement de la chaîne de traction	60%	30%	34%
kWh utiles	53,3	171,4	208,6
kWh utiles / kWh utiles essence	0,31	1,00	1,22

L'énergie utile est un peu moins du tiers de celle de l'essence, ce qui, à capacité de réservoir égale nécessite des pleins 3 fois plus fréquents, ou bien un réservoir d'hydrogène de 200 litres.

Le faible contenu est néanmoins compensé par le rendement de l'ordre de 45%

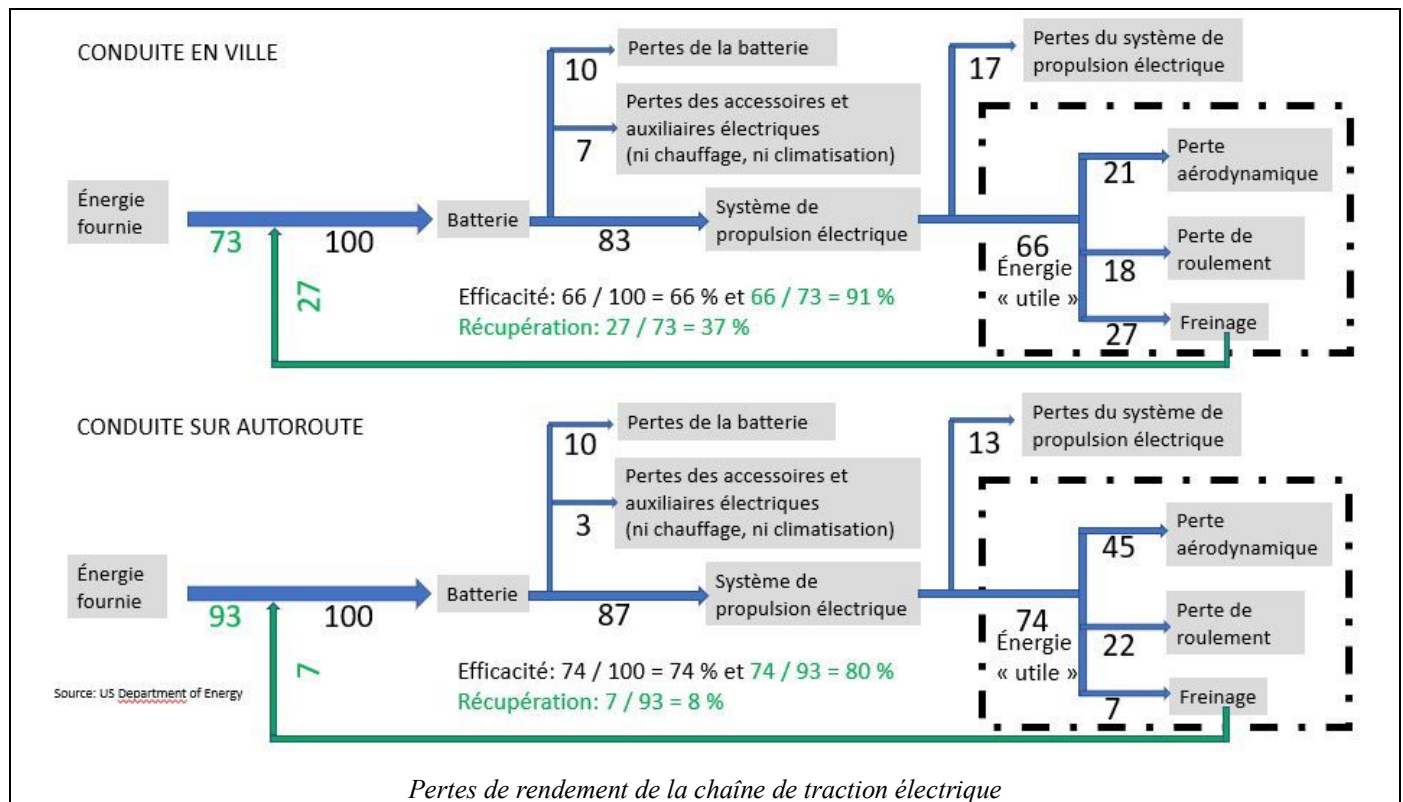
- ⇒ Pile à combustible (60 à 70%) ;
- ⇒ + Stockage intermédiaire en batterie (95%),
- ⇒ + moteur électrique (95%),
- ⇒ + organe de transmission aux roues (90%),

La chaîne cinématique thermique a un rendement entre 25 à 30 % :

- ⇒ moteur thermique (35%) ;
- ⇒ + boîte de vitesses (95%) ;
- ⇒ + pont (90%).

L'hydrolyse de l'hydrogène se fait avec un rendement de ~70%.

La chaîne globale de production d'énergie avec l'hydrogène a un rendement ~35% légèrement meilleur (1,4 fois) comparé à la chaîne de carburants (28%).



## 2.2 Rendement de la chaîne électrique avec des batteries.

En raison de leur principe différent (il s'agit d'une décharge, pas d'une réaction chimique), le rendement de la chaîne cinématique : Recharge + Pile + Moteur est nettement supérieur à la précédente. Cependant, une perte de 60% a été libérée en chaleur lors de la production de l'électricité (énergie secondaire) via un combustible (énergie

primaire) et un rendement sans intérêt et non évalué pour les énergies solaires et éoliennes puisqu'elles sont supposées gratuites. Mais si le combustible est nucléaire, il est très relativement très bon marché (0,5% du coût de l'énergie finale).

Admettons 70% à 80% (selon le type de recharge) soit 10% à 20% de plus qu'avec la pile à hydrogène.

Comparaison de l'énergie embarquée	Hydrogène gaz comprimé (supercritique)	Batterie
Chaîne de traction pile à combustible ou thermique	pile + batterie +moteur	batterie + moteur
kWh	89	89
Rendement de la chaîne de traction	43%	70%
kWh utiles	53,3	62,3
kWh utiles / kWh utiles essence	0,31	0,36

### 3. Les limites pratiques du choix

Aux limites du système embarqué le choix entre hydrogène ou batterie portera sur la commodité d'usage :

- ⇒ simplicité de la chaîne cinématique dans le cas de la batterie, mais temps de recharge en énergie long,
- ⇒ autonomie plus faible de la voie à l'hydrogène, mais plein rapide comme celui des hydrocarbures liquides, durée de vie comparée de la batterie et de la pile à hydrogène.

#### 3.1 La distribution de l'hydrogène

Les limites sont le volume possible des réservoirs entraînant la fréquence des pleins.

La non existence d'une chaîne de distribution.

Plus approprié aux flottes de véhicules (trains, poids lourds, bus, voire taxis) qu'aux voitures individuelles.

L'approvisionnement en hydrogène sous forme de gaz comprimé par réseau de gazoduc ou par citernes cryogénique est possible, bien que la quantité livrable par citerne cryogénique soit limitée à quelques tonnes (60 m<sup>3</sup> = 4200 kg d'hydrogène), alors qu'elle est continue par gazoduc.

#### 3.2 Limites de puissance des postes de recharge des batteries !

L'implantation de bornes de recharge électriques impliquera probablement un renforcement du réseau électrique :

- ⇒ Une batterie de 100 kWh en 10 h (charge lente) : *10 kW sous 220 V encore possible sur compteur dédié ;*
- ⇒ Une batterie de 100 kWh en 1 h : *100 kW impossible en 220 V et 400 V triphasé (500 A et 145 A).*

Donc : Alimentation de puissance pour les immeubles en moyenne tension (5,5 ou 20 kV) !!

Il en est de même des bornes domestiques, qui bien que moins puissantes (10 kW pour 100 kWh en 10h) seront nombreuses.

En amont la fourniture d'électricité primaire fera sans doute appel à un mixte d'électricité nucléaire, photovoltaïque et éolien, pour la recharge des batteries ou les électrolyseurs d'eau, accompagné du renforcement du réseau de distribution à haute et moyenne tension.

D'autres considérations pourront faire pencher la balance vers un système plutôt que l'autre :

- ⇒ la disponibilité et l'accès aux métaux catalyseurs de la pile ou constituant les électrodes et membrane de la pile,
- ⇒ facilité et coût d'implantation de la source d'énergie électrique primaire : centrale nucléaire, centrales photovoltaïques ou thermiques, éoliennes.

### 4. Comment sera produite l'électricité nécessaire aux véhicules ?

Il ne suffit pas de savoir distribuer l'énergie électrique en ville. Encore faudra-t-il la produire sans émissions de CO<sub>2</sub>. Ce n'est déjà plus le cas depuis 2020, puisqu'on doit recourir tous les jours (sauf en été) aux centrales à gaz pour compenser la consommation.

Faisons le bilan des besoins :

	Quantité	Energie	Facteur de charge	Puissance
<b>Consommation d'hydrocarbures par les transports</b>		45 Mt		
<b>Energie correspondante</b>		525 TWh		
<b>Chaîne hydrogène, de rendement 60%</b>		306 TWh		43 GW
<b>Soit, au choix : Réacteurs nucléaires de 1,6 GW</b>	27		80%	
<b>Panneaux solaires (1,5 fois la superficie de la Métropole)</b>	3750 km <sup>2</sup>		20%	
<b>Éoliennes de 2MW : Rangées espacées d'un km sur 1000 km de côte</b>	100.000 50		20%	

Il s'agit d'ordre de grandeur, toutes choses égales par ailleurs. Naturellement, un mix des solutions est probable<sup>1</sup>.

## 5. Conclusion.

Compte tenu des limites et du coût du système embarqué : pile + moteur ou batterie + moteur, l'avantage entre hydrogène ou batterie se portera sur :

- ⇒ la batterie pour sa commodité d'usage : simplicité de la chaîne cinématique,
- ⇒ mais le temps de recharge en énergie est long.

Alors que l'hydrogène

- ⇒ présente une autonomie plus faible,
- ⇒ mais permet des pleins aussi rapides que ceux des hydrocarbures liquides.

Le choix dépendra aussi de la longévité comparée de la batterie (en nombre de charges décharge) qui s'améliore et de celle des catalyseurs de la pile à hydrogène, très coûteux, qui se dégradent avec les impuretés de l'air ou de l'hydrogène.

D'autres considérations pourront aussi faire pencher la balance vers un système plutôt que l'autre :

- ⇒ la disponibilité et l'accès aux métaux catalyseurs de la pile ou constitutifs des électrodes ou de la membrane de la pile,
- ⇒ facilité et coût d'implantation de la source d'énergie électrique primaire : centrale nucléaire, centrales photovoltaïques ou thermiques, éoliennes.

Mais pour des raisons de rentabilité, il coulera encore bien d'eau sous les ponts avant que l'énergie hydrogène ait un intérêt pour d'autres usages que les flottes qui resteront encore longtemps lourdement subventionnées.

<sup>1</sup> Notons que le recours à 43 GW d'éoliennes, en sus des 16 GW actuels risqueraient de produire, en cas de vent soutenu plus que la consommation française (60 GW en moyenne actuellement). Il faudrait alors souvent pouvoir mettre leurs pales en drapeau pour déverser leur production et éviter de faire sauter le réseau électrique Français. Ceci réduirait encore le facteur de charge moyen des éoliennes. Autrement dit, l'accroissement du nombre d'éoliennes en France est devenu une solution techniquement inadaptée et économiquement ridicule (Note de Raymond JOUMARD). Concernant le nombre de réacteurs, rappelons qu'il faut 5 à 10 ans pour construire un EPR, mais la France a réussi à construire 30 REP en 30 ans.

## 6. Annexe : Contenu énergétique de l'hydrogène et des carburants actuels.

	Hydrogène liquide	Hydrogène gaz 20°C 1 atm*	méthane gaz 20°C 1 atm*	propane liquide	butane liquide	Essence	Diesel	éthanol
masse molaire g	2	2	16	44	58	142	214	46
enthalpie kJ/mole	241,8	241,8	802,6	2043,1	2657,3	6294,2		1235
enthalpie kJ/g	120,9	120,9	50,2	46,4	45,8	44,3	42,8	26,8
enthalpie kcal/g	28,9	28,9	12,0	11,1	11,0	10,6	10,2	6,4
masse volumique g/l	70,8	0,083	0,666	490	572	780	860	790
densité kWh/m <sup>3</sup>		2,79						
		Hydrogène gaz comprimé (supercritique)	Méthane gaz comprimé (supercritique)					
pression de service bar		800	500					
coefficient de compressibilité Z (état des gaz réels)		1,51	1,18					
volume molaire sous P et 20°C l/mole		0,045	0,057					
masse volumique H <sub>2</sub> et CH <sub>4</sub> sous P <sub>service</sub> g/l		44	282					
enthalpie kJ/l	8463	5329	14146	22753	26206	34574	36808	21210
énergie contenue par l de réservoir kJ/l	8463	5329	14146	22753	26206	34574	36808	21210
énergie contenue par l de réservoir MJ/l	8,46	5,33	14,15	22,75	26,21	34,57	36,81	21,21
énergie contenue par l de réservoir kWh/l	2,35	1,48	3,93	6,32	7,28	9,60	10,22	5,89

sources des données physiques : Perry's Chemical engineers Handbook 7<sup>th</sup> edition.