

# « TRANPLHYN » TRANSPORTS LOURDS FONCTIONNANT A L'HYDROGENE

---

Note de synthèse

---

Juin  
2022



EXPERTISES

# REMERCIEMENTS

IFPEN et l'ADEME remercient pour leurs conseils toutes les personnes qui ont aidé à la réalisation de cette étude, à IFPEN, à l'ADEME et dans les entreprises qui ont été contactées. Nous remercions en particulier Jean- Jean-Marc BOUCHERET (IVECO BUS), Steve GIGUET (IVECO) et Marc NEVEU (Renault Trucks).

## CITATION DE CE RAPPORT

LOSZKA Mickaël, MARTIN Rebecca, GUYON Olivier, LEDUC Pierre, IFP Energies nouvelles. 2022. « TranpLHyn » Transports lourds fonctionnant à l'hydrogène – Note de synthèse. 16 pages.

Cet ouvrage est disponible en ligne <https://librairie.ademe.fr/>

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

### Ce document est diffusé par l'ADEME

**ADEME**

20, avenue du Grésillé

BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 2166D0025

Étude réalisée par IFPEN pour ce projet cofinancé par l'ADEME



Projet de recherche coordonné par : Pierre LEDUC, IFP Energies nouvelles

Coordination technique - ADEME : Denis BENITA

Direction/Service : Transports et Mobilité

# SOMMAIRE

RÉSUMÉ .....	4
ABSTRACT .....	5
1. CONTEXTE ET OBJECTIFS .....	6
2. METHODOLOGIE ET PRINCIPALES HYPOTHESES .....	7
3. VOLET ENERGETIQUE – CONSOMMATION ET AUTONOMIE.....	9
4. VOLET ECONOMIQUE – COUT TOTAL DE POSSESSION (TCO) .....	11
5. VOLET ENVIRONNEMENTAL – EMISSIONS DE GAS A EFFET DE SERRE (GES).....	13
6. CONCLUSION .....	14
SIGLES ET ACRONYMES .....	16

## RÉSUMÉ

Cette étude s'inscrit dans la stratégie française pour le développement de la filière hydrogène. Elle vise à évaluer et comparer la pertinence énergétique, économique et environnementale des deux modes d'utilisation possible de l'hydrogène pour la mobilité routière : son utilisation dans une pile à combustible (PàC), d'une part, ou sa combustion dans un moteur thermique, d'autre part.

Quatre types de véhicules sont étudiés : le poids lourd 44 tonnes, le bus articulé de 18 mètres, l'autocar régional et la pelle sur chenilles de 75 tonnes. Ces engins consomment de grandes quantités d'énergie et requièrent souvent des temps de ravitaillement rapides, besoins difficiles à satisfaire avec un véhicule électrique à batterie. L'usage de l'hydrogène comme substitut aux carburants fossiles ou à la batterie peut être une solution.

L'évaluation de la consommation de combustible des quatre types de véhicules est effectuée sur différents cycles d'usage. Des variations paramétriques (puissance de la PàC ou du moteur thermique dans le cas d'une motorisation hybride, capacité énergétique de la batterie) permettent d'évaluer l'impact du dimensionnement du groupe moto-propulseur sur la consommation. On constate que les véhicules équipés d'une PàC sont plus économes en énergie – de 10 à 40% environ – que ceux mus par un moteur à combustion d'hydrogène. Les résultats sont présentés pour un usage donné, mais les résultats détaillés fournis en annexe permettront au lecteur d'évaluer d'autres usages, par ajustement des pondérations proposées. Les valeurs de consommation alimentent ensuite en données les études économiques et environnementales.

L'évaluation économique se base sur l'indicateur TCO (Total Cost of Ownership) et agrège les différents postes de coûts. Des analyses de sensibilité sur les paramètres clé de l'évaluation – prix de l'hydrogène, durée de vie véhicule, notamment – sont présentées. Il en ressort que le passage à l'hydrogène entraîne une multiplication du TCO par 1,5 à 3 pour les quatre véhicules évalués par rapport à la configuration Diesel de référence. On note un léger avantage de TCO pour la motorisation thermique à hydrogène par rapport à la PàC, le coût élevé d'investissement dans la PàC n'étant pas compensé par la baisse de la consommation de combustible. Les principales voies de réduction de l'écart de TCO avec la configuration Diesel sont la baisse du prix de l'hydrogène et de la PàC, tandis que l'amélioration des rendements du moteur thermique et de la PàC semblent avoir un effet limité sur le TCO. Les aides à l'achat proposées aujourd'hui apparaissent bien en deçà de l'effort d'investissement que requiert le passage à un véhicule à pile à combustible actuellement.

L'évaluation environnementale se base sur la méthodologie de l'analyse de cycle de vie (ACV) et compare les émissions de gaz à effet de serre (GES) des solutions à hydrogène pour deux types de véhicules : le poids lourd et le bus articulé. Il s'avère que les véhicules à hydrogène ont un impact significativement plus faible que les véhicules Diesel, et que les impacts liés à la production d'hydrogène représentent la majeure partie des émissions de GES sur leur cycle de vie. Cela favorise les véhicules à pile à combustible, qui présentent de plus faibles consommations d'hydrogène que les véhicules thermiques. L'utilisation d'hydrogène renouvelable permet de diviser encore par deux les émissions GES du cycle de vie des véhicules PàC ou thermique à hydrogène, en comparaison de l'utilisation d'hydrogène bas carbone, obtenu par électrolyse avec le mix électrique français.

## ABSTRACT

This study falls within the French strategy for the development of the hydrogen branch. Its aim is to evaluate and compare the use of hydrogen in a fuel cell or in an internal combustion engine (ICE), by considering energetic, economic, and environmental criteria.

Four vehicle types have been studied: the 44-ton long-haul delivery truck, the 18-meter articulated urban bus, the 12-meter regional coach and the 75-ton crawler excavator. These machines consume a great amount of energy and often require refueling to be completed in a relatively short time, which is rather difficult to ensure for battery electric vehicles. The use of hydrogen as a substitute to fossil fuels and batteries can be a solution.

The fuel consumption evaluation of the four types of vehicles has been performed on various duty cycles. Parametric variations (fuel cell rated power, battery capacity) enable to evaluate the impact of powertrain sizing on fuel economy. It is observed that fuel cell electric vehicles (FCEVs) need between 10% and 40% less energy than those equipped with a hydrogen ICE. The results in this report are provided for a given usage, but detailed results in the appendix allow the reader to adjust weighting factors to fit a particular usage. Energy consumption values are inputs for the economic and environmental analyses.

The economic evaluation is based on the Total Cost of Ownership (TCO) calculation, which aggregates a range of cost items. Sensitivity analyses on key parameters such as hydrogen price and vehicle lifetime, for instance, are presented. The outcome is that switching to hydrogen entails a multiplication of the TCO by 1.5 to 3 for the four vehicles considered, compared to the Diesel reference. There is a slight advantage for the hydrogen ICE compared to the fuel cell in terms of TCO, because the higher energy efficiency of the fuel cell does not compensate for the higher investment it requires. The main pathways towards reducing the cost gap between hydrogen and Diesel vehicles are the decrease of hydrogen and fuel cell stack prices, while efficiency improvement of the hydrogen ICE and the fuel cell seems to have a limited impact on TCO. Current purchase incentives in France appear to be far lower than the investment effort needed in order to switch to a fuel cell electric vehicle.

The environmental evaluation follows the life cycle assessment methodology and gives a comparison of greenhouse gases (GHG) emissions for two vehicle types: the long-haul truck and the articulated urban bus. The results show that hydrogen-powered vehicles have a significantly lower impact than Diesel-powered vehicles, and that hydrogen production is the main contribution to GHG emissions on these vehicles' life cycle. This observation favors FCEVs because of their lower hydrogen consumption compared to hydrogen ICEVs. The use of renewable hydrogen enables to at least halve GHG emissions over the life cycle of hydrogen-powered vehicles compared to low-carbon hydrogen produced by electrolysis using the French electricity mix.

# 1. Contexte et objectifs

---

Pour réduire les émissions de gaz à effet de serre et de gaz polluants liées au secteur du transport, des filières énergétiques alternatives aux carburants fossiles ont été développées durant les dernières décennies. L'énergie électrique et son écosystème dédié à la mobilité en font partie et promettent un bilan carbone réduit, moyennant des modes de production de l'électricité peu émetteurs de gaz à effet de serre. Ainsi, les véhicules électriques s'imposent petit à petit dans les réglementations de nombreux pays, notamment européens. C'est le cas de la France où l'Etat prévoit des aides spécifiques à l'achat de ces véhicules, en moyenne plus coûteux que les véhicules à moteur à combustion.

En matière de décarbonation du transport, le véhicule à batterie est très efficace énergétiquement et doit donc être privilégié dès lors que son usage répond au besoin de l'utilisateur. Mais pour les usages intensifs ou gros consommateurs d'énergie, le véhicule à batterie peut s'avérer inadapté, en raison d'une autonomie insuffisante ou d'un temps de charge incompatible avec les besoins du service.

En particulier, pour des véhicules lourds, et donc énergivores, la taille et la masse des batteries peuvent rapidement excéder plusieurs tonnes. Cela devient problématique lorsque la raison d'être du véhicule est de transporter de la marchandise ou des passagers, par exemple. Le temps de recharge est également un point de tension, car plus la batterie est capacitive, plus son temps de recharge est élevé, ce qui réduit la disponibilité des véhicules.

L'hydrogène peut constituer une alternative aux batteries massives pour le stockage de l'énergie nécessaire à l'avancement des véhicules électriques. Il peut en effet être transformé en énergie électrique au sein d'un véhicule, par l'intermédiaire d'une pile à combustible embarquée (« PàC » ou « FC », pour *Fuel Cell* en anglais). L'énergie électrique alimente alors un moteur électrique produisant l'énergie mécanique assurant le déplacement du véhicule, comme sur un véhicule à batterie. Le vecteur énergétique hydrogène prend une place croissante parmi les solutions envisagées pour décarboner l'industrie et le domaine du transport.

L'utilisation de l'hydrogène dans le transport ne se limite pas au stockage d'énergie pour des chaînes de traction électriques, et une deuxième voie technologique pour la propulsion est également possible. L'hydrogène étant un très bon combustible, il est en effet possible de le brûler dans un moteur, selon un procédé similaire à la combustion des carburants fossiles. Dans ce cas, l'énergie chimique de l'hydrogène est transformée directement en énergie mécanique, via le moteur à combustion.

L'objet de la présente étude TranpLHyn – Transports Lourds fonctionnant à l'Hydrogène – est d'établir une comparaison entre ces deux modes de propulsion à hydrogène sur les plans énergétique, économique et environnemental. Quatre véhicules ont été choisis car il semble difficile de les envisager aujourd'hui, en utilisation intensive, dans des configurations de véhicule à batterie, vu leur consommation élevée d'énergie :

- le poids lourd long routier de 44 tonnes,
- le bus urbain articulé d'une longueur de 18 mètres,
- le car régional de 12 mètres,
- et la pelle sur chenilles de 75 tonnes.

Chacune de ces quatre applications est évaluée sur la base d'un fonctionnement avec une pile à combustible à hydrogène de type à membrane échangeuse de protons (« PEM »), d'une part, et avec un moteur à combustion interne d'hydrogène, d'autre part. Le cas de la motorisation hybride thermique-électrique est également abordé. Pour chaque engin, un usage moyen est défini pour servir la comparaison.

La présente note de synthèse accompagne 3 autres livrables de l'étude :

- un rapport d'étude (format « .pdf » d'une cinquantaine de pages, accompagnées d'une cinquantaine de pages d'annexes) ;
- une présentation de synthèse (format « .ppt » d'une vingtaine de planches) ;
- une présentation détaillée (format « .pdf » d'une centaine de planches).

Il est à noter que le rapport d'étude contient des tableaux de résultats exhaustifs permettant, si besoin, au lecteur d'extrapoler les calculs effectués dans l'étude TranpLHyn à d'autres usages, en utilisant d'autres pondérations que celles choisies dans l'étude

## 2. Méthodologie et principales hypothèses

---

La méthodologie et les principales hypothèses retenues pour aborder les trois volets de l'étude – énergétique, économique et environnemental – sont résumées dans cette partie.

L'analyse énergétique vise principalement à déterminer la consommation d'énergie et l'autonomie des véhicules. Elle est réalisée avec l'outil de simulation numérique Simcenter Amesim® dans lequel les 4 véhicules de l'étude ont été modélisés. L'évaluation énergétique est ensuite effectuée en faisant parcourir à ces 4 véhicules simulés différents profils de mission. Les profils retenus correspondent à des cycles de conduite normalisés et à des missions réelles sur des trajets choisis (par exemple Paris-Lille ou Lyon-Milan pour le poids lourd). La consommation d'hydrogène considérée ensuite pour les évaluations économique et environnementale correspond à la consommation calculée sur des cycles normalisés :

- pour le poids lourd : pondération de 3 cycles VECTO<sup>1</sup> (*Urban Delivery, Regional Delivery, Long-haul Delivery*), chaque cycle étant calculé d'abord camion vide (sans fret), puis avec une charge de 19,3 tonnes. Le chiffre de consommation final est une pondération des 6 valeurs obtenues.
- bus articulé : pondération des consommations calculées sur le cycle VECTO *Urban* pour 3 charges en passagers (0, 80 et 160 passagers).
- autocar régional : pondération des consommations calculées sur le cycle VECTO *Interurban* pour 3 charges en passagers (0, 30 et 60 passagers).
- pelle sur chenilles : dans ce cas particulier, nous avons défini un cycle « Dig and Dump » (simulant un mouvement de remplissage du godet puis de rotation de la tourelle sur 90° avant de vider le godet puis retour à la position initiale)<sup>2</sup>.

Les groupes moto-propulseurs (GMP) des 4 véhicules sont déclinés en plusieurs architectures, elles-mêmes déclinées en plusieurs variantes. Les architectures retenues sont du type à moteur thermique (Diesel d'une part, en tant que référence, et à hydrogène d'autre part), électrique à pile à combustible en combinaison avec une batterie et, dans certains cas, hybride thermique-électrique. Les variantes font référence à des variations des caractéristiques macroscopiques des organes du GMP, telle que la puissance pour un moteur thermique ou une pile à combustible, ou l'énergie embarquée pour une batterie de traction.

Sur les figures qui suivent, les variantes sont désignées par exemple de la manière suivante :

- « MTH-350 MEL-65 BAT-25 » pour un groupe moto-propulseur hybride composé d'un moteur thermique de 350 kW, d'un moteur électrique de 65 kW et d'une batterie de 25 kWh ;
- ou encore « FC-225 BAT-75 » pour un ensemble composé d'une pile à combustible de 225 kW et d'une batterie de 75 kWh.

Une hypothèse importante concerne le rendement des convertisseurs d'hydrogène. Deux hypothèses de rendement pic pour la courbe de rendement du système pile à combustible ont été retenues : l'une à 55% de rendement pic, l'autre à 65% de rendement pic. La cartographie du moteur à combustion interne d'hydrogène présente un rendement pic de 44%. Une variante à rendement pic de 50% a également été considérée<sup>3</sup>. Les rendements les plus élevés pour chaque solution peuvent être considérés comme des asymptotes à moyen-long terme, bien que dans le domaine du véhicule léger on trouve déjà sur le marché des systèmes PàC présentant des rendements de l'ordre de 65%.

Pour le poids lourd, des batteries de 25, 50, 75 et 100kWh ont été considérées. Pour le bus et l'autocar, des batteries de 25, 50, 100 et 150kWh ont été considérées. Pour la pelle sur chenilles, une batterie tampon de 25kWh a été retenue pour l'ensemble des variantes.

---

<sup>1</sup> Les abréviations et acronymes sont définis à la fin de cette note de synthèse.

<sup>2</sup> Similaire à un des cycles proposés par la JCMAS (Japan Construction Mechanization Association).

<sup>3</sup> Le choix de ces hypothèses est étayé dans le rapport d'étude.

Pour ce qui concerne le volet économique, l'étude s'attache à évaluer le coût total de possession des véhicules (TCO) dans les situations suivantes :

- poids lourd : calcul du TCO sur 12 ans, en considérant 90 000 km parcourus par an ;
- bus articulé : 12 ans, 40 000 km/an ;
- autocar : 8 ans, 60 000 km/an ;
- pelle sur chenilles : 5 ans, 2000 heures d'utilisation par an<sup>4</sup>.

Au coût d'achat du véhicule, on soustrait les aides à l'achat éventuelles<sup>5</sup>, puis on ajoute le prix du carburant consommé, les frais de maintenance et d'assurance et éventuellement le coût associé au remplacement de la pile à combustible et de la batterie pour les architectures concernées<sup>6</sup>. L'ensemble du TCO est actualisé à un taux de 5%, et le taux d'inflation est fixé à 0 (calcul en euros constants).

Dans le calcul du TCO, la consommation d'énergie représente un poste très important. Les hypothèses retenues sont<sup>7</sup> :

- Gazole : 1,00 €/L (HT) en 2022, et augmentation régulière pour atteindre 1,41 €/L en 2033.
- Electricité : 130 €/MWh en 2022 puis hausse linéaire d'ici 2034 pour atteindre un prix de 160 €/MWh.
- Pour l'hydrogène, trois types d'hydrogène sont considérés (figure 1) : de l'hydrogène « carboné » produit par vaporeformage du méthane, et deux types d'hydrogène « renouvelable » produits par électrolyse de l'eau avec de l'électricité renouvelable (éolien terrestre). L'hydrogène renouvelable dit « local » correspond à un schéma où de petits électrolyseurs sont situés aux stations de recharge. Les volumes produits sont faibles mais il n'y a pas de coût de transport. Le second schéma correspond à l'hydrogène renouvelable dit « central », où l'hydrogène est produit sur de gros électrolyseurs puis distribué vers les stations de recharge à quelques dizaines de kilomètres à la ronde.

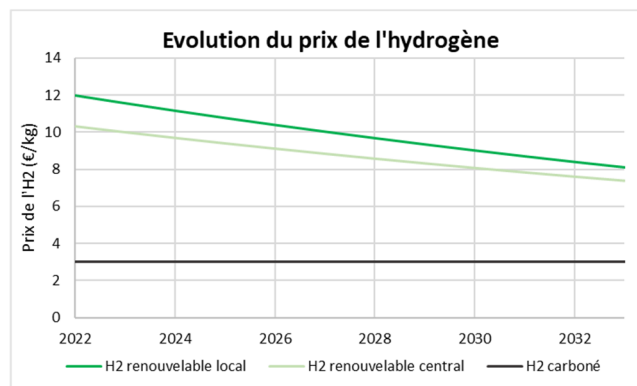


Figure 1 : Hypothèse d'évolution des prix à la pompe de l'hydrogène pour les 12 prochaines années (en €/HT)

Enfin, l'analyse environnementale s'attache, au moyen d'une analyse du cycle de vie (ACV) à évaluer les émissions de gaz à effet de serre (GES) sur le cycle de vie du poids lourd et du bus articulé. L'ACV a été réalisée conformément aux normes ISO 14040 & 14044, à l'aide du logiciel commercial SimaPro® (version 9.2.0.2). La base de données utilisée est Ecoinvent v.3.8. La modélisation choisie est par défaut « allocation, cut-off by classification ».

<sup>4</sup> Des variations paramétriques sur la durée de vie et la durée d'utilisation annuelles ont également été effectuées.

<sup>5</sup> Celles en vigueur en France en 2022 (50 000€ pour les poids lourds et de 30 000€ pour les bus et autocars à PàC).

<sup>6</sup> Pour la pelle sur chenilles, seuls les coûts liés à l'investissement initial et à la dépense énergétique sont considérés, faute de données économiques fiables pour les autres postes.

<sup>7</sup> Le prix des énergies variant très régulièrement, les valeurs retenues n'ont pas vocation à suivre des évolutions temporaires liées aux fluctuations sur les marchés de l'énergie, mais à représenter des tendances de long terme. En particulier, l'étude TranpLHyn a été réalisée avant le déclenchement du conflit en Ukraine.



L'hydrogène consommé par les véhicules tout au long de leur vie représentant la part prépondérante de leur impact GES, voici les hypothèses considérées à ce sujet : on considère une production d'hydrogène par électrolyse PEM (*Polymer electrolyte membrane*), en France, dans deux cas de figure :

- hydrogène produit avec de l'électricité provenant du mix électrique français (données ADEME : 59,9 g CO<sub>2</sub> eq. / kWh),
- ou hydrogène produit à partir d'électricité à base d'énergie éolienne terrestre (15,7 g CO<sub>2</sub> eq./kWh, donnée Ecoinvent, méthode d'impact EF 3.0).

### 3. Volet énergétique – Consommation et autonomie

Les tableaux présentés dans ce chapitre indiquent les consommations de combustible calculées pour les 4 véhicules. Les valeurs annoncées pour les architectures à pile à combustible sont données sous la forme d'une moyenne associée à une plage de variation autour de cette valeur moyenne. En effet, le dimensionnement du groupe-motopropulseur a un impact direct sur la consommation d'énergie du poids lourd. En particulier, pour les architectures équipées d'une pile à combustible, le rendement moyen d'utilisation de la PàC (directement lié à sa puissance maximale) a un impact significatif sur la consommation d'hydrogène. L'installation d'une PàC de plus forte puissance réduit donc la consommation. La plage de variation autour de la valeur moyenne de consommation rend compte de l'effet du dimensionnement du GMP.

Dans ces architectures, la pile à combustible est associée à une batterie. Deux cas ont été considérés, selon que les véhicules sont électriquement rechargeables (sur une borne de recharge électrique) ou pas. Dans le premier cas, la consommation d'énergie affichée prend en compte une consommation d'hydrogène et une consommation électrique liée au rechargement de la batterie sur une borne. Les deux approches – véhicule rechargeable ou non – sont technologiquement possibles. Le véhicule rechargeable présente l'avantage de pouvoir reporter une partie de la consommation d'hydrogène sur une consommation d'électricité « à la prise ». En revanche, l'infrastructure à mettre en place par l'exploitant est plus lourde puisqu'elle doit inclure des chargeurs et gérer les éventuelles contraintes de sécurité liées à la recharge électrique de véhicules à hydrogène.

Dans les tableaux, les consommations et les autonomies des différents véhicules sont présentées dans les deux cas (véhicule rechargeable ou non-rechargeable). Il a été considéré des masses d'hydrogène embarquées forfaitaires (par exemple, 50 kg pour le poids lourd), permettant ainsi de comparer les autonomies résultantes pour les différentes variantes.

Pour respecter le cahier des charges du poids lourd, et notamment sa capacité à monter des pentes à 5% à une vitesse d'au moins 50 km/h, le dimensionnement minimal en puissance de la PàC doit être de 225 kW environ ( $\pm 25$  kW). Il faut alors lui associer une batterie d'une capacité de 75 kWh environ, notamment pour assurer des missions sur des autoroutes empruntant des zones de montagne (ex. trajet Lyon-Milan). En moyenne, un poids lourd à PàC utilisé pour transporter du fret sur des trajets nationaux ou internationaux consomme 20% à 30% de moins que son équivalent équipé d'un moteur à combustion d'hydrogène (tableau 1).

	Consommation		Autonomie @ 50kg H <sub>2</sub>	
	Véhicules rechargeables	Véhicules non-rechargeables	Véhicules rechargeables	Véhicules non-rechargeables
<b>VTH D</b>	31,8L/100km		-	
<b>VTH H2 - <math>\eta_{pic} = 44\%</math></b>	10,2 kgH <sub>2</sub> /100km		≈500 km	
<b>FCEV H2 - <math>\eta_{pic} = 55\%</math></b>	≈8 ± 0,6 kgH <sub>2</sub> /100km et entre 3 et 12 kWh <sub>elec</sub> /100km	≈8,3 ± 0,5 kgH <sub>2</sub> /100km	≈630 ± 50 km	≈600 ± 30 km
<b>FCEV H2 - <math>\eta_{pic} = 65\%</math></b>	≈7 ± 0,6 kgH <sub>2</sub> /100km et entre 3 et 11 kWh <sub>elec</sub> /100km	≈7,2 ± 0,4 kgH <sub>2</sub> /100km	≈730 ± 50 km	≈700 ± 40 km

Tableau 1 : Ordres de grandeur de consommation et d'autonomie pour le poids lourds 44 tonnes

L'usage urbain des bus articulés favorise grandement les configurations électrifiées. La récupération d'énergie au freinage creuse l'écart entre les versions à moteur à combustion et celles à PàC. Un bus à PàC consomme de 30% à presque 50% de moins qu'un bus thermique à hydrogène (Tableau 2). Le profil de mission VECTO Urban considéré ici est sévère et conduit à

	Ordres de grandeur			
	Consommation		Autonomie @ 40kg H <sub>2</sub>	
	Véhicules rechargeables	Véhicules non-rechargeables	Véhicules rechargeables	Véhicules non-rechargeables
<b>VTH D</b>	63,6L/100km		-	
<b>VTH H2 - <math>\eta_{pic} = 44\%</math></b>	19,0 kgH <sub>2</sub> /100km		≈240 km	
<b>FCEV H2 - <math>\eta_{pic} = 55\%</math></b>	≈12 ± 1,5 kgH <sub>2</sub> /100km et entre 10 et 50 kWhélec/100km	≈12,8 ± 1,2 kgH <sub>2</sub> /100km	≈340 ± 45 km	≈315 ± 30 km
<b>FCEV H2 - <math>\eta_{pic} = 65\%</math></b>	≈10,5 ± 1,5 kgH <sub>2</sub> /100km et entre 9 et 45 kWhélec/100km	≈11,1 ± 1,2 kgH <sub>2</sub> /100km	≈390 ± 50 km	≈365 ± 40 km

Tableau 2 : Ordres de grandeur de consommation et d'autonomie pour le bus urbain de 18 mètres

des consommations énergétiques élevées (63,6 L/100km pour la référence Diesel). Par comparaison, sur des trajets de lignes lyonnaises réelles, les simulations montrent que la variante Diesel a une consommation de 51,2 L/100km et que la consommation des bus à PàC est alors de l'ordre de 8 kgH<sub>2</sub>/100 km. Cet écart s'explique par une vitesse moyenne plus élevée sur le cycle VECTO et un pourcentage de temps passé à l'arrêt supérieur aussi sur ce cycle, ce qui est défavorable à la consommation à cause de la consommation énergétique des auxiliaires considérée dans les simulations.

Comme pour le bus articulé, la récupération d'énergie lors des décélérations et des freinages apporte un gain important de consommation pour les configurations électrifiées de l'autocar régional. Un car régional à PàC consomme entre 30% et presque 50% de moins que son équivalent à combustion d'hydrogène. Dans les 2 cas (bus urbain et autocar régional), la charge en passagers a un impact significatif sur la consommation. La pondération considérée ici n'est qu'un exemple. L'ensemble des résultats présentés dans le rapport permet d'évaluer au cas par cas l'intérêt des différentes variantes selon la fréquentation de la ligne considérée.

	Ordres de grandeur			
	Consommation		Autonomie @ 40kg H <sub>2</sub>	
	Véhicules rechargeables	Véhicules non-rechargeables	Véhicules rechargeables	Véhicules non-rechargeables
<b>VTH D</b>	34,6L/100km		-	
<b>VTH H2 - <math>\eta_{pic} = 44\%</math></b>	10,5 kgH <sub>2</sub> /100km		≈380 km	
<b>FCEV H2 - <math>\eta_{pic} = 55\%</math></b>	≈6,3 ± 0,7 kgH <sub>2</sub> /100km et entre 6 et 30 kWhélec/100km	≈6,8 ± 0,5 kgH <sub>2</sub> /100km	≈635 ± 75 km	≈590 ± 45 km
<b>FCEV H2 - <math>\eta_{pic} = 65\%</math></b>	≈5,7 ± 0,7 kgH <sub>2</sub> /100km et entre 5 et 27 kWhélec/100km	≈5,9 ± 0,5 kgH <sub>2</sub> /100km	≈715 ± 85 km	≈685 ± 65 km

Tableau 3 : Ordres de grandeur de consommation et d'autonomie pour l'autocar régional 12m

En raison d'un manque de données, l'évaluation énergétique de la pelle sur chenilles a été réalisée différemment des 3 autres véhicules. Les résultats de consommation d'énergie sont ici présentés par comparaison avec la pelle sur chenilles à moteur Diesel (Figure 2).

On note en premier lieu que la version à moteur thermique à hydrogène à 44% de rendement pic présente une consommation d'énergie supérieure à la référence Diesel. Ceci est lié aux différences de rendement considérées entre les 2 moteurs, à la fois en termes de valeur de rendement pic et en termes de forme de la cartographie de rendement, le moteur Diesel étant en moyenne utilisé dans des zones de meilleur rendement que le moteur à hydrogène.

La puissance moyenne requise sur le cycle d'usage « dig and dump » considéré est de l'ordre de 150 kW. Ainsi le gain de consommation d'énergie des variantes à PàC est d'autant plus élevé que la pile est puissante.

La récupération d'énergie au freinage de la tourelle en fin de rotation (deux fois par cycle sur le cycle d'usage considéré) permet une économie d'énergie de l'ordre de 6 à 8%. De plus, la rotation par moteur électrique de la tourelle est plus rapide qu'avec une transmission hydraulique, et génère un gain de productivité pour les variantes à motorisations hybrides et à PàC.

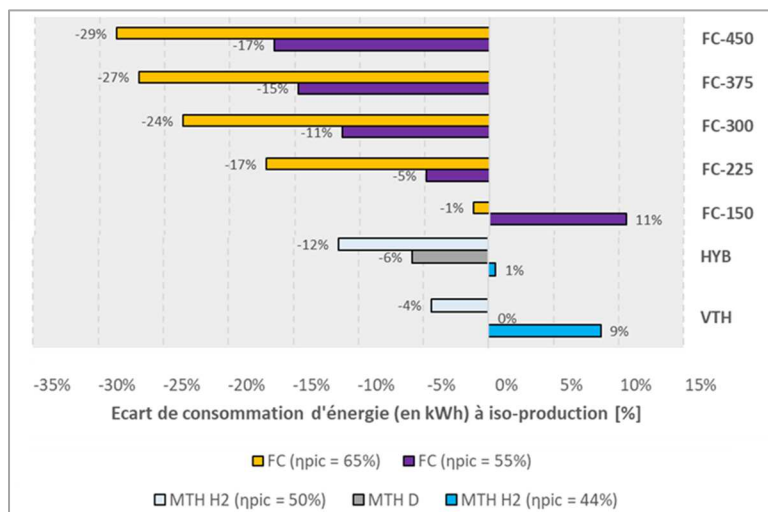


Figure 2 : Ecart de consommation des variantes de pelles sur chenilles de 75 tonnes

## 4. Volet économique – Coût total de possession (TCO)

De manière générale, pour les 4 types de véhicules étudiés, le passage à l'hydrogène entraîne une multiplication du coût total de possession du véhicule par un facteur 1,5 à 3 dès lors que l'on utilise de l'hydrogène issu de l'électrolyse<sup>8</sup>. La dépense énergétique représente le premier poste de coûts. Les versions à pile à combustible sont handicapées par un coût d'acquisition élevé des engins, la technologie étant pour l'instant très onéreuse. Les TCO du véhicule à PàC et de la version à moteur à combustion d'hydrogène sont généralement assez proches ; néanmoins, le véhicule à PàC revient en moyenne 10 à 20% plus cher que la version à moteur thermique (fort investissement de départ et surcoût lié au remplacement de la PàC à mi-vie non compensés par la réduction de la dépense énergétique).

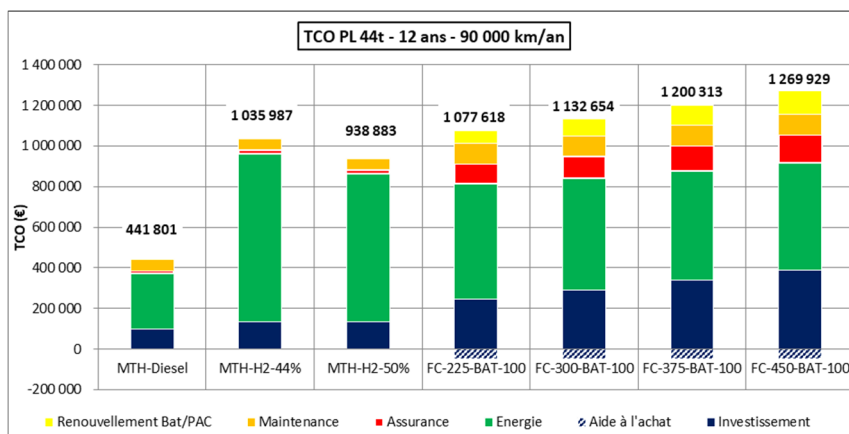


Figure 3 : TCO du poids lourd 44t, sur une durée de 12 ans (PàC avec un rendement pic de 65%, « hydrogène renouvelable local » ayant un prix évoluant comme présenté sur la Figure 1)

<sup>8</sup> Par opposition à de l'hydrogène « SMR », obtenu par reformage de méthane, correspondant à un « hydrogène carboné ».

Le coût d'acquisition élevé pour les variantes à pile à combustible est partiellement compensé par la réduction de la dépense associée à la consommation d'hydrogène par rapport aux motorisations thermiques à hydrogène. La baisse de la consommation d'hydrogène est notamment forte pour les véhicules bénéficiant tout particulièrement de la récupération d'énergie en décélération et au freinage (cas du bus urbain et de l'autocar, étant donné leurs usages). Ainsi à l'avenir, une baisse du prix de l'hydrogène avantagera plutôt la solution à moteur thermique à hydrogène. Dans l'hypothèse d'un hydrogène à 3 €/kg (constant sur les 12 ans), le bus à combustion d'hydrogène devient par exemple compétitif par rapport au bus Diesel (Figure 4). A l'inverse, pour un prix élevé de l'hydrogène (12 €/kg), un coût de PàC inférieur à 500 €/kW rend le bus à PàC un peu plus intéressant que la version à moteur à combustion d'hydrogène.

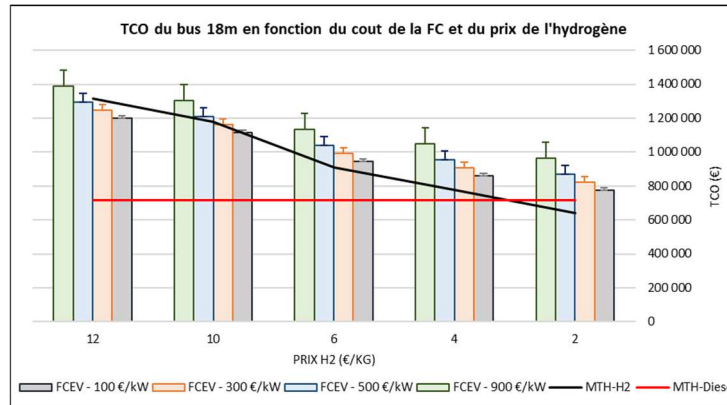


Figure 4 : TCO du bus articulé, sur 12 ans, en fonction du coût de la PàC et du prix de l'hydrogène (ici considéré constant dans le temps)

(Hypothèses : PàC : 120 kW et  $\eta_{pic} = 55\%$ , batterie : 25 kWh,  $\eta_{MTH-H2} = 44\%$ . La petite barre verticale au sommet des barres principales représente le coût du renouvellement de la PàC et de la batterie à la mi-vie du bus).

La Figure 5 présente le TCO de l'autocar régional dans les différentes configurations étudiées et pour les 3 types d'hydrogène considérés dans l'étude. Seul le cas de l'utilisation d'hydrogène carboné dans un car à moteur thermique à hydrogène est compétitif par rapport à la version Diesel. Sinon, on note à nouveau une forte augmentation du TCO pour les versions de l'autocar utilisant de l'hydrogène renouvelable, par rapport à la version Diesel. Peu importe le dimensionnement des groupes moto-propulseurs à PàC, la hiérarchie entre les architectures reste identique : la motorisation thermique Diesel présente le TCO le plus faible, suivie par les versions à moteur thermique à hydrogène, puis les versions à pile à combustible.

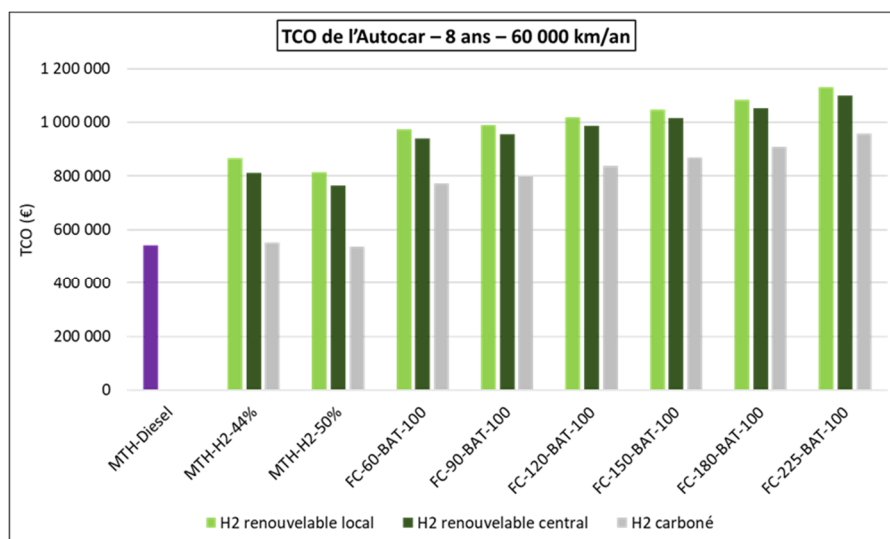


Figure 5 : TCO de l'autocar régional, sur une durée de 8 ans

(Hypothèse pour la PàC :  $\eta_{pic} = 55\%$ . Sur les 8 ans, les prix de l'hydrogène évoluent selon les hypothèses présentées sur la Figure 1)

En raison d'un manque de données, l'étude économique de la pelle sur chenilles est seulement basée sur l'investissement et la dépense énergétique, et établie par différence avec la configuration Diesel. Contrairement aux autres véhicules étudiés, et dans une certaine mesure, le TCO diminue quand la puissance de la PàC augmente, l'amélioration de l'efficacité énergétique compensant alors le surcoût à l'investissement. Pour cet engin, on note une forte sensibilité au nombre d'heures de fonctionnement annuel (Figure 6). Ainsi, le choix de la motorisation doit être adapté en fonction des besoins de chaque exploitant.

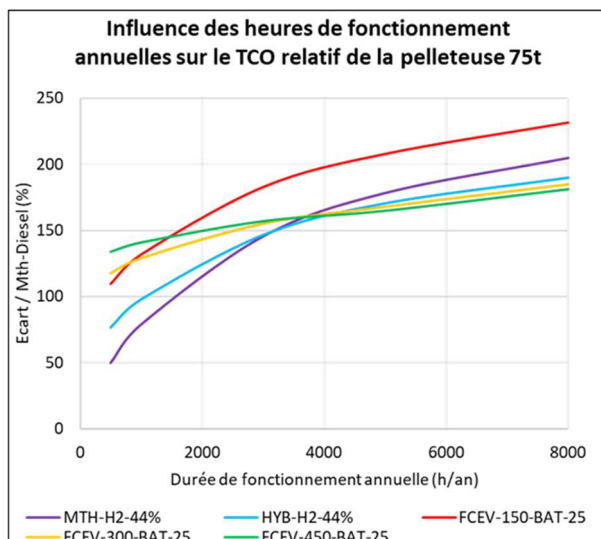


Figure 6 : TCO comparatif de la pelle sur chenilles 75t en fonction de la durée de fonctionnement annuelle, sur 5 ans d'utilisation  
 (Hypothèse d'une PàC avec un rendement pic de 55%)  
 (Pelle Diesel prise pour référence = 0 ; par exemple, la pelle MTH-H2 utilisée 500h/an revient 50% plus cher que la version Diesel)

## 5. Volet environnemental – Emissions de Gaz à effet de serre (GES)

A condition que l'hydrogène soit obtenu avec des procédés peu émissifs de gaz à effet de serre (GES), le recours aux groupe-moto-propulseurs fonctionnant avec ce combustible a un impact très positif sur l'environnement, par comparaison avec les véhicules fonctionnant au gazole.

Par exemple, un poids lourd utilisant de l'« hydrogène bas carbone », ici obtenu par électrolyse à partir du mix électrique français, présente des émissions de gaz à effet de serre réduites de plus de la moitié par rapport à son équivalent Diesel (Figure 7). La consommation d'hydrogène par la PàC ne génère pas d'émissions de GES en fonctionnement et la production de l'hydrogène représente la part prépondérante des émissions de GES sur l'ensemble du cycle de vie du poids lourd. En proportion, la fabrication du réservoir d'hydrogène, de la PàC et de la batterie constitue une faible part dans le bilan global. Le poids lourd Diesel génère majoritairement les émissions de GES de son cycle de vie lors des trajets qu'il réalise, à cause des émissions de CO<sub>2</sub> liées à la combustion du gazole. Cela est dû à la grande distance parcourue par les poids lourds durant leur vie (plus d'un million de kilomètres dans cette étude).

Pour ce scénario « hydrogène bas carbone », l'écart de consommation d'énergie entre les différentes variantes de véhicules à hydrogène exerce une influence significative sur le bilan final. Le poids lourd qui a la plus faible consommation d'hydrogène – en l'occurrence le poids lourd à PàC avec l'hypothèse de rendement la plus élevée – présente aussi l'impact GES le plus faible.

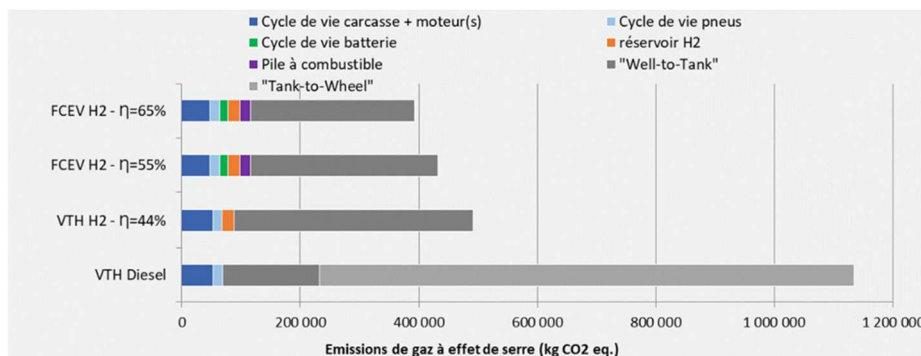


Figure 7 : Emissions de GES du poids lourd 44t (scénario « hydrogène bas carbone »)

La part des impacts liés à la production de l'hydrogène peut être encore réduite en ayant recours à de l'électricité renouvelable pour procéder à l'électrolyse de l'eau. Ainsi l'utilisation d'hydrogène renouvelable, ici obtenu par électrolyse avec de l'électricité d'origine éolienne terrestre, réduit fortement les émissions de GES associées à la production de l'hydrogène. Sur le cycle de vie, les émissions de GES sont alors 5 à 6 fois plus faibles que pour la version Diesel. La part des émissions de GES associée à la fabrication du réservoir, de la batterie et de la PàC devient significative dans le bilan global. Par exemple, dans le cas du bus articulé, le bus à PàC présente les émissions de GES les plus faibles, mais l'écart avec le bus à moteur à combustion d'hydrogène devient faible (Figure 8).

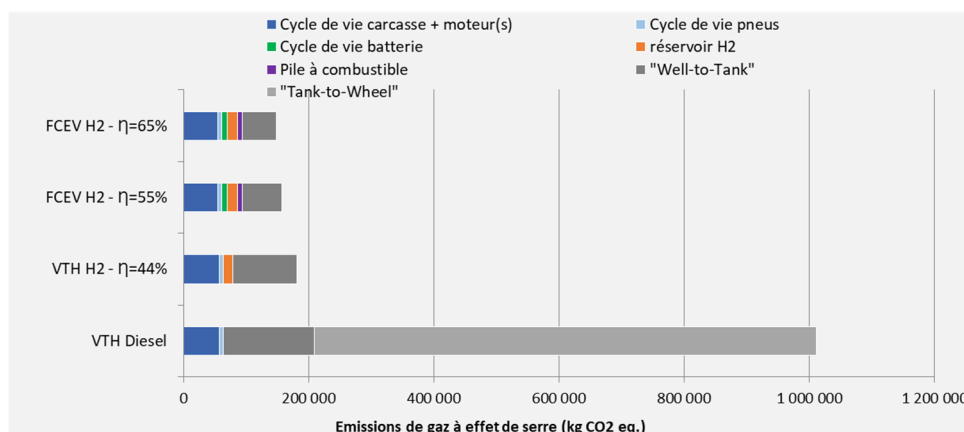


Figure 8 : Emissions de GES du bus 18 m (scénario « hydrogène renouvelable »)

## 6. Conclusion

Le véhicule électrique est une technologie majeure pour réduire les émissions de gaz à effet de serre et les émissions de polluants locaux des moyens de transport, dès lors que la production d'électricité est elle-même peu carbonée. Dans la catégorie des véhicules électriques, le véhicule à batterie est le plus efficace énergétiquement et doit être privilégié, mais son emploi peut ne pas être adapté pour les usages intensifs ou très consommateurs d'énergie.

Cette étude s'est attachée à déterminer l'intérêt de l'hydrogène pour quatre types de véhicules lourds, peu compatibles avec le véhicule à batterie : le poids lourd long-routier de 44 tonnes, le bus articulé de 18 mètres, l'autocar régional (dans l'optique d'une utilisation intensive) et la pelle sur chenilles de 75 tonnes. La configuration de référence, une motorisation thermique Diesel, a été comparée à la propulsion électrique alimentée par pile à combustible à hydrogène, d'une part, et à l'autre voie d'utilisation de l'hydrogène – sa combustion dans un moteur thermique – d'autre part.

L'évaluation énergétique de ces véhicules a montré le fort intérêt des solutions électrifiées à hydrogène pour réduire la consommation. Ainsi la consommation des véhicules à PàC est réduite de 10 à 40% environ

par rapport à des versions équipées d'un moteur thermique à hydrogène. Le dimensionnement du couple PàC-batterie est un facteur important.

L'intérêt des solutions électriques à pile à combustible est encore plus fort pour les utilisations urbaines, où la récupération d'énergie au freinage joue un grand rôle dans l'efficacité énergétique du véhicule. Les principaux ordres de grandeur de consommation sont fournis dans le tableau 4.

	Poids lourd 44t	Bus articulé 18m	Car régional	Pelle sur chenilles
Véhicule Diesel	31,8 L/100 km	63,6 L/100 km	34,6 L/100 km	Référence
Véhicule à moteur thermique H2	10 kgH2/100 km	19 kgH2/100 km	10,5 kgH2/100 km	+9%
Véhicule à PàC	7 à 9 kgH2/100 km	10 à 14 kgH2/100 km	6 à 7 kgH2/100 km	-10 à -15%

*Tableau 4 : Ordres de grandeur des consommations de combustible pour les différents véhicules étudiés (En considérant l'hypothèse d'un moteur thermique H2 à 44% de rendement pic. Pour la pelle sur chenilles, les écarts sont exprimés en faisant référence à la consommation d'énergie)*

L'analyse énergétique a également servi de base pour l'évaluation économique des solutions à hydrogène. L'évaluation du coût total de possession (TCO) a été réalisée en considérant des véhicules qui seraient mis en circulation en 2022, donc avec des hypothèses de coûts actuels, puis exploités pendant 5 à 12 ans selon les véhicules. L'utilisation de l'indicateur TCO montre que le passage d'une motorisation thermique Diesel aux différentes solutions à hydrogène entraîne une hausse de la dépense d'un facteur 1.5 à 3 sur la durée de vie des véhicules.

Aujourd'hui les TCO des versions à moteur thermique à hydrogène ou à pile à combustible sont assez proches, avec toutefois un avantage au moteur thermique à hydrogène. Le gain sur la consommation d'hydrogène permis par la pile à combustible n'est en effet pas compensé par l'important investissement de départ, la technologie PàC étant aujourd'hui très coûteuse. Les paramètres de rendement de la pile à combustible et de taille de batterie, bien que permettant un gain sur la dépense énergétique, ont peu d'influence sur le TCO des différentes solutions. En revanche, deux paramètres clé permettront à l'avenir d'approcher le TCO des solutions à hydrogène à celui du Diesel : le prix de l'hydrogène et le coût de la pile à combustible. En effet, la rentabilité de la motorisation thermique à hydrogène par rapport à la motorisation Diesel est atteinte pour un prix de l'hydrogène de 3€/kg et que, à moins de 10€/kg, le TCO de la version à moteur thermique à hydrogène devient inférieur à celui de la version électrifiée à pile à combustible dans la majorité des configurations. Des efforts sur le coût de fabrication de la pile à combustible ainsi que sur sa durée de vie (élimination du besoin de remplacement pendant la durée de vie du véhicule) sont nécessaires pour que le TCO de la version à pile à combustible approche celui de la version Diesel, et semblent plus efficaces que l'amélioration du rendement des éléments de motorisation au vu des analyses de sensibilité menées dans cette étude.

Les consommations obtenues à l'aide de l'analyse énergétique ont enfin permis de réaliser l'analyse environnementale des solutions à hydrogène dans le cas du poids lourd et du bus articulé, au moyen d'une analyse de cycle de vie. Pour la production d'hydrogène, deux scénarios ont été considérés : un scénario dans lequel l'hydrogène est produit par électrolyse à partir d'électricité provenant du mix électrique français (« hydrogène bas carbone ») et un second scénario dans lequel l'hydrogène est produit par électrolyse à partir d'électricité renouvelable au moyen d'énergie éolienne (« hydrogène renouvelable »).

Sur l'ensemble du cycle de vie, les solutions à hydrogène bénéficient de réelles réductions d'émissions de gaz à effet de serre (GES) en comparaison des solutions Diesel. Ainsi, les émissions de GES sont réduites de plus de la moitié si on considère le scénario « hydrogène bas carbone ». Dans ce scénario et pour les deux types de véhicule, les impacts de la production d'hydrogène représentent la majorité des impacts du cycle de vie. Par conséquent, pour ce scénario, les écarts d'émissions de GES sur l'ensemble du cycle de vie entre les véhicules thermiques à hydrogène et à pile à combustible sont directement liés aux écarts de consommation d'hydrogène. Ainsi, les véhicules à pile à combustible présentent les émissions de GES les plus faibles.

L'utilisation d'hydrogène renouvelable réduit encore de moitié environ les émissions de GES du poids lourd et du bus. Pour ce scénario, les différences de consommation ne permettent alors plus de différencier les véhicules à pile à combustible des versions à moteur thermique à hydrogène : les écarts en termes d'émissions de GES sont très faibles.

## SIGLES ET ACRONYMES

---

---

ACV	Analyse du Cycle de Vie
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
D	Diesel
FC	<i>Fuel Cell</i> (pile à combustible)
FCEV	<i>Fuel Cell Electric Vehicle</i> (véhicule électrique à pile à combustible)
GMP	Groupe Moto-Propulseur
H2	Dihydrogène (aussi dénommé hydrogène dans le langage courant)
HYB	Hybride
IFPEN	IFP Energies nouvelles
MTH	Moteur thermique
PàC	Pile à combustible
PHEV	<i>Plug-in Hybrid Electric Vehicle</i> (véhicule hybride rechargeable)
PEM, PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell (pile à combustible à membrane échangeuse de protons)
SMR	<i>Steam Methane Reforming</i>
t	Tonne
TCO	<i>Total Cost of Ownership</i> (coût total de possession)
VECTO	<i>Vehicle Energy Consumption Calculation Tool</i> (outil de calcul de la consommation énergétique des véhicules)



## L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique -, nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, économie circulaire, alimentation, mobilité, qualité de l'air, adaptation au changement climatique, sols... - nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

### LES COLLECTIONS DE L'ADEME



#### FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



#### CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



#### ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



#### EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



#### HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.

## « TranpLHyn » - TRANSPORTS LOURDS FONCTIONNANT A L'HYDROGENE

Résumé – L'étude compare sur un plan énergétique, économique et environnemental les deux modes d'utilisation possible de l'hydrogène pour la mobilité routière : pour l'alimentation d'une pile à combustible (PàC), d'une part, ou pour sa combustion dans un moteur thermique, d'autre part.

Quatre types de véhicules sont considérés : le poids lourd de 44 tonnes, le bus articulé de 18 mètres, l'autocar régional et la pelle sur chenilles de 75 tonnes. Ces engins consomment de grandes quantités d'énergie correspondant à des besoins difficiles à satisfaire avec un véhicule électrique à batterie. L'hydrogène est alors une solution pour décarboner ces applications.

L'étude montre que les véhicules équipés d'une PàC sont plus économes en énergie – de 10 à 40% environ – que ceux mus par un moteur à combustion d'hydrogène. En revanche, le coût total de possession est plutôt en faveur du véhicule à moteur à combustion d'hydrogène, même si les écarts avec la PàC sont faibles. A l'inverse, les émissions de gaz à effet de serre sur l'ensemble du cycle de vie des véhicules sont légèrement plus faibles avec les véhicules équipés d'une PàC, mais, là encore, les différences sont très faibles avec les versions

*IFP Energies nouvelles (IFPEN) est un acteur majeur de la recherche et de la formation dans les domaines de l'énergie, du transport et de l'environnement. Depuis les concepts scientifiques en recherche fondamentale jusqu'aux solutions technologiques en recherche appliquée, l'innovation est au cœur de son action, articulée autour de quatre orientations stratégiques : climat, environnement et économie circulaire ; énergies renouvelables ; mobilité durable ; hydrocarbures responsables.*

*Dans le cadre de la mission d'intérêt général confiée par les pouvoirs publics, IFPEN concentre ses efforts sur l'apport de solutions aux défis sociétaux et industriels de l'énergie et du climat, au service de la transition écologique. Partie intégrante d'IFPEN, IFP School, son*

