

Compte-rendu de la réunion du 15 avril 2019

Match batterie-hydrogène

1. Introduction

Jean-Alain TAUPY,
Animateur du Groupe IDées « Quels carburants pour demain ? »

Après une première session qui a permis de passer en revue les nouveaux carburants, le cycle 2018-2019 est consacré aux implications concernant la production de ces carburants et les mutations industrielles qu'impliquent les évolutions envisagées.

La réunion 4, du 15 avril, porte sur le choix d'une filière électrique, batterie ou hydrogène, à partir d'un retour d'expérience sur les poids lourds, notamment urbains, d'une comparaison des avantages et inconvénients des deux options dans le cas des véhicules légers et d'un bilan macro-énergétique.

Les contraintes imposées sur les véhicules sont de plus en plus fortes. Ainsi, à Londres a été créée une zone ULEZ (Ultra Low Emission Zone) avec des tarifs de péage très élevés pour les véhicules jugés polluants.

Les véhicules électriques et à hydrogène tendent à se banaliser, au point que des revues automobiles présentent à présent des comparaisons de leurs bilans respectifs du point de vue de l'utilisateur

Les supports des présentations de la réunion sont disponibles sur le site de la Fondation.

2. Retour d'expériences sur les Énergies nouvelles pour Bennes à Ordures Ménagères

Hubert GRANGÉ, Directeur Technique et Innovations Suez

Le Groupe Suez vise à accompagner les villes et les industries dans la gestion de l'eau, le recyclage et la valorisation des déchets.

Les poids lourds en contexte urbain et en particulier les Bennes à Ordures Ménagères (BOM), doivent faire face à un cadre réglementaire de plus en plus contraignant, défini par l'accord de Paris, la Stratégie Nationale Bas-Carbone, la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie et la loi Mobilité du 20 juillet 2018. Ces contraintes s'appliquent notamment aux émissions de CO₂. D'ici fin mai 2019, pour la première fois les émissions de CO₂ des poids lourds seront encadrées au niveau européen. Il est prévu une réduction de 15% de ces émissions d'ici 2025 par rapport aux niveaux de 2019 et de 30% d'ici 2030.

Les contraintes concernant la pollution locale (particules fines, dioxyde d'azote) se sont également durcies, avec l'application des normes EURO VI à partir de 2013.

De nombreuses villes ont introduit par ailleurs des Zones à Circulation Restreinte (ZCR), qui permettent de limiter la circulation de certains véhicules en fonction de leur qualification CRIT'Air, basée sur le niveau d'émission de polluants. Les véhicules



Quels carburants pour demain ?

Diesel et même les véhicules à essence pourraient être interdits à Paris d'ici 2024-2030.

Suez dispose dès à présent de 25 véhicules électriques BOM de marque PVI. Les véhicules actuels (moteurs AC, batteries Li-ion) permettent de collecter 30 t de déchets par jour en deux services, avec charge intermédiaire entre les services. Ils peuvent atteindre une vitesse de 70 km/h. Actuellement, le stade des préséries est atteint, avec de nombreuses annonces des constructeurs, notamment Volvo et Renault Trucks.

L'hydrogène représente la principale alternative, mais la commercialisation de véhicules est nettement moins avancée. Dans le cas des poids lourds, on en est au stade de la démonstration (e-Trucks Europe, Benelux, Faun, Allemagne). Pour développer cette option, il est nécessaire de déployer des stations. Le plan hydrogène prévoit 100 stations en France pour 2023. PVI (Renault) devrait bientôt proposer un PL équipé d'une pile à combustible Symbio, filiale de Michelin et Faurecia.

Le GNV représente une option beaucoup plus immédiate, avec des surcoûts limités et la possibilité d'utiliser du biogaz dans presque toutes les stations, avec un gain de 80% sur les émissions de CO₂ du « puits-à-la-roue ».

Enfin, le B100 produit par le groupe Avril à partir de grains de colza, autorisé en France depuis mars 2018 pour les flottes captives, permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre de 60% et de réduire les émissions de particules, pour les véhicules homologués par les constructeurs.

Ces différentes options présentent un ensemble d'atouts et de contraintes qui les rendent complémentaires les unes des autres.

3. Automobile du futur, le grand match FCEV vs. BEV

Eric TROCHON, AVL France

Deux grandes options sont actuellement envisagées pour l'automobile du futur. Toutes les deux reposent sur une propulsion électrique, mais l'énergie est stockée soit sous une forme électrochimique dans une batterie (véhicules BEV) ou sous forme d'hydrogène générant de l'électricité dans une pile à combustible - fuel cell (véhicules FCEV)

Les véhicules à batterie semblent actuellement bénéficier de la faveur de la plupart des grands décideurs. Volkswagen a présenté un argumentaire en faveur de la voiture à batterie, à la fois en termes d'énergie primaire consommée et de CO₂ émis. En fait, le match n'est pas encore joué et il est nécessaire de comparer ces deux types de solutions, point par point.

Il est possible tout d'abord de comparer des véhicules commerciaux, par exemple la Toyota Mirai (78 900 €, 5 kg H₂) et la Tesla (112 200 €, 100 kWh).

Il faut ensuite prendre en compte le temps de recharge, très rapide dans le cas de l'hydrogène, beaucoup plus long dans le cas de la batterie.

Si la consommation du véhicule électrique est de 200 Wh/km en moyenne, avec 100 kWh d'énergie stockée, l'autonomie est de 500 km. C'est autant que ce que la Toyota Mirai offre avec ses 5 kg d'hydrogène. Avec cette base de comparaison, le bilan est comparable.

Par temps chaud, la consommation du système de conditionnement d'air peut faire perdre jusqu'à un tiers de l'autonomie, de façon équivalente pour les deux types de véhicules. Par contre, par temps froid, le véhicule à batterie peut perdre jusqu'à 60% d'autonomie, tandis que le véhicule à hydrogène, dont la pile à combustible rejette de la chaleur, n'est guère affecté.



Quels carburants pour demain ?

Sur le plan du coût d'achat, il existe des différences notables selon le véhicule, mais il est difficile de prévoir un avantage déterminant sur l'un des deux types de véhicules d'ici 2040.

À l'usage, le coût de l'hydrogène reste élevé : 15 € le kg d'hydrogène certifié vert. Compte-tenu d'une consommation d'environ 1 kg pour 100 km, on arrive à un coût de 15 c, c'est-à-dire le prix du kWh électrique, avec lequel un véhicule électrique à batterie parcourt 5 km. Dans le cas du diesel actuel, pour un prix de 1,5 €/litre, on arrive à un coût de 9 c par km. Sur ce plan, l'hydrogène paraît clairement défavorisé.

En termes d'infrastructures, le véhicule à batterie est nettement mieux positionné, avec 25 000 stations contre à peine une vingtaine dans le cas de l'hydrogène. En Chine, l'écart est encore plus flagrant avec 200 000 stations de recharge électrique mais seulement 6 stations hydrogène. En outre, il est possible de recharger une voiture électrique à domicile, bien que cela pose des problèmes en logement collectif. Le nombre de stations hydrogène va augmenter. La France vise 400 à 1 000 stations d'ici 2028 et la Chine 3 000 d'ici 2030. Néanmoins, le véhicule à batterie reste nettement mieux placé.

Il faut aussi considérer le bilan environnemental. Actuellement, le bilan carbone d'une batterie est de 175 kg de CO₂ émis par kWh stocké, soit plus de 17 t pour une batterie de 100 kWh, c'est-à-dire plus qu'une voiture hybride ou diesel n'en produit sur 150 000 km. Le bilan peut être amélioré en construisant les batteries dans les pays où l'électricité a un faible contenu carbone, mais le principal fournisseur actuel reste la Chine. Sur ce point, l'avantage revient au véhicule à hydrogène, dont le réservoir et la plie à combustible ne représentent qu'environ 3 tonnes de CO₂ émis à la fabrication.

Le bilan carbone en fonctionnement, dépend fortement de la façon dont on produit l'électricité. Dans le cas d'un véhicule à batterie, on arrive à 20 g de CO₂ par km en France, mais 100 g aux États-Unis et 140 g en Chine. Ceci est à comparer à un niveau de 100 g de CO₂ émis dans d'un hydrogène produit à partir de gaz naturel, niveau voisin de celui que l'on obtient dans le cas d'un véhicule Diesel récent. En utilisant de l'électricité à bas carbone, ce niveau peut être fortement abaissé.

Une batterie nécessite d'importantes quantités de matériaux et de métaux rares. Dans le cas de la pile à combustible, le principal problème est celui du platine. On peut réduire la quantité de platine utilisée, mais on ne peut descendre au-dessous d'une quantité minimale. Or, le platine est très coûteux et les ressources sont limitées.

Le recyclage des matériaux reste difficile. Les batteries utilisées pour les véhicules peuvent trouver une seconde vie comme batteries stationnaires, mais ce n'est qu'un palliatif temporaire.

Enfin un dernier critère important concerne l'appel en énergie et en puissance. Pour un parc de 25 millions de véhicules à batterie, l'énergie annuelle consommée représente 100 TWh soit 19% de l'énergie électrique produite en France en 2017. Dans le cas de l'hydrogène, on arriverait à un montant trois fois supérieur, qui paraît impossible à satisfaire.

L'appel en puissance pourrait aussi devenir problématique. Si 1 million de conducteurs veulent recharger en une demi-heure leurs batteries de 100 kWh, la puissance appelée est de 200 GW, soit davantage que la capacité du réseau EDF (130 GW). Avec l'hydrogène, à condition de pouvoir le stocker, on n'est plus confronté au même problème.

Au total, le bilan des avantages et inconvénients pour les deux filières est comparable, avec un léger avantage pour l'hydrogène en « nombre de points ». Clairement, les deux technologies vont cohabiter et parfois fusionner. Tout dépend de



l'usage : intensif (taxi, camion, bus), domicile-travail, polyvalent. Il faut développer l'infrastructure de recharge pour les deux dès maintenant sans attendre 2040.

4. Aspects macro énergétiques à prendre en compte lors du choix d'un vecteur pour les transports terrestres : électricité ou hydrogène.

Gilbert CAZENOBE, Chef de projets – Orano Projets

En augmentant la capacité de la batterie, on arrive à couvrir une part de plus en plus importante des déplacements.

Depuis plus d'un siècle, malgré tous les changements intervenus, la consommation d'énergie électrique à bord rapportée à la masse du véhicule de 110 Wh/t.km demeure conservée.

Dans ces conditions, si tous les véhicules, y compris poids lourds devenaient électriques (en supposant levés les obstacles), on arriverait à une consommation de 198 TWh (à la centrale électrique), les véhicules automobiles privés représentant environ la moitié de ce total.

En France, on émet actuellement 75 g de CO₂/kWh. Ceci conduit à 20 g de CO₂/km pour un véhicule à comparer à 128 g pour l'ensemble des véhicules neufs en 2011.

Sont raisonnablement accessibles à l'électrification 31,5 millions de véhicules privés et 3,8 millions de véhicules utilitaires. Si tous ces véhicules étaient remplacés par des véhicules électriques, l'énergie consommée à la centrale serait de 127 TWh, soit 23% des 550 TWh produits en 2018 et les émissions de CO₂ s'élèveraient à 9,6 Mt.

Actuellement on dispose de 30 à 60 TWh de « manque à produire » du parc nucléaire. Ceci permettrait d'assurer la quasi-totalité des déplacements de proximité (≤ 100 km). Reste le problème de l'appel en puissance qui atteint 3 GW pour la charge simultanée de un million de véhicules. Il faut donc assurer une coordination intelligente entre le véhicule, le réseau de distribution local et le réseau de transport (RTE). Les solutions existent et sont installées, il faut les mettre en œuvre.

Dans le cas du véhicule à hydrogène, parmi les points positifs, il faut noter que l'on ne transporte ni l'oxygène consommé ni l'eau produite, mais par contre, il faut tenir compte des fuites inévitables d'hydrogène à toutes les étapes, hydrogène qui est irrémédiablement perdu. Les très faibles réserves mondiales en platine limitent l'application aux cas où la batterie serait irréalisable.

L'énergie théoriquement stockée est de 33 Wh/kg d'hydrogène. Mais pour produire 1 kg d'hydrogène par électrolyse, il faut dépenser 55 kWh/kg, auxquels s'ajoute l'énergie nécessaire pour le comprimer à 700 bars, ce qui conduit à une dépense énergétique totale de 61,3 kWh/kg.

La pile à combustible restitue 22 kWh/kg d'hydrogène. La consommation constatée est de 1 kg/100 km (taxis Hype de 2t), ce qui correspond à une consommation à bord de 220 Wh/km, cohérente avec le chiffre de 110 Wh/t.km.

Mais la consommation électrique à la centrale s'élève à 630 Wh/km, à comparer aux 247 Wh/km d'un véhicule à batterie soit 2,6 fois plus.

Les hydrocarbures importés représentent une dépense annuelle de 80,5 G€ à comparer avec les investissements nécessaires pour déployer les véhicules électriques.

L'hydrogène est particulièrement intéressant pour les poids lourds, les avions et les bateaux. Les distances parcourues d'une seule traite sont considérables et ces moyens de transport sont utilisés presque en permanence. La faible masse de l'hydrogène par unité d'énergie (45,3 kg/MWh) permet de réduire considérablement



Quels carburants pour demain ?

la masse embarquée, au moins lorsque l'hydrogène est stocké sous forme liquide à la pression atmosphérique. La masse de la pile à combustible intervient proportionnellement à la puissance de croisière et non à l'énergie.

En conclusion, en dépit des avantages en termes de réduction des importations de produits pétroliers et d'émissions de gaz à effet de serre, les obstacles à la pénétration des deux types de produits demeurent nombreux. Les différents acteurs (producteurs, État, opérateurs de réseau, utilisateurs) doivent parvenir à s'adapter. De ce fait, la transition vers le véhicule électrique, qu'il soit à batterie ou à hydrogène sera longue inévitablement.

5. Discussion / Conclusions

Débat animé par Jean Alain TAUPY et Philippe-Henri LEROY

Réseaux et distribution

Les véhicules à batteries posent des problèmes d'appel en puissance. Ne faudrait-il pas faire davantage appel aux réseaux gaz, pour transporter, soit de l'hydrogène, soit du méthane de synthèse (Power to Gas) ?

Le problème est avant tout économique. Le transport de gaz est coûteux. En outre dans le cas de l'hydrogène on est confronté aux fuites d'hydrogène et aux risques entraînés en termes de sécurité.

Dans le cas du véhicule à batterie, on pourrait envisager de développer un réseau de recharge à induction, mais dans ce cas également se pose la question des investissements nécessaires.

Consommation d'énergie

Les présentations ont fait apparaître les bilans énergétiques pour les deux filières, véhicules à batterie et véhicules à hydrogène. Il faut noter toutefois que les gains en termes de consommation dus à l'amélioration de l'efficacité ou des coûts moindres liés à l'utilisation d'une énergie moins coûteuse peuvent être compensés par une augmentation du trafic et des distances parcourues.

L'hydrogène peut être éventuellement produit au niveau de la station, mais avec des coûts relativement élevés (4 M€ station hydrogène avec production), à comparer à un coût de 50 000 à 150 000 € pour une borne de recharge rapide.

Carburants de synthèse

L'utilisation de carburants de synthèse à partir d'hydrogène et de CO₂ recyclé permettrait de conserver les infrastructures actuelles.

Une telle filière présente néanmoins des inconvénients sérieux : renvoi à l'atmosphère de CO₂ capturé au préalable, investissements importants, pertes de rendement, maintien d'émissions de polluants tels que NO_x.

Il est envisageable de faire fonctionner une pile à combustible avec un carburant liquide, notamment un alcool, mais le méthanol est toxique et l'éthanol peu réactif et difficile à utiliser.