

« TRANPLHYN » TRANSPORTS LOURDS FONCTIONNANT A L'HYDROGENE

Analyse énergétique,
économique et
environnementale



EXPERTISES

Juin
2022

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. 94 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	5
ABSTRACT	6
1. CONTEXTE DU PROJET	7
2. METHODOLOGIE	8
2.1. Evaluation de la consommation énergétique.....	8
2.1.1. Moteurs thermiques.....	8
2.1.2. Piles à combustible.....	9
2.1.3. Machines électriques	10
2.1.4. Batteries.....	11
2.1.5. Transmission	11
2.1.6. Auxiliaires électriques	12
2.1.7. Simulateurs	12
2.1.8. Masse des composants.....	12
2.2. Coût total de possession	13
2.2.1. L'indicateur TCO.....	13
2.2.2. Structure de coût des véhicules	14
2.2.3. Segments et motorisations étudiés	15
2.2.4. Coûts associés au GMP	15
2.2.5. Autres coûts.....	16
2.3. Analyse du cycle de vie	17
2.3.1. Définition du système	18
2.3.2. Unité fonctionnelle	21
2.3.3. Frontières du système	22
2.3.4. Catégories d'impact et indicateurs	22
3. POIDS LOURD 44 TONNES	23
3.1. Variantes considérées et mise en données	23
3.2. Evaluation sur cycle	24
3.2.1. Consommation énergétique.....	24
3.2.2. Emissions d'oxydes d'azote	27
3.3. Coût total de possession	27
3.3.1. Cas d'étude.....	27
3.3.2. Résultats	28
3.4. Analyse du cycle de vie	30
4. BUS ARTICULE DE 18 METRES	33
4.1. Variantes considérées et mise en données	33
4.2. Consommation sur cycle	33
4.3. Coût total de possession	35

4.3.1. Cas d'étude.....	35
4.3.2. Résultats.....	35
4.4. Analyse du cycle de vie.....	37
5. AUTOCAR REGIONAL.....	39
5.1. Variantes considérées et mise en données.....	39
5.2. Consommation sur cycle.....	39
5.3. Coût total de possession.....	40
5.3.1. Cas d'étude.....	40
5.3.2. Résultats.....	41
6. PELLE SUR CHENILLES DE 75 TONNES.....	42
6.1. Variantes considérées et mise en données.....	42
6.2. Consommation sur cycle.....	43
6.3. Coût total de possession.....	44
6.3.1. Cas d'étude.....	44
6.3.2. Résultats.....	45
7. CONCLUSION / PERSPECTIVES.....	47
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	49
INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES.....	51
SIGLES ET ACRONYMES.....	54
ANNEXES.....	55
ANNEXE 1 : Compléments sur les cycles d'usage.....	55
ANNEXE 2 : Compléments sur les poids lourds 44 tonnes.....	63
ANNEXE 3 : Compléments sur les bus articulés de 18 mètres.....	78
ANNEXE 4 : Compléments sur les autocars régionaux.....	86
ANNEXE 5 : Compléments sur les pelles sur chenilles de 75 tonnes.....	93

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 du projet

Dans l'optique de réduire les émissions de gaz à effet de serre et de gaz polluants issus du domaine du transport et néfastes pour les organismes vivants et pour l'environnement, des filières énergétiques alternatives aux carburants dérivés du pétrole ont été développées durant les dernières années. D'une part, les carburants synthétiques, dont certains sont dits renouvelables grâce à leur cycle du carbone proche de l'équilibre, sont un moyen intéressant de pallier certains défauts (impact climatique, raréfaction des ressources) des carburants fossiles tout en permettant de réutiliser et de continuer à développer la technologie centenaire du moteur à combustion interne. D'autre part, l'énergie électrique et son écosystème dédié à la mobilité 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 en France pour les véhicules particuliers, puisque l'Etat prévoit des aides spécifiques à l'achat de ce type de véhicule, en moyenne plus coûteux que les véhicules à moteur à combustion, pour encourager la transition écologique. 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 véhicules d'usage intensif ou gros consommateurs d'énergie, le véhicule à batterie peut s'avérer inadapté pour des raisons d'autonomie insuffisante ou de temps de charge incompatible avec les besoins du service.

En effet, pour des véhicules plus lourds, et donc plus énergivores, la taille et la masse des batteries doivent être adaptées en conséquence et peuvent dès lors dépasser plusieurs tonnes. Cela devient problématique lorsque la raison d'être du véhicule est de transporter de la marchandise ou des passagers, par exemple. A châssis équivalent, une partie de la charge utile doit être remplacée par la batterie de traction, ce qui peut impacter le rendement économique d'utilisation du véhicule. 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 électriques à batterie à usage commercial.

Il existe une alternative aux batteries massives pour le stockage de l'énergie nécessaire à l'avancement des véhicules électriques. Il s'agit du dihydrogène, de symbole chimique H_2 , aussi dénommé simplement *hydrogène* dans le langage courant. Cette molécule, connue et étudiée depuis des décennies pour son énergie chimique exceptionnelle, prend une place croissante parmi les solutions envisagées pour décarboner l'industrie et le domaine du transport. Son utilisation dans le transport ne se limiterait d'ailleurs pas au stockage d'énergie pour des chaînes de traction électriques, et plusieurs voies d'utilisation pour la propulsion peuvent être envisagées.

En effet, l'hydrogène est un très bon combustible. Il est donc possible de le brûler dans un moteur à combustion, selon un procédé similaire à la combustion des carburants fossiles. Dans ce cas, l'énergie chimique est transformée directement en énergie mécanique, via le moteur à combustion. Une autre voie consiste à transformer l'énergie chimique en énergie électrique, et d'utiliser cette énergie électrique dans une machine électrique pour la transformer en énergie mécanique. C'est le principe des véhicules à pile à combustible (« PàC » ou « FC », pour *Fuel Cell* en anglais).

L'objet de cette étude est d'établir une comparaison entre ces deux modes de propulsion à hydrogène pour les transports lourds. Les types de véhicules traités sont le poids lourd long routier de 44 tonnes, le bus urbain articulé de 18 mètres de long, le car régional rigide de 12 mètres et la pelle sur chenilles de 75 tonnes. Ces quatre véhicules ont été choisis car il semble difficile de les envisager aujourd'hui dans des configurations de véhicule à batterie et d'utilisation intensive, étant donné leur consommation élevée d'énergie.

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, voire d'un fonctionnement hybride thermique-électrique, d'autre part. Pour chaque engin, un usage moyen est défini pour servir la comparaison énergétique et économique. Des tableaux de résultats exhaustifs sont proposés en annexes pour permettre si besoin au lecteur d'adapter, en utilisant d'autres pondérations, les calculs effectués dans cette étude à d'autres usages.

2. Méthodologie

Ce premier chapitre expose la méthodologie adoptée dans l'étude. Il s'agit de présenter ici les hypothèses de travail de chacun des trois prismes d'évaluation : consommation énergétique, coût total de possession et analyse de cycle de vie. Seules les hypothèses génériques applicables aux quatre applications étudiées sont présentées dans ce chapitre.

Les différentes applications étudiées sont déclinées en plusieurs architectures, elles-mêmes déclinées en plusieurs variantes. Le terme « **architecture** » fait référence au groupe moto-propulseur (GMP). Les architectures retenues sont du type conventionnel à moteur thermique, électrique à pile à combustible et, dans certains cas, hybride thermique-électrique. Le terme « **variante** » fait référence aux caractéristiques macroscopiques des organes du GMP, telle que la puissance pour un moteur thermique ou une pile à combustible, par exemple, ou l'énergie embarquée pour une batterie de traction. Ceci est illustré dans la Figure 1.

Ainsi, les variantes sont désignées dans ce rapport de la manière suivante :

- « MTH-350 MEL-65 BAT-25 » pour un groupe motopropulseur 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.

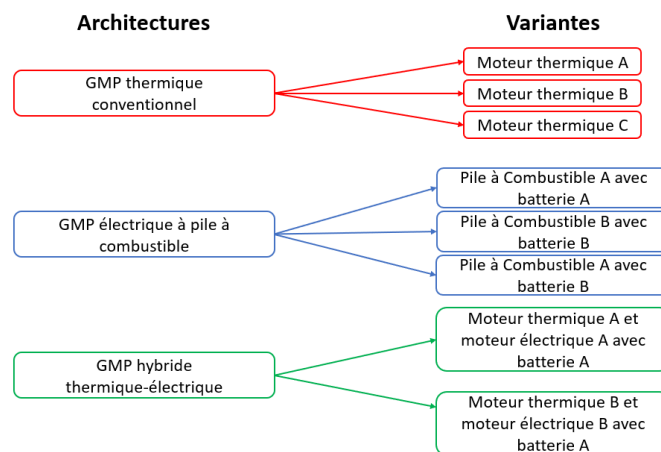


Figure 1 : Illustration de la désignation des différents cas étudiés

2.1. Evaluation de la consommation énergétique

2.1.1. Moteurs thermiques

Pour chaque type de véhicule étudié, une référence est établie sur la base d'un véhicule conventionnel à moteur thermique Diesel. C'est ce type de moteur qui est principalement utilisé pour les applications lourdes à l'heure actuelle [1]. Deux moteurs ont été utilisés, selon la puissance nécessaire pour l'application considérée. Le premier est un moteur 8L de 250kW avec un rendement pic de 43%, utilisé pour la simulation des bus articulés de 18 mètres et pour les autocars régionaux. Le second est un moteur de 12.8L de 410kW avec un rendement pic de 46%, utilisé pour la simulation des poids lourds de 44 tonnes et des pelles sur chenilles de 75 tonnes.

En ce qui concerne les véhicules à moteur à combustion d'hydrogène, la cartographie de rendement moteur a été dérivée de [2]. La cartographie du moteur à combustion interne d'hydrogène de 7.8L et 210kW avec un rendement pic de 44% est présentée en Figure 2. Afin d'effectuer des simulations sur plusieurs variantes, et notamment de simuler des moteurs de plus forte puissance, cette cartographie a été retenue et appliquée pour différentes cylindrées. Il s'agit d'une approximation relativement forte, qui

est justifiée par le peu de données disponibles au moment de la réalisation de cette étude sur les moteurs à combustion d'hydrogène.

Une variante de cette cartographie à 44% de rendement pic du moteur thermique à hydrogène a été réalisée par homothétie pour atteindre un rendement pic de 50%. Ce cas correspond, à l'heure actuelle, à ce que l'on peut considérer comme une asymptote technologique à long terme.

Il est important de noter qu'il ne faut pas se baser uniquement sur les différences de rendement pic entre les moteurs thermiques Diesel et ceux fonctionnant à l'hydrogène. En effet, la forme de la cartographie, c'est-à-dire l'évolution du rendement en fonction du régime moteur et de la charge, est un facteur très important. Par exemple, les moteurs thermiques Diesel considérés dans cette étude ont un meilleur rendement aux faibles charges que le moteur à combustion d'hydrogène dont la cartographie est présentée en Figure 2. Le rendement pic n'est pas non plus placé au même endroit dans les différentes cartographies. Là où le moteur à hydrogène retenu a son rendement pic maximal près de la courbe de pleine charge à bas régime, le rendement pic du moteur Diesel retenu de 410kW est situé plutôt au centre de la cartographie.

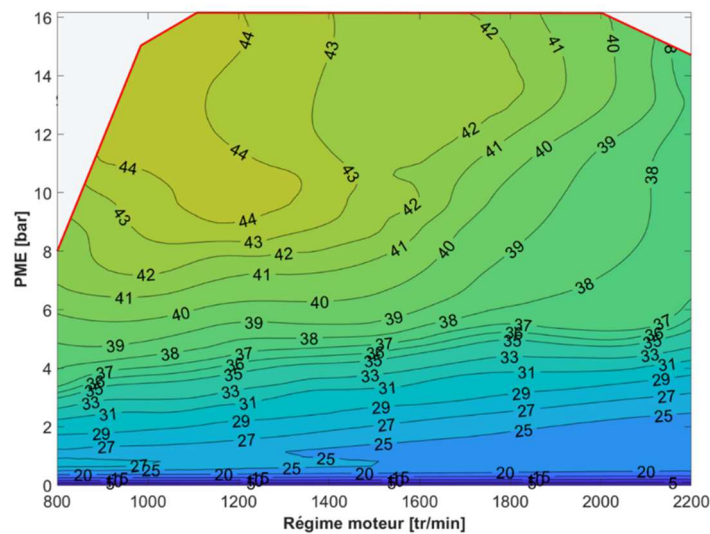


Figure 2 : Cartographie de rendement effectif (en %) du moteur thermique à combustion d'hydrogène utilisé dans l'étude (dérivée de [2])

2.1.2. Piles à combustible

Les hypothèses de rendement des systèmes pile à combustible utilisées pour cette étude sont dérivées et de la bibliographie [3,4,5] et de mesures expérimentales obtenues sur les moyens d'essais d'IFPEN. Sont ainsi pris en considération à la fois des mesures de rendement de systèmes pile à combustible commerciaux et des mesures de rendement de systèmes piles à combustible embarqués dans des véhicules légers en circulation, tels que la Toyota Mirai ou la Hyundai Nexa. Les courbes de rendement système PàC de ces véhicules, ainsi que les courbes dérivées pour cette étude, sont présentées dans la Figure 3. Au vu de la disparité en termes de rendement des systèmes PàC existant aujourd'hui, deux hypothèses de rendement pic pour le système pile à combustible ont été retenues pour notre étude : l'une à 55% de rendement pic, et l'autre à 65% de rendement pic.

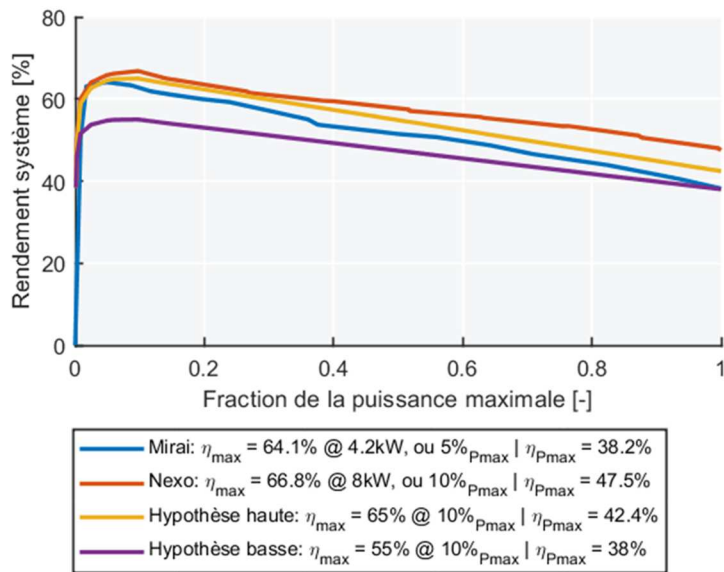


Figure 3 : Courbes de rendement des systèmes pile à combustible utilisés dans l'étude et courbes de références issues de mesures sur véhicules légers ([3,4,5])

Les piles à combustible sont, pour la plupart, modulaires. Ainsi, pour une puissance de 150kW, on peut par exemple utiliser deux stacks de 75kW en parallèle. Le même principe de modules a été repris pour établir les différents niveaux de puissance pile à combustible à considérer dans cette étude. Pour le cas du poids lourds 44t, par exemple, un module de base de 75kW a été considéré.

L'intérêt de systèmes pile à combustible plus puissants réside dans leur rendement moyen en utilisation plus élevé pour un usage donné. Considérons par exemple des systèmes de 3 modules de 75kW (225kW au total) et de 5 modules (375kW au total), dont les courbes de rendement sont représentées sur la Figure 4. Pour une puissance débitée de 100kW, le rendement du système de 3 modules est de 56%, tandis que celui du système de 5 modules est de 60.5%, soit 4.5 points de rendement en plus. Il est donc attendu que les systèmes avec une puissance maximale plus élevée soient associés à une consommation d'hydrogène et un coût à l'usage moindres. L'étude économique doit permettre de déterminer si, sur la durée de vie du véhicule, le surcoût à l'achat de systèmes « surdimensionnés » est compensé par la réduction du coût à l'usage.

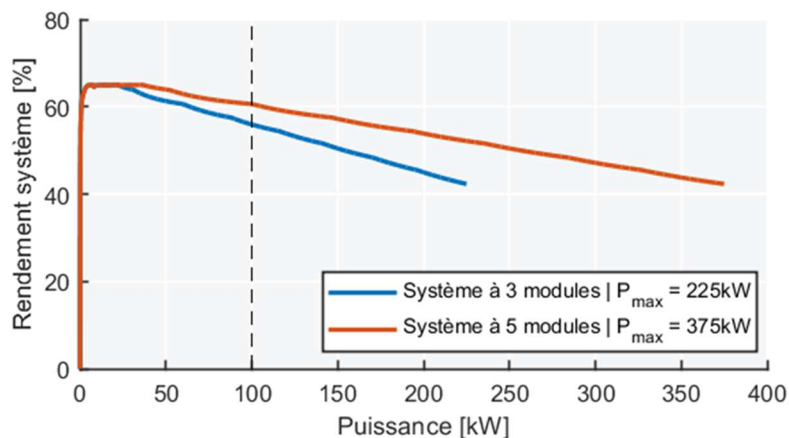


Figure 4 : Comparaison entre les courbes de rendement de 2 systèmes pile à combustible en fonction du nombre de modules (en supposant un rendement pic à 65% pour chaque module)

2.1.3. Machines électriques

Les véhicules à pile à combustible sont propulsés par un moteur électrique¹. La cartographie de rendement du système constitué de la machine électrique et de son onduleur est donnée en Figure 5, pour une machine d'une puissance de 400kW. Suivant le même principe que pour les moteurs thermiques dans cette étude, des moteurs électriques de puissances différentes ont été dérivés de cette cartographie suivant le besoin en performance des véhicules considérés. Le rendement a également été ajusté en fonction de la puissance maximale de la machine électrique à considérer pour chaque variante.

La récupération d'énergie lors des freinages ou des phases de roulage en descente est considérée comme maximale dans l'ensemble des simulations traitées.

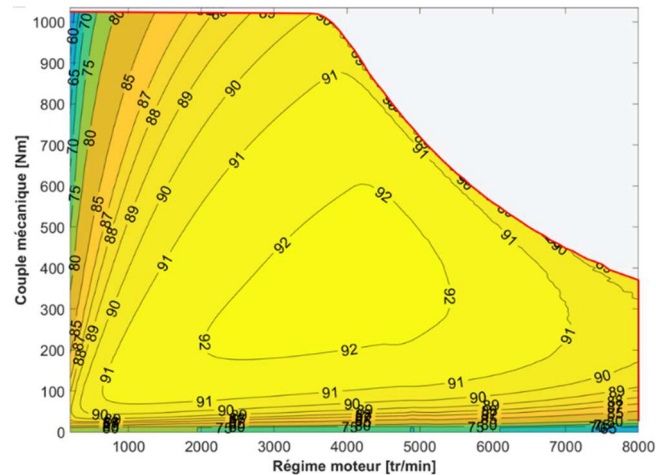


Figure 5 : Cartographie de rendement (en %) du système « machine électrique + onduleur »

2.1.4. Batteries

Les architectures à pile à combustible et les architectures hybrides thermiques-électriques nécessitent une batterie. Les batteries simulées ici sont de technologie lithium-ion. Dans cette étude, deux types de simulation ont été réalisées : en considérant que les véhicules sont rechargeables ou non (à la fois pour les véhicules hybrides et pour les véhicules à pile à combustible). Dans le premier cas, cela a un impact sur la consommation affichée qui doit prendre en compte à la fois une consommation d'hydrogène, mais aussi une consommation électrique liée au rechargement de la batterie sur une borne.

Les deux approches 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, pour l'exploitant, l'infrastructure à mettre en place est plus lourde puisqu'elle doit inclure des chargeurs. Les éventuelles contraintes de sécurité liées à la recharge électrique de véhicules à hydrogène ne sont pas considérées ici.

Pour les applications poids lourds 44 tonnes, des batteries de 25, 50, 75 et 100kWh ont été considérées. Pour le bus de 18 mètres et l'autocar régional, 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. Selon l'usage et le dimensionnement du GMP, la batterie peut servir à augmenter l'autonomie du véhicule, ou bien à garantir des performances élevées lors de phases de fonctionnement à forte demande de puissance.

2.1.5. Transmission

Pour chaque application, et dans un souci de simplification, la même transmission a été retenue pour toutes les variantes. Par exemple, pour le poids lourds 44 tonnes, la même boîte de vitesse à 12 rapports a été utilisée pour les variantes de l'architecture conventionnelle et les variantes de l'architecture à pile à combustible. Le même principe a été appliqué pour les bus 18m et les autocars régionaux simulés, avec une boîte de vitesse à 9 rapports. On notera que la présence de 9 ou 12 rapports n'est clairement pas nécessaire sur un véhicule lourd à PàC (donc avec une architecture électrique), mais que ce paramètre a ici très peu d'influence sur la consommation du véhicule. Si sur les poids lourds électriques de masse plus

¹ Dans ce rapport, nous utiliserons indifféremment les termes « machine électrique » ou « moteur électrique ».

faible (16t à 27t environ), une transmission à 2 rapports semble suffire, un 3^{ème} rapport pourrait s'avérer nécessaire sur des 44t. Le Volvo FH Electric (40t) utilise pour sa part une boîte de vitesse dérivée de la version à 12 rapports du poids lourd Diesel.

2.1.6. Auxiliaires électriques

Pour chaque application, une consommation liée aux auxiliaires électriques a été définie. Il s'agit de prendre en compte l'impact de la consommation électrique des accessoires nécessaires au fonctionnement et à l'usage du véhicule considéré.

Cette consommation supplémentaire est appliquée comme un forfait moyen et prend donc la forme d'une puissance constante prélevée sur la source primaire d'énergie. Selon le cas, les auxiliaires peuvent être alimentés par la pile à combustible, la batterie, ou bien par l'alternateur du moteur thermique.

2.1.7. Simulateurs

Les simulations ont été effectuées sur le logiciel Simcenter Amesim. Un exemple de modèle est présenté sur la Figure 6, pour un véhicule à pile à combustible. Un simulateur est composé d'un modèle de conducteur du véhicule et de briques représentatives des différents organes du GMP. La stratégie de gestion de l'énergie est assurée par le composant ECMS qui optimise les flux d'énergie mécanique et électrique pour minimiser la consommation globale, à chaque instant [6].

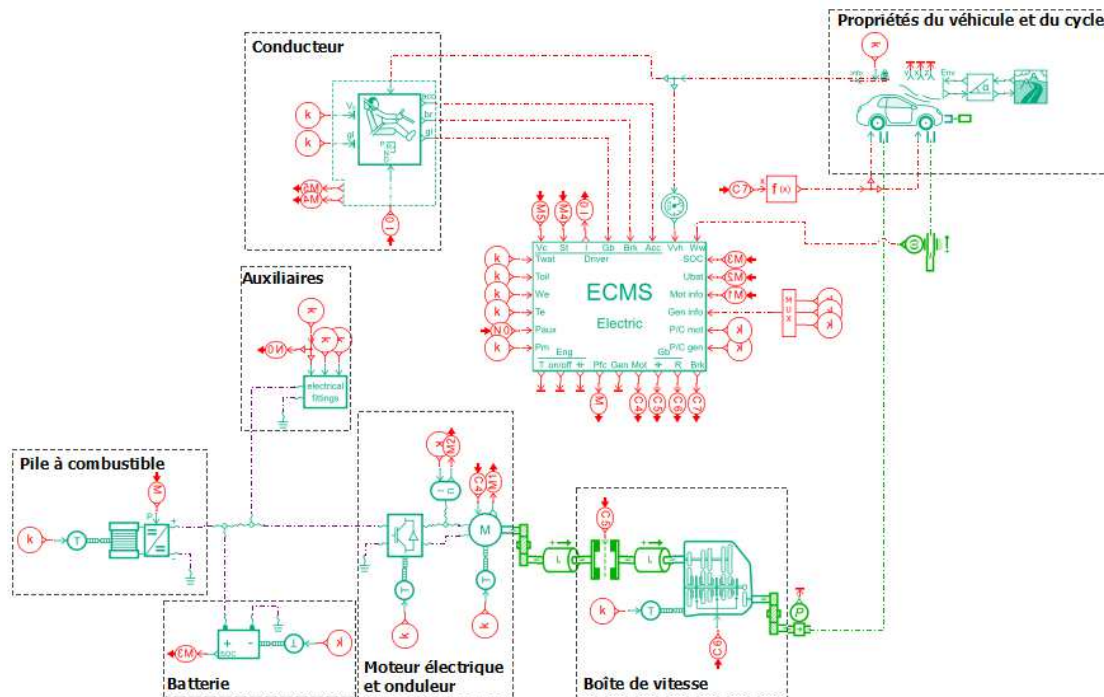


Figure 6 : Exemple de modèle Simcenter Amesim pour la simulation d'un véhicule à pile à combustible

2.1.8. Masse des composants

La masse totale d'un véhicule est impactée par le dimensionnement des éléments du GMP. Les hypothèses de densité d'énergie et de puissance qui ont été retenues pour cette étude sont récapitulées dans le Tableau 1. S'agissant de véhicules lourds, l'impact de ces hypothèses est relativement faible sur la consommation globale, car l'essentiel de la masse du véhicule est représenté par la carrosse et le chargement en marchandises ou en passagers. Ces valeurs sont donc données à titre indicatif. Il s'agit des mêmes hypothèses que celles adoptées dans [7].

Réservoir H2	1900 Wh _{PCI} /kg _{Réservoir} 0,057kg _{H2} /kg _{Réservoir}
Batterie	150 Wh/kg _{pack}
Electronique de puissance	10 kW/kg
Moteur thermique	0,45 kW/kg
Moteur électrique	2,5 kW/kg
Pile à combustible	0,65 kW/kg _{Système}

Tableau 1 : Hypothèses de densité gravimétrique

2.2. Coût total de possession

La transition énergétique du secteur des transports nécessite de profondes mutations comportementales et technologiques, dont les premières démonstrations sont déjà visibles. L'hydrogène est un élément central de cette trajectoire de transition, source d'espoir d'une mobilité décarbonée mais aussi d'inquiétudes sur sa faisabilité technique et son coût économique. Le TCO (Total Cost of Ownership), ou Coût Total de Possession, est un indicateur permettant d'apporter des réponses à la question du coût économique du passage à une mobilité basée sur l'hydrogène, et de mettre en avant les changements de structures de coûts, et donc de pratique des opérateurs, induits par le passage du Diesel à l'hydrogène.

Le TCO permet d'agrèger l'ensemble des coûts assumés par l'opérateur d'un véhicule, de l'investissement initial à la dépense énergétique à chaque utilisation sur l'ensemble de la durée de vie du véhicule. Son emploi est particulièrement pertinent dans ce contexte où les variations de dépense peuvent venir de différents postes de coût tels que la consommation d'énergie (passage du gazole à l'hydrogène) ou l'investissement initial (poids majeur de la pile à combustible).

Les coûts liés à la main d'œuvre sont exclus du périmètre de l'étude, pour tous les types de véhicules étudiés. De même la monétisation des externalités environnementales n'a pas été réalisée ici.

Le bonus écologique, mis en place actuellement au niveau français pour favoriser la pénétration du véhicule à hydrogène à pile à combustible est pris en compte, en revanche le dispositif de suramortissement ne l'est pas.

2.2.1. L'indicateur TCO

Le calcul économique s'effectue sur la vie du véhicule (avant sa revente ou sa destruction) en quatre étapes successives (voir Figure 7).

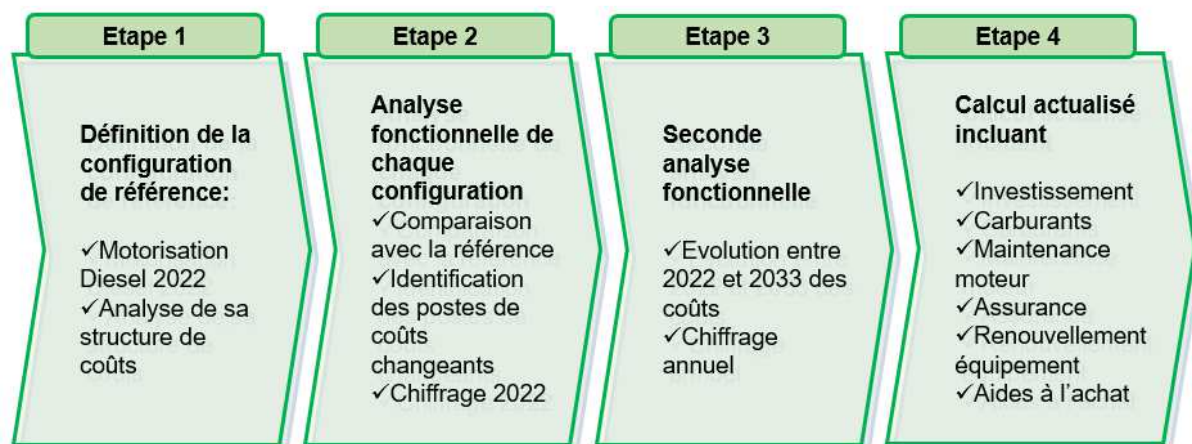


Figure 7 : Détail des étapes de calcul pour arriver au TCO

Etape 1 : Le point de départ est la configuration de référence, c'est-à-dire la motorisation thermique la plus répandue sur le marché, pour laquelle les informations requises sont les plus disponibles. La motorisation thermique Diesel est la référence sur l'ensemble des segments de cette étude. Une fois connu le prix de vente, on décompose via une approche *bottom-up* les coûts de fabrication des composants ainsi que les charges indirectes. Il est à noter qu'une analyse bibliographique approfondie a permis de valider les prix des véhicules en 2020, notamment en ce qui concerne les bus ou les poids lourds, pour lesquels les prix d'achat sont rarement répertoriés sur le web. On peut citer par exemple l'étude de T&E [8].

Etape 2 : Les autres configurations (motorisations alternatives) sont étudiées une à une en observant les principales différences avec la configuration de référence (puissance, batterie, réservoir, ...). On identifie ainsi les postes de coûts changeants et on établit un chiffrage pour 2020.

Etape 3 : A partir d'un jeu d'hypothèses sur l'évolution des coûts des différents postes (batteries, pile à combustible), on prend en compte l'évolution des coûts annuels sur la durée de vie des véhicules (énergie, renouvellement). Notamment la baisse significative du coût de l'hydrogène sur les douze prochaines années est prise en compte dans le calcul du TCO. Ces variations de coûts entre 2022 et 2033 sont tirées de dire d'experts et de données issues de ressources bibliographiques sélectionnées. On peut citer, pour les éléments liés à la pile à combustible, l'étude de Ricardo [9] et pour l'évolution du prix de l'hydrogène, les travaux de France Hydrogène Mobilité [10].

Etape 4 : On effectue un calcul actualisé (TCO) en intégrant l'ensemble des coûts liés à l'opération, la maintenance et les aides à l'achat.

La dernière étape est le calcul du TCO, selon la formule suivante :

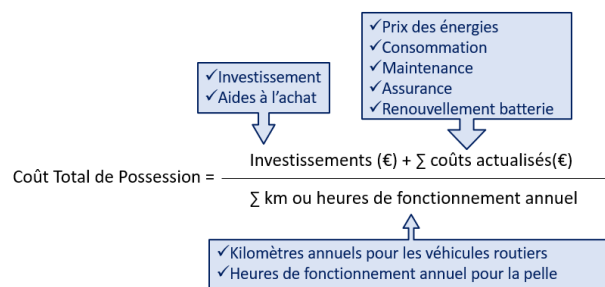


Figure 8 : Calcul du TCO

L'ensemble du TCO est actualisé à un taux de 5%, et le taux d'inflation est fixé à 0 (calcul en euros constants).

2.2.2. Structure de coût des véhicules

Afin d'évaluer le prix de vente des différents véhicules de l'étude, une approche *bottom-up* (Figure 9) a été utilisée. Le coût des technologies spécifiques de chacun des véhicules a ainsi été ajouté au coût du châssis et de la carrosserie, qui dépendent du type de véhicule considéré. D'autres postes ont également été modélisés, comme par exemple les frais d'infrastructure, les charges de personnel, les frais de marketing ou du réseau commercial.

Les données utilisées pour établir cette décomposition des coûts proviennent de plusieurs sources :

- Pour les coûts qui concernent les charges de personnel, d'infrastructures et de marketing, une revue bibliographique spécifique a été effectuée. Les informations sur les coûts des poids lourds (PL) et bus ont notamment été tirées de rapports publiés par la Centrale d'Achat du Transport Public [11] ou par l'ADEME [12]. Les coûts associés à l'autocar régional proviennent de l'étude de Preda et al. [13].
- Les coûts des composants (turbocompresseur, FAP, SCR...) proviennent là encore de plusieurs sources, mais aussi d'informations d'experts IFPEN. Parmi les documents utilisés on peut citer les rapports de Ricardo [14] ou du BEUC [15].

Le cas de la pelle sur chenilles de 75 tonnes est particulier puisque nous n'avons pas réussi à récupérer les coûts de maintenance et assurance, nous ne prenons donc en compte que les coûts liés à la dépense énergétique et à l'investissement, récupérés auprès d'experts IFPEN, et procéderons à une analyse différentielle par rapport à la configuration de référence fonctionnant au Diesel.

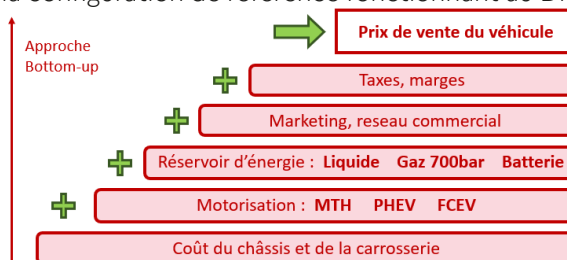


Figure 9 : Représentation de l'approche bottom-up utilisée pour déterminer le prix de vente des véhicules

2.2.3. Segments et motorisations étudiés

De nombreux cas sont traités dans cette étude, pour le poids lourd 44 tonnes, le bus articulé de 18 mètres, l'autocar régional et la pelle sur chenilles de 75 tonnes. Chaque véhicule est ensuite décomposé en différentes architectures (GMP) : thermique conventionnel, électrique à pile à combustible et hybride thermique-électrique. A chaque architecture sont ensuite associées différentes « tailles » de pile à combustible, moteur électrique, et batterie. Pour chaque combinaison, les calculs de TCO sont effectués avec des hypothèses de rendement moteur thermique et PàC différents.

Toutes les hypothèses (poids, taille, autonomie...) pour chacun de ces véhicules ont été fixées dans le cadre de l'analyse énergétique. L'analyse TCO s'appuie ainsi sur les calculs de consommation effectués dans ces parties. De même, les hypothèses concernant la capacité des batteries, la puissance des motorisations (thermique ou électrique) pour chacun des véhicules ont été directement intégrées dans le calcul du TCO.

La matrice de cas élargie permet de prendre en considération la majorité des véhicules qui seront a priori vendus et mis en circulation, sur l'horizon de temps considéré.

2.2.4. Coûts associés au GMP

2.2.4.1. Coût moteur électrique et thermique

Le coût des moteurs thermiques (MTH) dépend essentiellement de leur puissance (exprimée en kW), du carburant utilisé (gazole, hydrogène) mais aussi du niveau de technologie embarquée (turbocompresseur, système de post-traitement, réservoir associé...). Le coût du moteur thermique d'aujourd'hui se situe à 23 €/kW. A cela il faut donc ajouter les prix des composants techniques du système de post-traitement ainsi que du réservoir, au coût significatif pour l'hydrogène stocké à 700bar (hypothèse : 500€/kgH₂).

En ce qui concerne les moteurs électriques, la montée en force des véhicules électriques s'accompagne d'une baisse de coût régulière. Le système global (moteur électrique avec l'électronique de puissance) est fixé à 25€/kW en 2022.

2.2.4.2. Coût Pile à combustible

Le coût de la pile à combustible (FC) est fonction de sa puissance, et dépend fortement de la filière de production, étant donnée la faible maturité industrielle de cet élément. On retrouve dans la littérature et à travers les dires des quelques exploitants de solutions FCEV (Fuel Cell Electric Vehicle) actuels, des valeurs allant de 900€/kW lorsque la production est réalisée en petits volumes, à 300€/kW pour de la production à l'échelle industrielle. La valeur de 300€/kW est retenue pour l'analyse TCO pour le PL et 500€/kW pour les autres véhicules, mais une analyse de sensibilité sur le coût de la FC est réalisée pour plusieurs des véhicules étudiés.

2.2.4.3. Coût batterie

Le coût des batteries est un composant important du prix total des véhicules électrifiés. Les constructeurs font généralement un compromis entre une capacité de batterie élevée (et donc une autonomie importante) et un prix de vente raisonnable. Il est démontré que les progrès techniques de ces dernières années devraient encore se poursuivre et continuer à abaisser progressivement le coût des batteries d'ici 2035.

Plusieurs études ont été analysées afin d'établir un coût pour le kWh généré par une batterie en 2020 et en 2035. On peut citer par exemple l'étude de *Bloomberg New Energy Finance* qui donne un prix inférieur à 60 \$/kWh en 2040 [16], le papier de Nykvist et al. [17] qui annonce un prix inférieur à 50\$/kWh ou celle de l'*European Climate Foundation* [18] qui prévoit un prix du pack batterie plutôt entre 82 et 100€/kWh, voir Figure 10. Un scénario intermédiaire a été utilisé pour cette étude, avec des coûts de pack batterie s'élevant à 200€/kWh en 2020 et 125 €/kWh en 2035.

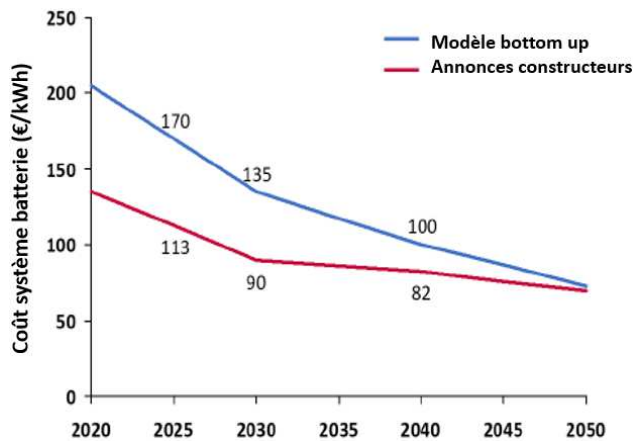


Figure 10 : Scenarios de prix des batteries (pack complet) entre 2020 et 2050 (source : [18])

Que ce soit pour la batterie ou pour la pile à combustible, l'investissement est déterminé par leur coût en 2022. En revanche la connaissance de l'évolution de ce coût sur la durée de vie des véhicules est nécessaire à la prise en compte du renouvellement de ces éléments. En effet les technologies actuelles ne permettent d'utiliser ces éléments que quelques années, moins longtemps que les durées de vie des véhicules considérés ici (hormis la pelle sur chenilles). Le renouvellement de ces éléments intervient donc dès que la durée de vie véhicule est supérieure à la durée de vie FC/batterie, et son coût correspond au coût des éléments projeté à l'année du renouvellement.

2.2.5. Autres coûts

2.2.5.1. Coût des énergies

Dans le calcul du TCO, la consommation de carburant (ou d'électricité) représente un poste très important. Il convient donc de faire des hypothèses sur le prix du litre de gazole ou du kilogramme d'hydrogène et sur le prix du MWh électrique de 2022 à 2033. L'évolution du prix des carburants fossiles prend en compte l'évolution du prix du brut et l'évolution de la fiscalité sur les carburants routiers. Pour rappel, la fiscalité sur les carburants utilisés par les véhicules étudiés ici est différente de celle des véhicules particuliers, ce qui est pris en compte. En particulier, les prix sont hors TVA.

Le prix du gazole est fixé à 1,00 €/L en 2022, et augmente régulièrement pour atteindre 1,41 €/L en 2033. Le prix du gazole à la pompe variant très régulièrement, les valeurs retenues ici n'ont pas vocation à suivre ces évolutions temporaires liées aux fluctuations sur les marchés de l'énergie, mais de représenter des tendances de plus longue durée.

En ce qui concerne le prix de l'électricité, nous postulons une hausse linéaire d'ici 2050 pour atteindre un prix de 200 €/MWh, en partant de 130 €/MWh en 2022. On rappelle qu'il s'agit ici de prix final correspondant à celui payé par l'utilisateur, et non de coût de production.

Enfin, au sujet de l'hydrogène, trois types d'hydrogène sont considérés : de l'hydrogène carboné produit par vaporeformage du méthane, et deux types d'hydrogène renouvelable produit par électrolyse de l'eau avec de l'électricité renouvelable. L'hydrogène renouvelable dit « local » correspond à un schéma d'approvisionnement où de petits électrolyseurs sont directement situés aux stations de recharge. Les volumes produits sont relativement faibles mais il n'y a pas de coût de transport à prendre en compte. Un second schéma correspond à l'hydrogène renouvelable dit « central », où l'hydrogène est produit en plus gros volumes sur de gros électrolyseurs puis distribué vers différentes stations de recharge à quelques dizaines de kilomètres à la ronde.

L'analyse de plusieurs études donne un prix de l'hydrogène renouvelable à la station autour de 4€/kg en 2050, contre 12€/kg aujourd'hui. On peut par exemple citer le tout récent rapport de RTE [19] qui donne un prix de l'hydrogène renouvelable à 3.6€/kg en 2050. Le prix de l'hydrogène carboné est fixé à 3€/kg, correspondant à la situation actuelle. Il n'a pas vocation à représenter une réalité marché évoluant avec le prix du gaz qui en est la matière première, puisqu'il n'est pas envisagé comme une solution pour la décarbonation de la mobilité lourde, mais d'offrir un élément fixe de comparaison notamment pour les analyses de sensibilité.

Les prix retenus pour les différents types d'hydrogène sont présentés sur la Figure 11.

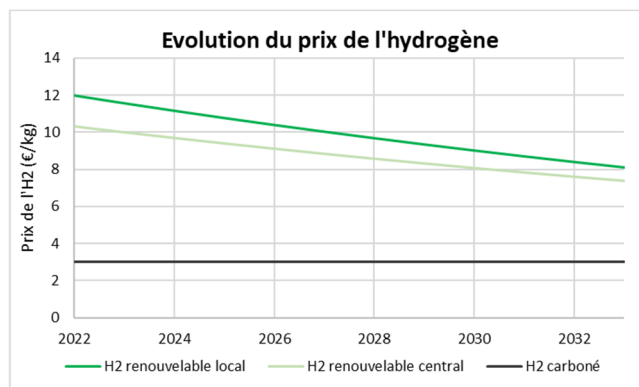


Figure 11 : Evolution du prix de l'hydrogène

2.2.5.2. Assurance et maintenance

Les frais de maintenance sont annualisés et dépendent à la fois du type de véhicule, de la motorisation et du kilométrage annuel [11,13].

La prime d'assurance dépend du véhicule et de la motorisation. Les valeurs utilisées dans les simulations proviennent à encore de différentes sources bibliographiques. Les sources européennes et françaises ont été privilégiées [20].

Pour les poids lourds, la prime d'assurance est fixée à 1,5% du prix annuel de vente neuf. Pour le bus et l'autocar, une valeur moyenne européenne est considérée. L'ensemble des valeurs considérées pour l'assurance et la maintenance sont précisées dans le Tableau 2 ci-dessous.

		Maintenance	Assurance
Poids lourd	MTH	0,07 €/km	1,5 % prix de vente / an
	FCEV	0,13 €/km	3 % prix de vente / an
Bus 18m	MTH	0,28 €/km	2650 €/an
	FCEV	0,5 €/km	3180 €/an
Autocar	MTH	0,2 €/km	9 900 €/an
	FCEV	0,5 €/km	11 800 €/an

Tableau 2 : Hypothèses de maintenance et assurance pour les différents véhicules

2.2.5.3. Aides à l'achat

Une aide à l'achat de 50 000€ pour les poids lourds et de 30 000€ pour les bus et autocars à pile à combustible a été considérée, correspondant à la législation française en 2022. Ce bonus à l'achat pour les véhicules lourds électriques à pile à combustible ou à batterie a été mis en place dans le cadre du plan France Relance et sera en cours au moins jusqu'au 31 décembre 2022.

2.3. Analyse du cycle de vie

L'objectif est d'évaluer les impacts environnementaux du poids lourd 44 tonnes et du bus articulé de 18 mètres à l'horizon actuel, en prenant en compte à la fois le cycle de vie véhicule et le cycle de vie carburant.

Une Analyse du Cycle de Vie (ACV) du poids lourd 44 tonnes et du bus articulé de 18 mètres couplés aux technologies de propulsion (moteur thermique, hybride, électrique) et à leurs vecteurs énergétiques associés (carburants fossiles et hydrogène) permet de comparer les différentes options technologiques envisagées, en fonction de l'usage et d'identifier celles les plus adaptées aux différents contextes. Cette étude a pour but en particulier de comparer les émissions de gaz à effet de serre (GES) de trois technologies qui utilisent l'hydrogène comme vecteur énergétique : le GMP électrique à pile à combustible, le GMP thermique fonctionnant à l'hydrogène et le GMP hybride thermique-électrique fonctionnant à l'hydrogène. Ces émissions sont également comparées à celles du véhicule Diesel « équivalent ».

L'ACV a été réalisée conformément aux normes ISO 14040 & 14044 à l'aide du logiciel commercial d'ACV 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* ».

2.3.1. Définition du système

2.3.1.1. Description des véhicules étudiés

Pour chaque catégorie de véhicule, des scénarios de durée de vie de véhicules, de batteries, de pile à combustible et de kilométrage annuel ont été réalisés (Tableau 3).

	Poids lourd 44 T	Bus 18 m
Durée de vie des véhicules	12 ans (1 080 000 km)	12 ans (480 000 km)
Durée de vie des batteries	6 ans	6ans
Durée de vie des piles à combustible	6 ans	6 ans
Kilométrage annuel des véhicules	90 000 km	40 000 km

Tableau 3 : Scénarios durée de vie des véhicules, batteries, piles à combustible et kilométrage annuel

Pour le poids lourd 44 tonnes, les performances environnementales de plusieurs motorisations sont comparées :

- GMP thermique conventionnel (Diesel et hydrogène)
- GMP hybride thermique-électrique (hydrogène)
- GMP électrique à pile à combustible.

Pour le bus articulé de 18 mètres, le GMP hybride thermique-électrique n'est pas considéré dans l'étude.

Dans le Tableau 4 se trouvent les différentes architectures étudiées pour cette analyse environnementale.

Version :	Poids lourd 44t	Bus 18m
A moteur thermique à hydrogène	MTH 410 kW	MTH 250 kW
Hybride rechargeable à moteur H2	MTH 350 kW, MEL 65 kW, BAT 25 kWh	<i>Non considéré</i>
A pile à combustible (hypothèse 1 : 65% de rendement pic)	FC 225 kW, BAT 75 kWh	FC 90 kW, BAT 50 kWh
A pile à combustible (hypothèse 2 : 55% de rendement pic)	FC 225 kW, BAT 75 kWh	FC 90 kW, BAT 50 kWh
Version Diesel	MTH 410 kW	MTH 250 kW

Tableau 4 : Architectures étudiées pour l'analyse ACV

On fait ici l'hypothèse que les véhicules sont assemblés en France et également utilisés en France. Le bus et le poids lourds ont été modélisés d'après les données concernant les poids des véhicules de la partie traitant de l'évaluation de la consommation énergétique, selon le découpage suivant :

- Carcasse du véhicule
- Moteur thermique
- Moteur électrique
- Pile à combustible
- Batterie.

Le choix des matériaux utilisés ainsi que leur mise en forme pour la modélisation des bus mais aussi des poids lourds sont basés sur le procédé Ecoinvent « bus, production RER (Region Europe) ».

La consommation d'énergie et de chaleur pour la fabrication des véhicules est basée sur le procédé Ecoinvent « bus, production RER ». Un rendement de 70 % pour la conversion du gaz naturel en chaleur a été considéré.

La durée de vie des poids lourds 44 tonnes est supposée égale à 12 ans à raison de 90 000 km / an, soit 1 080 000 km sur leur cycle de vie. La durée de vie des bus articulés 18 mètres est supposée égale à 12 ans à raison de 40 000 km / an, soit 480 000 km sur leur cycle de vie.

2.3.1.2. Pneus

Le poids et la composition des pneus des bus et des poids lourds sont tirés de la présentation d'Iveco Irisbus [21]. Leur composition est basée sur le rapport IMPRO CAR I « Environmental Improvement of Passengers Cars » du JRC [22].

La durée de vie des pneus du poids lourd ou du bus est supposée égale à 120 000 km.

Le nombre de pneus d'un bus articulé de 18 m est pris égal à 10 (3 essieux dont 2 essieux arrière avec roues jumelées).

Le nombre de pneus d'un poids lourd 44 tonnes long-routier est pris égal à 12.

2.3.1.3. Batteries

Les batteries sont modélisées d'après le rapport ADEME/Sphera « Analyse du cycle de vie relative à l'hydrogène » de septembre 2020 [23] et le modèle GREET en considérant la technologie Lithium-ion NMC622 [24].

On considère que les batteries sont produites en Chine. Les émissions de gaz à effet de serre associées à leur production sont de 109 kg CO₂ eq. / kWh (sans fin de vie) et 96 kg CO₂ eq. / kWh (avec fin de vie) de batterie modélisée (méthode EF 3.0 avec base de données Ecoinvent 3.8). Dans notre étude, la valeur comprenant la fin de vie de la batterie est utilisée.

La durée de vie des batteries est supposée égale à 6 ans pour les bus et les poids lourds.

2.3.1.4. Pile à combustible

Un module PàC (Pile à combustible) comprend :

- Le stack, constitué d'un assemblage d'un certain nombre de cellules
- Les équipements auxiliaires de la PàC
- auxquels on ajoute un système de stockage d'hydrogène (22,8 kg CO₂ eq/ kg réservoir avec 33,1 kg CO₂ eq / kg de fibre).

Dans cette étude, seule la technologie de pile à membrane échangeuse de protons (PEMFC) a été considérée.

Dans le Tableau 5 se trouvent les résultats de la modélisation du module PàC pour cette étude. Les hypothèses principales sont :

- 0,44 g Pt/kW de cellule [25]
- 225 W/cellule.

	Modélisation IFPEN TranplHyn
Impact (kg CO ₂ eq / 100 kW)	4 090
Contribution du Platine (%)	74,5
Impact platine (kg CO ₂ eq / kg Pt)	69 480

Tableau 5 : Modélisation de la pile à combustible

2.3.1.5. Vecteur énergétique hydrogène

Dans cette étude, on considère une production d'hydrogène par électrolyse PEM (*Polymer electrolyte membrane*) en France. On ne considère pas les électrolyseurs SOEC (*Solid Oxide Electrolyzer Cell*). La

modélisation a été réalisée grâce à plusieurs sources de données (Données ADEME ; Bareiß 2019 ; Zhao 2018) [23,26,27].

Dans la modélisation de la production d'hydrogène (Figure 12), on considère :

- L'électrolyseur
- Les accessoires de l'électrolyseur
- L'électricité (deux scénarii)
- L'eau utilisée
- La compression de l'hydrogène de 30 bar à 200 bar à la sortie de l'électrolyseur pour son transport : 1,7 kWh / kg H2 (hypothèse ADEME et FCH-JU) [23,28]
- Le transport de l'hydrogène sur 50 km (hypothèse ADEME) [23]
- La compression de l'H2 à 880 bars (hypothèse JEC v5 2020) [29] à la station-service.

Dans cette étude, on considère deux scénarii pour l'électrolyse :

- Un premier scénario dans lequel l'hydrogène est produit avec de l'électricité provenant du mix électrique français (données ADEME 59.9 g CO2 eq. / kWh)
- Un second scénario dans lequel l'hydrogène est produit à partir d'électricité à base d'éolien (Procédé El 3.8 Electricity, high voltage {FR}) electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore : 15,7 g CO2 eq./kWh (méthode EF 3.0)).

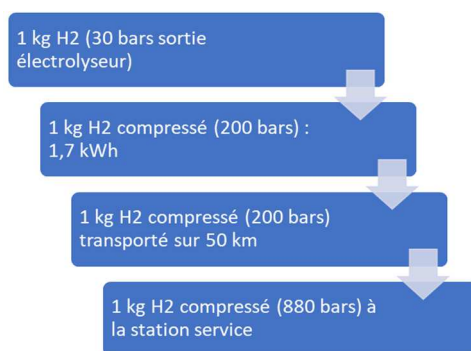


Figure 12 : Modélisation de la production d'hydrogène

En résultat, on obtient 3,66 kg CO2 eq. / kg H2 pour de l'hydrogène produit à partir de l'électricité provenant du mix électrique français.

Pour information, la dernière version du JEC v5 2020 [29] donne 175,2 g CO2 eq. /MJ H2 pour une production EU 2016 [filière EMEL2/CH1a 2016] ce qui correspond donc à 21 kg CO2 eq. /kg H2. Par conséquent, la valeur JEC v5 2020 pour la production d'hydrogène en France serait proche de celle de cette étude en prenant en compte le rapport entre le contenu carbone du mix électrique et celui du mix européen.

On retrouve dans le Tableau 6, les valeurs d'émissions de GES pour la production d'hydrogène pour les deux scénarios. Ces valeurs confirment qu'une grande partie des émissions de GES dépend de la qualité du mix électrique utilisé. En effet dans le cas de l'utilisation du mix électrique français, les émissions liées à son utilisation représentent 90% des émissions de la production d'hydrogène. Pour information, pour de l'hydrogène SMR (Steam Methane Reforming) en Europe, la valeur d'émissions GES est de 9,5 kg CO2-eq / kg H2. Dans cette étude, ce moyen de production de l'hydrogène n'est pas considéré. Toutefois en se référant à cette valeur d'émissions, cette technologie ne semble pas pertinente dans un objectif de réduction des émissions de GES.

	H2 bas carbone (mix FR ADEME)	H2 renouvelable (éolien)
Impact mix électrique	59,9 g CO2 eq./kWh	15,7 g CO2 eq./kWh
Impact production H2	3,66 kg CO2 eq./kg H2	1,12 kg CO2 eq./kg H2

Tableau 6 : Valeurs d'émissions GES pour la production d'hydrogène

2.3.1.6. Gazole

Le gazole est modélisé d'après la donnée Ecoinvent « Petrol, low-sulfur {Europe without Switzerland} market for | Alloc Rec, U » et « Diesel, low-sulfur {Europe without Switzerland} market for | Alloc Rec, U ».

2.3.1.7. Consommations des véhicules

Les consommations du poids lourd 44 tonnes et du bus articulé de 18 mètres sont celles issues de l'évaluation de la consommation énergétique de la présente étude. On retrouve dans le Tableau 7 les différentes valeurs de consommations utilisées pour l'évaluation ACV.

	Poids lourd 44T		Bus 18m	
	Architecture	Consommation	Architecture	Consommation
VTH H2	MTH-410	10,2 kgH2/100km	MTH-250	10 kgH2/100km
PHEV H2	MTH-350 MEL-65 BAT-25	9,3 kgH2/100km	X	X
FCEV H2 - $\eta=55\%$	FC-225 BAT-75	8,0 kgH2/100km	FC-90 BAT-50	11,8 kgH2/100km
FCEV H2 - $\eta=65\%$	FC-225 BAT-75	7,0 kgH2/100km	FC-90 BAT-50	10,2 kgH2/100km
VTH Diesel	MTH-410	31,8L/100km	MTH-250	63,6L/100km

Tableau 7 : Valeurs des consommations selon les différentes architectures pour le poids lourd et le bus

2.3.1.8. Fin de vie

La fin de vie a été modélisée selon la méthode des impacts évités, prenant ainsi en compte les impacts environnementaux liés aux phases de valorisation ainsi que les impacts évités des matériaux valorisés.

Fin de vie des véhicules

Le scénario de fin de vie des véhicules est modélisé à partir du rapport de PE International et Gingko21 à destination de l'ADEME [30] : « Les constructeurs automobiles, membres du comité technique, nous ont transmis un scénario réaliste de recyclage des VHU post 2015 (France) et permettant l'atteinte des taux réglementaires ». Ainsi, la plupart des taux fournis concernant la proportion de recyclage, incinération, mise en décharge par type de matériaux a été réutilisée.

La Directive 2000/53/CE du Parlement européen et du Conseil du 18 septembre 2000 relative aux véhicules hors d'usages [32] a également été suivie. Le taux de collecte des véhicules hors d'usage (VHU) en 2010 (69 %) a été utilisé faute d'informations plus récentes. Les distances du détenteur au démolisseur puis du démolisseur au broyeur ont également été prises en compte.

Fin de vie des pneus

Le scénario de fin de vie des pneus s'appuie en partie sur une étude réalisée pour l'ADEME intitulée « Transport et logistique des déchets » parue en octobre 2014 [31]. Le taux de collecte des pneus est supposé identique à celui des VHU, de même que les caractéristiques logistiques liées à leur acheminement sur les différents sites. Les mêmes statistiques de déchets ont été utilisées afin de modéliser la part des matériaux partant en incinération ou en décharge.

Fin de vie des batteries

Dans cette étude, la fin de vie des batteries a été modélisée d'après deux techniques différentes considérées en proportion équivalente : le traitement hydrométallurgique et le traitement pyrométallurgique. Ces deux traitements sont basés sur les procédés Ecoinvent : « Used Li-ion battery {GLO} treatment of used Li-ion battery, hydrometallurgical treatment » et « Used Li-ion battery {GLO} treatment of used Li-ion battery, pyrometallurgical treatment ». En revanche, c'est la modélisation conséquentielle qui a été utilisée afin de définir des *scenarii* de fin de vie plausibles dans une optique de méthodologie des impacts évités.

2.3.2. Unité fonctionnelle

La norme ISO 14044 définit l'Unité Fonctionnelle comme « Performance quantifiée d'un système de produits, destinée à être utilisée comme unité de référence dans une ACV ». Cette unité fonctionnelle est nécessaire lorsque l'on souhaite comparer par exemple un poids lourd Diesel avec un poids lourd hydrogène.

Dans le cadre de cette étude, deux fonctions inhérentes aux véhicules étudiés sont identifiées : le transport de personnes et le transport de marchandises. En effet, les bus permettent de transporter un nombre de personnes sur une distance donnée dans un trafic particulier alors que les poids lourds permettent de transporter une quantité de marchandises sur une distance dans certaines conditions de trafic. Plusieurs types d'unités fonctionnelles peuvent être choisies.

Dans cette étude, l'unité fonctionnelle choisie pour le poids lourd 44t est la suivante :

« Transport de marchandises sur 90 000 km / an pendant 12 ans dans un contexte de trafic donné ».

L'unité fonctionnelle pour le bus est :

« Transport de personnes sur 40 000 km / an pendant 12 ans dans un contexte de trafic donné ».

Néanmoins, il serait aussi intéressant d'interpréter les résultats en fonction du taux d'occupation du bus et en fonction de la capacité de chargement des poids lourds.

2.3.3. Frontières du système

Les infrastructures et les routes ont été exclues du périmètre de l'étude. Les étapes considérées sont celles présentées dans la Figure 13. Sur l'axe horizontal, l'ensemble des étapes du cycle de production des carburants est pris en compte : de l'extraction des matières premières jusqu'au réservoir du véhicule (*Well to Tank*) à l'utilisation du carburant (*Tank to Wheel*). Sur l'axe vertical propre au véhicule, il y a deux composantes : le cycle de vie du véhicule et le fonctionnement véhicule via l'utilisation du carburant. L'étude menée est donc qualifiée du puits à la roue ou *Well to Wheel* (WtW) avec la prise en compte du cycle de vie véhicule en plus.

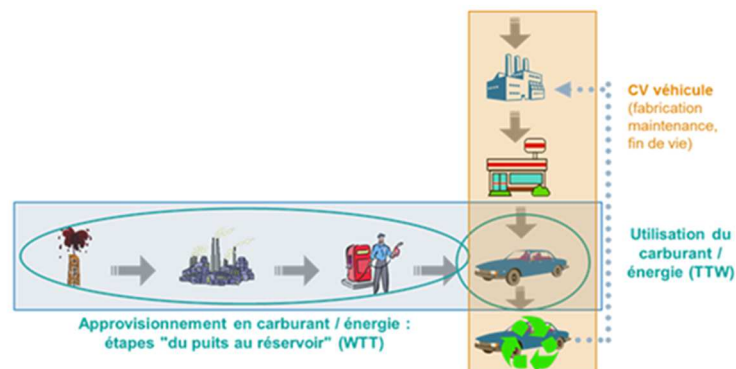


Figure 13 : Etapes considérées dans le périmètre WtW incluant le cycle de vie véhicule

2.3.4. Catégories d'impact et indicateurs

La méthode d'impact utilisée pour évaluer les indicateurs *midpoints* (orientés problèmes) est la méthode EF 3.0 préconisée par la Commission Européenne. Grâce à cette méthode, il est possible de quantifier à partir des flux entrants et sortants du système, les impacts environnementaux selon plusieurs indicateurs environnementaux tels que le potentiel de réchauffement climatique, le potentiel d'oxydation photochimique, le potentiel d'acidification de l'air, le potentiel d'eutrophisation des eaux, le potentiel d'épuisement des ressources abiotiques ou bien encore les émissions de particules. Dans cette étude, seuls les résultats sur l'indicateur de potentiel de réchauffement climatique sont présentés. Cet indicateur rend compte du forçage radiatif (« réchauffement ») causé par les émissions de gaz à effet de serre. La capacité d'un gaz à effet de serre à influencer le forçage radiatif, son potentiel de réchauffement, est exprimée par rapport à une substance de référence, le dioxyde de carbone.

3. Poids lourd 44 tonnes

En 2019 en France, les poids lourds et les bus ont été à l'origine de l'émission de 31 millions tonnes de CO₂ à l'échappement, soit 25% de la contribution du secteur transport, et environ 10% des émissions totales de CO₂ dans le pays [33]. La décarbonation des poids lourds est donc un sujet important pour la lutte contre le changement climatique. Parmi les nombreuses classes de poids lourds qui existent, c'est le poids lourd long-routier de 44 tonnes qui est étudié ici.

3.1. Variantes considérées et mise en données

Les données véhicules sont récapitulées dans le Tableau 8. La mise en données a été effectuée pour être représentative d'un véhicule récent. Les résultats de consommation pour la configuration de référence Diesel doivent permettre de valider ces hypothèses.

SCx	5,7 m ²
Crr	6 kg/t
Masse carcasse (dont remorque vide)	13 728 kg
Pneus	315/80 R22,5

Tableau 8 : Hypothèses véhicules pour le poids lourd 44 tonnes

Les poids lourds doivent remplir des missions de transport de marchandises dans des durées restreintes. Leur système de propulsion doit donc permettre d'atteindre des vitesses minimales raisonnables en fonction de la pente de la route. Pour cette étude, le cahier des charges suivant a été retenu :

- 90 km/h sur route plate (0% de pente)
- 50 km/h à 5% de pente
- 10 km/h à 12% de pente (batterie vide).

Le Tableau 9 récapitule la réponse au cahier des charges des configurations étudiées dans cette partie de l'étude². Seules les configurations avec une pile à combustible de 150kW ne répondent pas aux prérequis et ne seront donc pas simulées sur les cycles de conduite.

Dans ce tableau, les résultats sont donnés pour une batterie pleine et une batterie vide. Lorsque l'état de charge de la batterie n'est pas minimal, la batterie peut assister la pile à combustible pour fournir de l'énergie au moteur électrique, alors que lorsque l'état de charge est minimal, le moteur électrique n'est plus alimenté que par la pile à combustible. Ainsi, les performances sont réduites lorsque la batterie est déchargée. Les performances à 8% de pente sont également récapitulées dans le tableau suivant (Tableau 10).

Variantes FCEV BAT-50	FC-150	FC-225	FC-300	FC-375	FC-450
Vitesse maximale à 12% de pente avec chargement maximal	24km/h (7,6km/h)	24km/h (12,3km/h)	24km/h (16,9km/h)	24km/h (21,5km/h)	24km/h (24km/h)
Vitesse maximale à 5% de pente avec chargement maximal	53,1km/h (19,1km/h)	53,1km/h (29km/h)	53,1km/h (38,7km/h)	53,1km/h (47,9km/h)	53,1km/h (53,1km/h)
Vitesse maximale à 0% de pente avec chargement maximal	>90km/h (>90km/h)	>90km/h (>90km/h)	>90km/h (>90km/h)	>90km/h (>90km/h)	>90km/h (>90km/h)

Tableau 9 : Evaluation des critères du cahier des charges pour les poids lourd 44 tonnes à pile à combustible (entre parenthèses, les performances batterie vide)

² Pour la désignation des configurations de GMP, on se réfèrera au début du chapitre 2.

Variantes FCEV BAT-50	FC-150	FC-225	FC-300	FC-375	FC-450
Pente maximale à 80km/h avec chargement maximal	2,98% (0,4%)	2,98% (1,09%)	2,98% (1,79%)	2,98% (2,49%)	2,98% (2,98%)
Vitesse maximale à 8% de pente avec chargement maximal	35,7km/h (11,9km/h)	35,7km/h (18,7km/h)	35,7km/h (25,2km/h)	35,7km/h (31,6km/h)	35,7km/h (35,7km/h)

Tableau 10 : Performances à 8% de pente pour les poids lourds 44 tonnes à pile à combustible (entre parenthèses, les performances batterie vide)

Nous pouvons d'ores et déjà discriminer des configurations, au regard de ce cahier des charges. En effet, les configurations FC-150 ne permettent pas d'atteindre les vitesses cibles à 12% de pente, batterie vide. Elles ne seront donc pas évaluées dans la suite de l'étude.

Quatre puissances de pile à combustible ont été considérées pour le poids lourd 44 tonnes, avec un module de base de 75kW. Les systèmes à 3, 4, 5 et 6 modules ont été évalués. La masse des véhicules correspondants, en fonction de la taille de la batterie, est illustrée dans la Figure 14. Les tableaux de valeurs détaillés sont disponibles dans la Figure 49, ANNEXE 2. Il est intéressant de noter que la plage de variation de la masse à vide est finalement assez faible, de l'ordre de la tonne entre la configuration la plus légère et la plus lourde. Ainsi, pour l'étude économique, l'impact de la modification de la charge utile en fonction de la configuration sera négligé. Le chargement moyen considéré est de 19.3t.

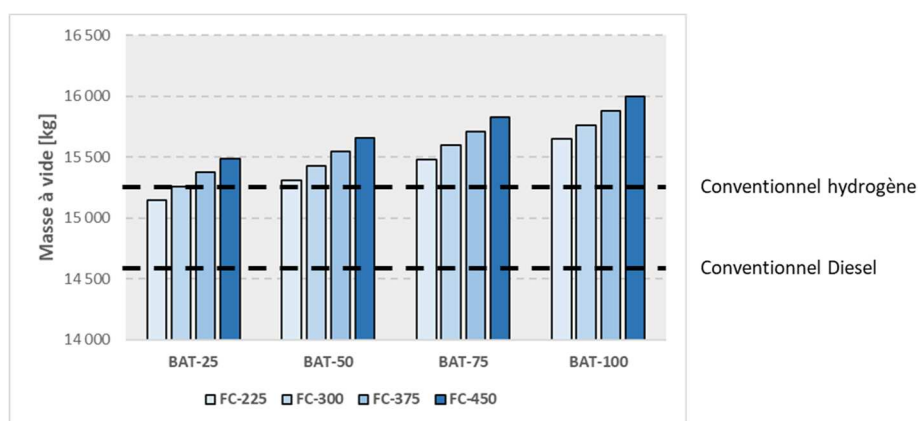


Figure 14 : Masse à vide des configurations de poids lourds 44 tonnes

3.2. Evaluation sur cycle

3.2.1. Consommation énergétique

Pour l'évaluation de la consommation énergétique des véhicules, des cycles d'usage doivent être définis. Des cycles de l'outil européen VECTO [34] ont été utilisés. Les trois cycles retenus pour le poids lourd 44 tonnes sont le *Urban Delivery* (Figure 39, ANNEXE 1), *Regional Delivery* (Figure 40, ANNEXE 1) et *Longhaul* (Figure 41, ANNEXE 1).

Le cycle urbain n'est pas tout à fait représentatif d'un usage long-routier, de même que le cycle régional, mais ces cycles ont été ajoutés pour prendre en compte certaines portions de route congestionnées. En effet, le cycle long-routier est assez optimiste avec un roulage quasi-constant à 90 km/h. La consommation de chacune des variantes a donc été évaluée sur les trois cycles, sans chargement, puis avec le chargement moyen de 19.3t, soit 6 cycles par variante. A chaque fois, un cycle en épuisement de charge de la batterie et un cycle en maintien de charge ont été simulés, afin de prendre en compte un départ batterie pleine et une arrivée batterie vide avec une phase de maintien de charge. Pour rappel, comme évoqué dans le chapitre de méthodologie, les véhicules sont considérés comme rechargeables (*plug-in*).

En plus de la consommation d'énergie nécessaire à l'avancement du véhicule, une consommation auxiliaire constante de 4kW a été prise en compte pour toutes les variantes simulées.

Une fois les 6 consommations établies, une pondération est appliquée pour obtenir un score global pour chaque variante. La pondération proposée dans cette étude est illustrée dans le Tableau 11.

Sans chargement			Avec chargement de 19,3t			Total
Urban	Regional	Longhaul	Urban	Regional	Longhaul	
2%	3%	24%	4%	7%	60%	100%

Tableau 11 : Pondération de référence pour le calcul de la consommation moyenne des poids lourds 44 tonnes dans ce rapport

Cette pondération est indicative. Les résultats de simulation sur chacun des cycles sont récapitulés dans les Tableau 22, Tableau 23, Tableau 24, Tableau 26 de l'ANNEXE 2, de manière à permettre d'évaluer des scores de consommation en fonction d'usages spécifiques en considérant d'autres pondérations. Le lecteur ne désirant pas prendre en compte la recharge électrique de la batterie sur borne pourra considérer uniquement les résultats sur les cycles en maintien de charge.

En plus des cycles VECTO, qui sont des cycles de référence, des trajets réels ont également été simulés. Ceux-ci ont été générés à partir d'un service web, développé et hébergé sur la plateforme Mobicloud par IFPEN. Ce service permet de créer une trace de vitesse cible en fonction de la distance parcourue sur un trajet donné. Les tracés générés et les traces de vitesse correspondantes sont illustrés dans les figures de l'ANNEXE 1.

Le trajet Paris-Lille est essentiellement autoroutier, cf. Figure 44, donc les résultats de simulation devraient être proches des résultats sur le cycle VECTO *Longhaul*.

Le trajet Rennes-Strasbourg a un profil entre le cycle VECTO long-routier et le régional, cf. Figure 45, du fait des conditions de trafic au moment de la génération de la trace de vitesse. Du reste, ce trajet est relativement plat.

Le trajet Bordeaux-Strasbourg traverse une zone montagneuse et est relativement long, cf. Figure 46.

Enfin, un dernier trajet visant à inclure une zone à forte pente a été généré. Il s'agit du trajet entre Lyon et Milan par l'A40 et le tunnel du Mont-Blanc, présenté en Figure 47. Il s'agit d'un usage extrême, qui donne une information intéressante sur l'écart entre l'usage moyen défini par la pondération des cycles VECTO, et l'usage extrême en zone montagneuse.

La consommation du véhicule Diesel de référence simulée sur les cycles VECTO est de 31.8L/100km, et est très proche de la consommation moyenne relevée par le Comité National Routier en 2019 sur le parc de poids lourd 44 tonnes français, soit 31.4L/100km [35].

Les consommations pondérées des différentes variantes à pile à combustible sont récapitulées dans la Figure 15. On peut constater que l'ensemble de ces variantes tient dans une plage de variation de 2kgH2/100km environ.

Pour rappel, la consommation d'hydrogène est à associer à une consommation électrique, qui correspond à la capacité utile de batterie divisée par l'autonomie du véhicule. En ce qui concerne le coût énergétique, l'électricité nécessaire à la recharge de la batterie en-dehors des phases de roulage compte pour une part faible en comparaison du coût de l'hydrogène. Ce coût est néanmoins pris en compte dans l'étude économique.

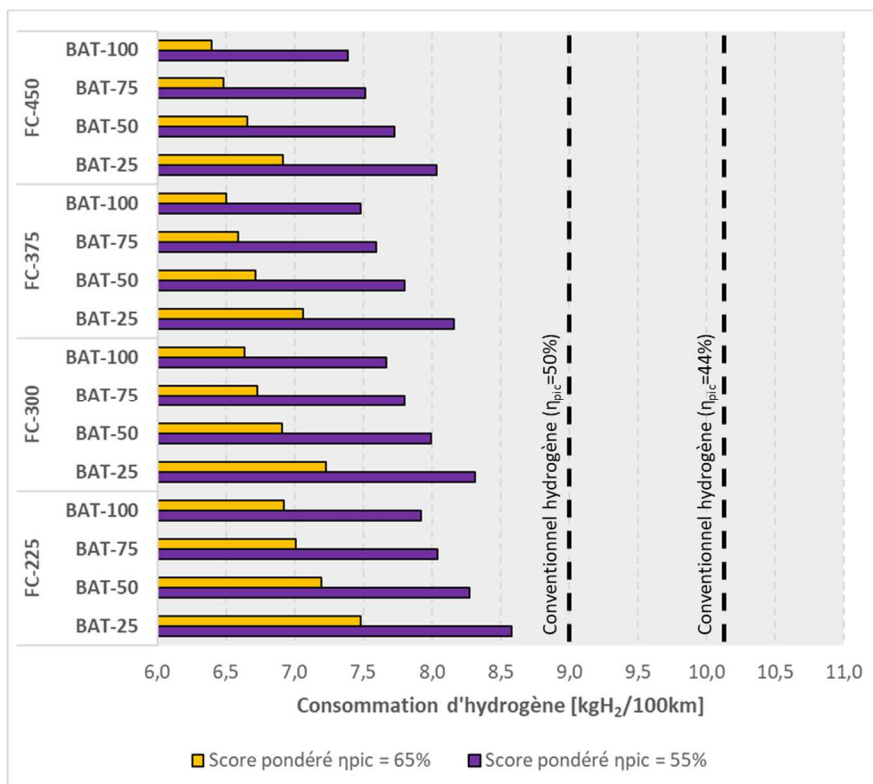


Figure 15 : Récapitulatif des consommations pondérées des variantes rechargeables de poids lourd 44 tonnes

A la lecture des résultats de simulation, des ordres de grandeur de consommation pour chaque architecture peuvent être établis. Ceux-ci sont récapitulés dans le Tableau 12. Les résultats détaillés en consommation et en autonomie sont récapitulés dans l'ANNEXE 2.

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

Tableau 12 : Ordres de grandeur de consommation et d'autonomie pour les variantes considérées de poids lourds 44 tonnes

Les tendances attendues sont respectées, notamment sur la consommation en fonction de la puissance maximale de la pile à combustible. Plus la pile est puissante, meilleur sera son rendement moyen en utilisation. Néanmoins, les aspects économiques et environnementaux doivent être étudiés pour statuer sur l'intérêt global d'une configuration par rapport à une autre.

Comme discuté plus haut, les trajets réels doivent permettre d'étayer les résultats sur les cycles VECTO de référence. Le Tableau 27 de l'ANNEXE 2 donne les résultats de simulation sur les trajets réels avec chargement moyen de 19.3t.

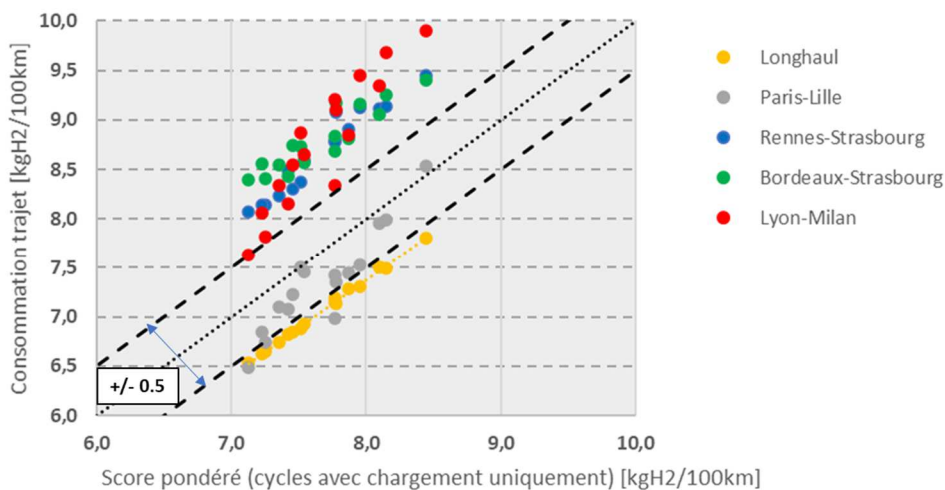


Figure 16 : Comparaison entre les résultats sur les cycles VECTO avec chargement et ceux sur les trajets réels avec chargement (FCEV rechargeables, $\eta_{pic} = 65\%$)

Le graphique de la Figure 16 permet de mieux visualiser ces résultats en comparant l'écart entre la consommation simulée sur les trajets réels au score pondéré obtenu en ne considérant que les cycles VECTO simulés avec le chargement moyen de 19.3t. On remarque que le trajet Paris-Lille donne une consommation très proche du cycle VECTO long-routier (« Longhaul », en jaune). Les autres trajets entraînent des consommations supérieures au score pondéré des cycles VECTO, ce qui illustre bien que la pondération définie dans le Tableau 11 n'est pas représentative de tous les usages.

3.2.2. Emissions d'oxydes d'azote

Des cartographies d'émissions d'oxydes d'azote (NOx) sont proposées dans [2] pour les moteurs à combustion d'hydrogène : l'une pour les émissions en sortie moteur, l'autre pour les émissions à la canule d'échappement dans l'hypothèse d'un fonctionnement avec un système de post-traitement.

Ces cartographies ont été utilisées pour donner une estimation des émissions de NOx associées à l'usage des poids lourds 44 tonnes décrit dans ce chapitre. Néanmoins, ces résultats sont à analyser avec précaution. En effet, les cartographies d'émissions utilisées sont issues de relevés sur des points de fonctionnement moteur stabilisés. En fonctionnement sur véhicule, le fonctionnement transitoire du moteur peut générer des phénomènes de surémissions. Ces phénomènes n'ont pas été pris en compte ici par manque de données et de recul sur l'usage des moteurs à combustion d'hydrogène. Ainsi, les émissions évaluées par simulation à partir de ces données sont de l'ordre de 100mg/km à la canule. Davantage de résultats sont disponibles dans le Tableau 34 de l'ANNEXE 2.

3.3. Coût total de possession

3.3.1. Cas d'étude

Les différents cas considérés pour l'étude TCO du PL 44t sont présentés sur la Figure 17 ci-dessous. Deux configurations thermiques sont étudiées, la combustion de gazole ou d'hydrogène. L'architecture pile à combustible est étudiée en croisant 4 tailles de FC et 4 tailles de batterie. Tous les véhicules à hydrogène sont équipés d'un réservoir gazeux à 700bar avec une contenance de 50kg d'hydrogène.

Deux rendements pic pour la pile à combustible et deux rendements pic pour le moteur thermique à hydrogène sont considérés.

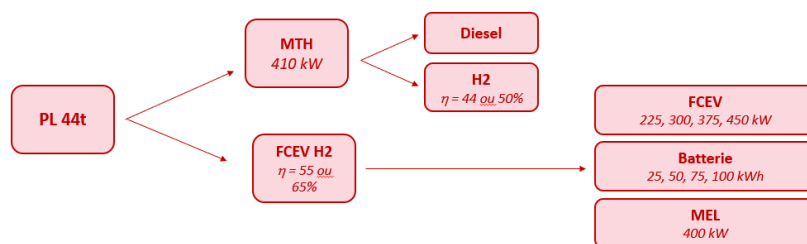


Figure 17 : Cas d'étude de l'analyse TCO du PL 44t

Il est considéré pour le poids lourd une durée de vie de 12 ans et un kilométrage annuel de 90 000 km. La batterie et la pile à combustible sont renouvelées une fois sur la durée de vie, après 6 ans d'utilisation.

3.3.2. Résultats

L'ensemble des valeurs de TCO est disponible en ANNEXE 2, pour l'ensemble des configurations GMP et les différentes valeurs de rendements considérées.

Les résultats TCO principaux sont présentés sur la Figure 18 ci-dessous. Pour cette figure, la pile à combustible considérée a un rendement pic de 65% et l'hydrogène est de type « hydrogène renouvelable local ».

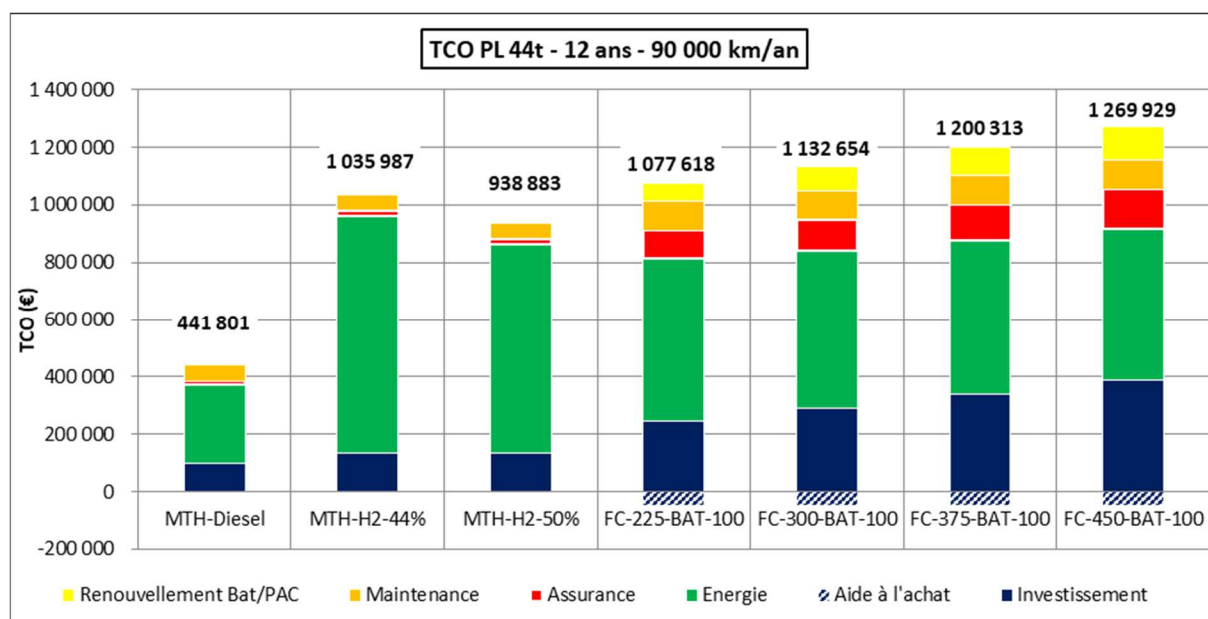


Figure 18 : TCO du poids lourd 44t, durée de vie 12 ans (PàC avec un rendement pic de 65%)

La figure montre d'abord que toutes les solutions à l'hydrogène renouvelable entraînent une multiplication par 2 à 3 du TCO par rapport à la solution de référence Diesel. La hausse du TCO sur les motorisations thermiques à hydrogène est due à la consommation d'énergie (barre en vert sur la figure) et donc au prix élevé de l'hydrogène. Une faible hausse de l'investissement par rapport au Diesel est également observée, correspondant au réservoir à hydrogène. L'amélioration du rendement du moteur thermique à hydrogène entraîne une baisse de sa consommation et donc logiquement de son TCO, de l'ordre de 9%. Les solutions FCEV entraînent une consommation d'hydrogène plus faible que le MTH-H2, mais une forte hausse de l'investissement malgré l'aide à l'achat de 50 000€, à cause du coût élevé de la pile à combustible. Le coût de la pile étant proportionnel à sa puissance, l'accroissement de la puissance de la FC entraîne une hausse du TCO, malgré le gain en consommation d'hydrogène.

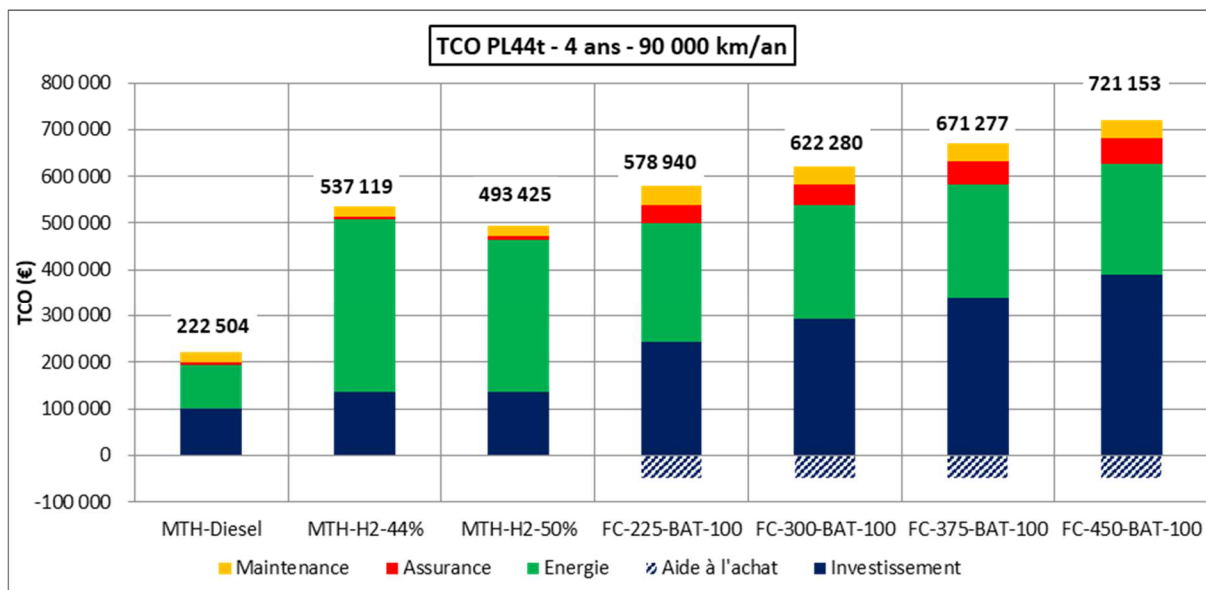


Figure 19 : TCO du poids lourd 44t, durée de vie 4 ans

Les retours d'exploitants de flottes de poids lourds montrent un usage très variable en fonction de la taille de la flotte et de l'entreprise. La durée d'exploitation des camions est un paramètre sensible de l'analyse TCO, et l'hypothèse retenue de 12 ans correspond à un usage intensif des véhicules, propre à des flottes de taille limitée. L'exercice a donc également été réalisé pour une durée de vie véhicule de 4 ans, propre à des flottes de plus grande taille, dont les résultats sont visibles en Figure 19. La réduction de la durée de vie a peu d'influence sur l'écart entre les solutions hydrogène thermique et pile à combustible, puisque la réduction de la dépense énergétique, qui favorise le MTH-H2, est compensée par la disparition du poste de dépense « remplacement batterie et FC » pour les FCEV. Toutes les solutions restent deux à trois fois plus coûteuses que la configuration Diesel, et la hiérarchie entre les solutions n'est pas modifiée. A noter toutefois que, faute de données, nous n'avons pas pu intégrer dans le TCO le prix de revente du camion.

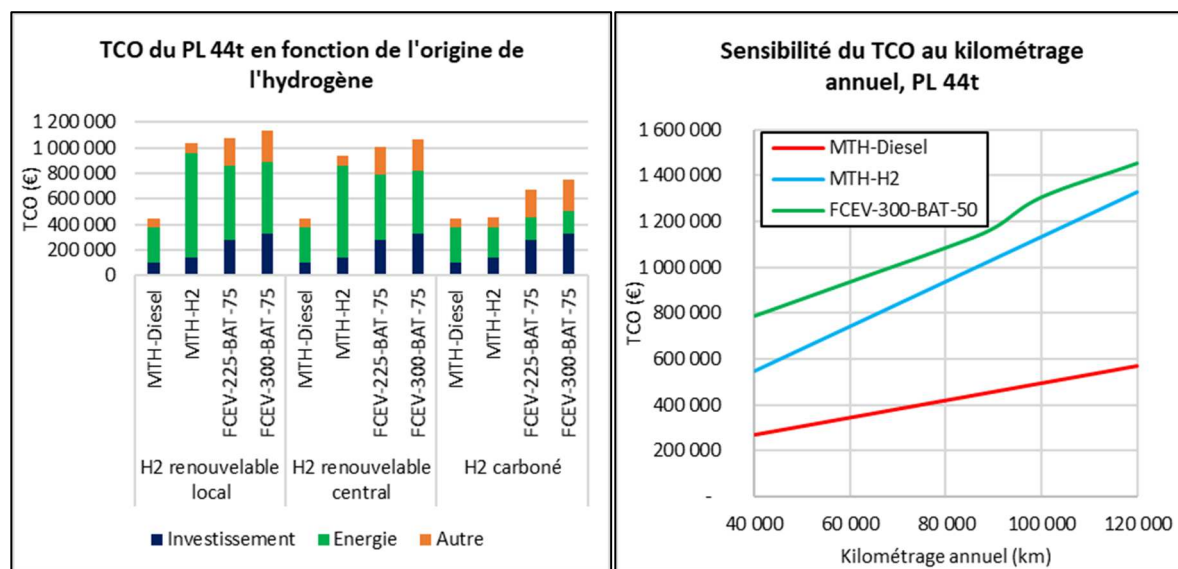
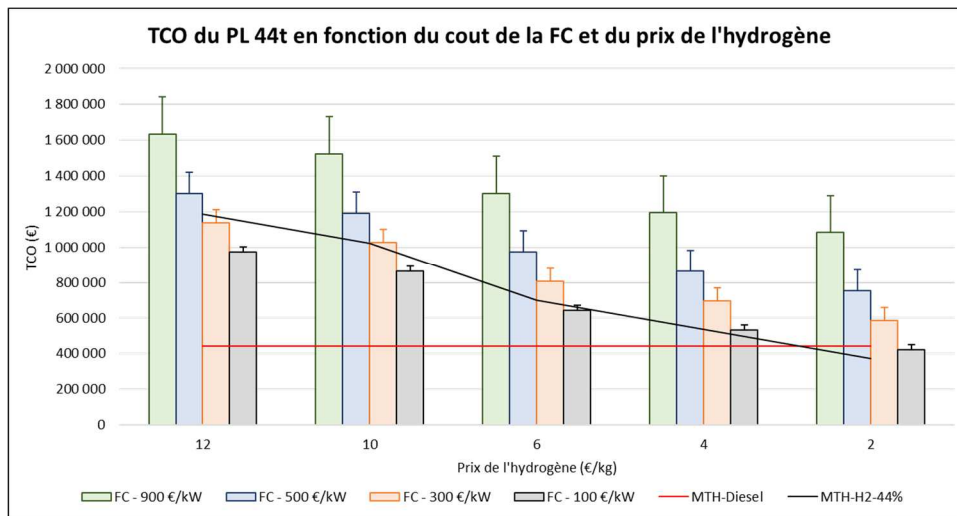


Figure 20 : Analyse de sensibilité TCO PL 44t - origine de l'hydrogène (a) et kilométrage annuel (b)

La Figure 20.a de gauche présente l'évolution du TCO en fonction de l'origine de l'hydrogène et donc de son prix. Le calcul prend en compte l'évolution de ce prix entre l'achat et la fin de vie du poids lourd. Le passage à une production d'hydrogène centralisée (H2 renouvelable central) entraîne une légère baisse de son prix et donc du TCO des solutions fonctionnant à l'hydrogène, mais la hiérarchie entre les solutions n'est pas modifiée. En revanche le passage à un hydrogène carboné bien moins cher que le renouvelable (3€/kg) amène la solution thermique à hydrogène au même niveau que la motorisation thermique Diesel. Le FCEV reste plus cher (x1,5) en raison de l'investissement plus élevé.

La Figure 20.b montre une augmentation du TCO avec le kilométrage annuel, et donc la consommation d'énergie sur la durée de vie du camion. Au-delà de 90 000 km annuels, il est fait l'hypothèse d'un second renouvellement de la pile à combustible dû à son usure plus rapide ce qui entraîne un saut dans le TCO du FCEV, mais la hiérarchie entre les solutions n'est pas modifiée.



FC : 300 kW, batterie : 50 kWh. La petite barre verticale représente le coût du renouvellement batterie et FC.
 Figure 21 : TCO du poids lourd 44t en fonction du prix de l'hydrogène et de la pile à combustible

La Figure 21 présente l'évolution du TCO en fonction du prix de l'hydrogène. Plusieurs configurations de pile à combustible sont représentées en fonction de leur prix et de la nécessité de leur renouvellement durant la vie du camion (barres « d'erreur » sur l'histogramme). La durée de vie reste de 12 ans et le kilométrage annuel de 90 000 km mais par l'abandon du renouvellement, on suppose un progrès technologique allongeant la durée de vie de la FC et de la batterie.

Seule la solution pile à combustible sans renouvellement et à prix FC de 100€/kW atteint le seuil de rentabilité par rapport au thermique Diesel, pour un prix de l'hydrogène autour de 3€/kg, soit une division par 4 par rapport au prix actuel de l'hydrogène décarboné.

3.4. Analyse du cycle de vie

Evaluation des impacts potentiels sur le changement climatique

Dans le cas du poids lourd, l'unité fonctionnelle est le transport de marchandises sur 90 000 km / an pendant 12 ans dans un contexte de trafic donné. Les impacts sont calculés en référence à cette unité fonctionnelle.

Deux scénarios ont été envisagés :

- Scénario « Hydrogène bas carbone » : l'électricité utilisée pour la production d'hydrogène par électrolyse provient du mix électrique français dont les émissions de GES de production sont de 59,9 g CO₂-eq / kWh.
- Scénario « Hydrogène renouvelable » : l'électricité utilisée pour la production d'hydrogène par électrolyse est de l'électricité verte à partir d'éolien onshore français dont les émissions de GES de production sont de 15,7 g CO₂-eq / kWh.

Résultat Indicateur de réchauffement climatique, scénario hydrogène bas carbone (mix FR)

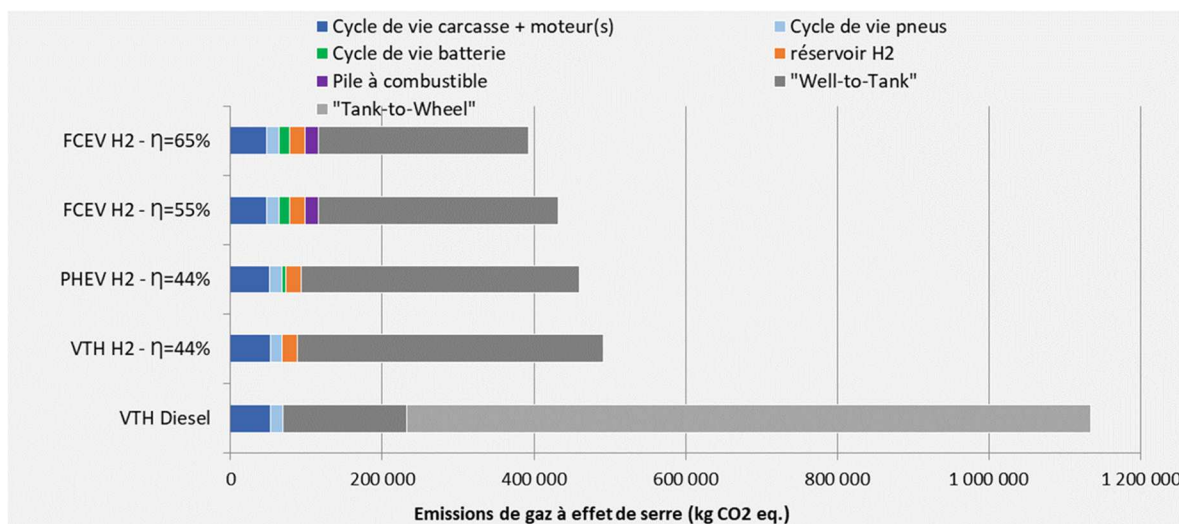


Figure 22 : Résultats ACV du poids lourd 44t pour le scénario hydrogène bas carbone

On retrouve les résultats ACV du poids lourd 44 tonnes pour le scénario hydrogène bas carbone sur la Figure 22. Le « well-to-tank » correspond aux impacts du « puits au réservoir ». Il s'agit des impacts de la production d'hydrogène (transport jusqu'à la station de distribution inclus) ou de la production du gazole dans le cas du poids lourd Diesel. Le « tank-to-wheel » correspond aux impacts du « réservoir à la roue » et notamment dans cette étude aux impacts de la combustion du gazole pour le poids lourd Diesel. En effet, il n'y a pas d'émissions de CO₂ du « réservoir à la roue » pour les véhicules fonctionnant à l'hydrogène.

A partir de ces résultats, le poids lourd Diesel présente les émissions de GES les plus importantes sur son cycle de vie à cause principalement des émissions liées à la combustion du carburant. Du côté des poids lourds à hydrogène, il faut remarquer la part prépondérante des impacts liés à la production de l'hydrogène. Cela est principalement dû à l'électricité utilisée pour la production de l'hydrogène, mais aussi à la grande distance parcourue par les poids lourds durant leur durée de vie. Dans ce scénario-là, on peut donc remarquer un faible impact du réservoir à hydrogène et de la pile à combustible dans le cas du poids lourd FCEV sur l'ensemble des émissions de GES du cycle de vie.

Pour ce scénario, l'écart de consommation d'hydrogène entre les différents véhicules à hydrogène a une influence majeure sur les résultats. Notamment le poids lourd FCEV qui a la plus faible consommation d'hydrogène a aussi les impacts les plus faibles selon l'indicateur de réchauffement climatique.

Résultat Indicateur de réchauffement climatique, scénario hydrogène renouvelable

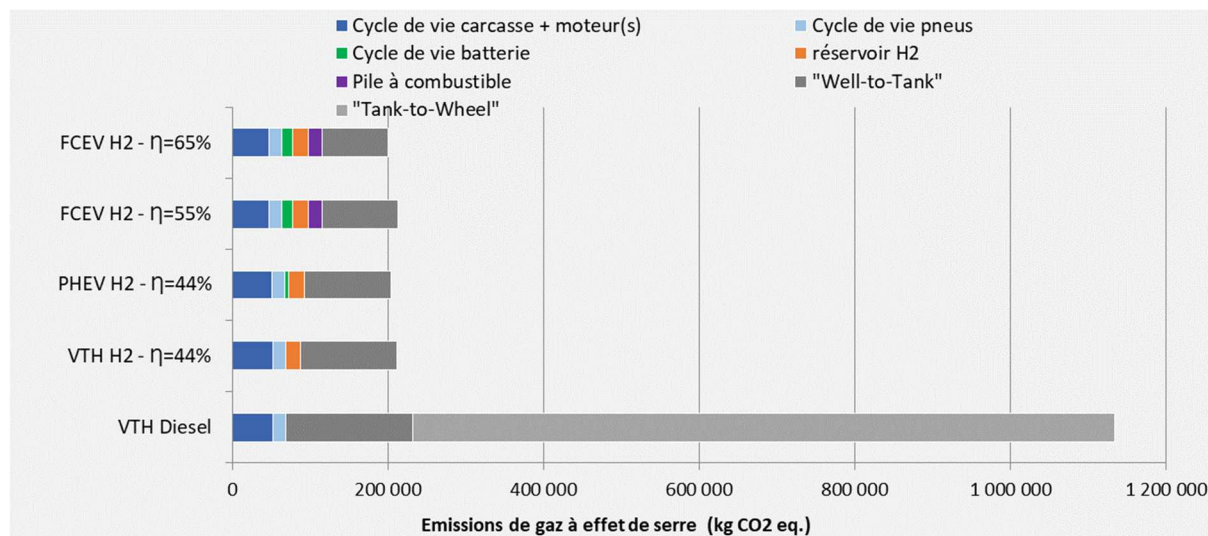


Figure 23 : Résultats ACV du poids lourd 44t pour le scénario hydrogène renouvelable

On retrouve les résultats ACV du poids lourd 44t pour le scénario hydrogène renouvelable sur la Figure 23. Dans ce scénario, l'utilisation d'hydrogène renouvelable permet de diviser par deux les impacts de cycle de vie des poids lourds à hydrogène (par rapport au scénario hydrogène bas carbone) et de creuser encore plus l'écart avec le poids lourd Diesel.

La part des impacts liés à la production de l'hydrogène est donc considérablement réduite et n'est plus majoritaire sur l'ensemble des impacts du cycle de vie pour le poids lourd FCEV. En effet, la part des émissions du réservoir à hydrogène, de la batterie et de la pile à combustible est plus significative dans ce scénario.

L'autre point intéressant est la hiérarchisation des différentes versions de poids lourds à hydrogène par rapport à leurs émissions de GES. En effet, avec un hydrogène décarboné, les écarts sont considérablement réduits, ce qui signifie que les écarts de consommation ne sont plus suffisants pour créer une différence significative en termes d'impact sur le réchauffement climatique. Le poids lourd FCEV avec un haut rendement (PàC à 65% de rendement pic) reste celui avec les émissions les plus basses, mais son avance est très faible vis-à-vis des autres solutions fonctionnant à l'hydrogène. En revanche, si l'on considère l'hypothèse de rendement plus faible pour le poids lourd FCEV (PàC à 55% de rendement pic), celui-ci aura des émissions plus importantes que le poids lourd PHEV H2.

4. Bus articulé de 18 mètres

Les véhicules urbains de transport de passagers évoluent dans des zones où les émissions polluantes ont un impact direct sur la santé de la population locale. L'électrification des bus de 12 mètres avec des batteries prend de plus en plus d'ampleur. Les bus de 18 mètres sont, quant à eux, plus gourmands en énergie et souvent dédiés à des profils de mission différents qui nécessitent une autonomie importante, ce qui justifierait l'utilisation du vecteur hydrogène à la place de batteries massives, coûteuses et à temps de charge élevé.

4.1. Variantes considérées et mise en données

Les données véhicules sont récapitulées dans le Tableau 13. La mise en données a été effectuée pour être représentative d'un véhicule récent. Les résultats de consommation pour la configuration de référence Diesel doivent permettre de valider ces hypothèses.

SCx	5,5 m ²
Crr	7 kg/t
Masse carcasse	16 445 kg
Pneus	275/70 R22,5

Tableau 13 : Hypothèses véhicules pour le bus urbain articulé de 18 mètres

Selon des données récoltées auprès de gestionnaires et d'exploitants de flottes de ce type de bus, la consommation de la configuration Diesel de référence doit être de l'ordre de 52L/100km.

Une étude bibliographique a permis d'évaluer la puissance de traction requise pour un bus articulé de 18 mètres évoluant en zone urbaine. Des exemples de ces véhicules sont récapitulés dans le Tableau 14. Il ressort de cette analyse qu'une puissance de traction de l'ordre de 250kW est nécessaire sur ce type de véhicules. Une capacité d'emport de 160 passagers au maximum sera considérée. La masse moyenne d'un passager est prise à 70kg, de sorte que le PTAC d'une trentaine de tonnes soit respecté lorsque la capacité maximale est atteinte.

		Architecture	MTH	MEL	Masse à vide	PTAC	Capacité
Mercedes-Benz	Citaro C2 G	Conventionnel	220kW 1200Nm		16 249 kg	28 500 kg	158 passagers
	eCitaro G	Electrique (BEV)		2x125kW - 2x485Nm			146 passagers
Scania	Citywide LF	Conventionnel	235kW 1600Nm		17 600 kg	29 000 kg	161 passagers
Iveco	Bus Urbanway	Conventionnel	265kW 1650Nm		17 240 kg	30 000 kg	159 passagers
		Hybride série	210kW 1000Nm	160kW - 3800Nm	18 020 kg	30 000 kg	158 passagers

Tableau 14 : Caractéristiques GMP de quelques bus articulés de 18 mètres en circulation

Un module pile à combustible de 30kW a été considéré, et des systèmes à 2, 3, 4 et 5 modules ont été retenus pour les simulations. Concernant la consommation des auxiliaires à bord du bus, une puissance moyenne de 5kW a été appliquée. L'ANNEXE 3 contient des résultats avec une puissance auxiliaire supérieure, prenant en compte une consommation élevée liée à l'utilisation de résistances électriques pour le chauffage du bus en hiver, par exemple.

4.2. Consommation sur cycle

Le cycle d'évaluation qui a été retenu pour le bus urbain articulé de 18 mètres est le cycle VECTO *Urban*. Ce cycle a été simulé pour des trajets avec ou sans passagers. Une consommation pondérée a ensuite été évaluée pour donner un ordre de grandeur de consommation globale des différentes variantes sur ce cycle. La pondération retenue est présentée dans le Tableau 15.

0 passagers	80 passagers	160 passagers	Nombre moyen de passagers
20%	50%	30%	88

Tableau 15 : Pondération de référence pour le calcul de la consommation moyenne des bus urbains de 18 mètres

Des trajets réels de bus, issus de mesure *in situ*, ont également été simulés. Il s'agit de mesures de profils de vitesse effectuées sur des lignes lyonnaises. Le détail des résultats est donné dans l'ANNEXE 3. Les résultats de simulation sur le cycle VECTO *Urban* sont récapitulés dans la Figure 24.

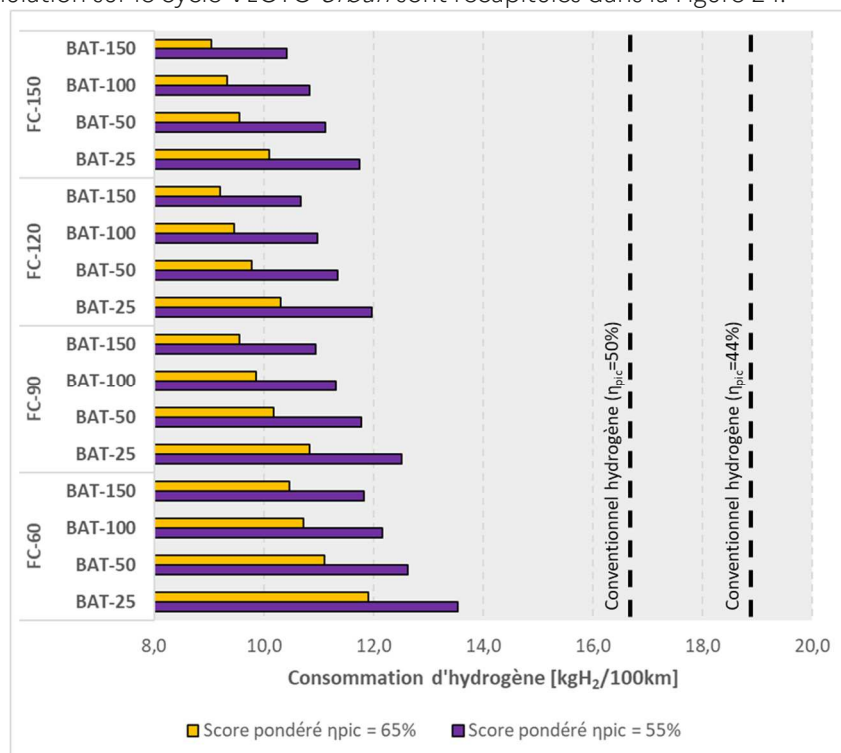


Figure 24 : Récapitulatif des consommations pondérées des variantes rechargeables de bus articulé de 18 mètres

A la lecture des résultats de simulation, des ordres de grandeur de consommation pour chaque architecture peuvent être établis. Ceux-ci sont récapitulés dans le Tableau 16. Les résultats détaillés en consommation et en autonomie sont récapitulés dans l'ANNEXE 3.

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

Tableau 16 : Ordres de grandeur de consommation et d'autonomie pour les variantes considérées de bus urbain de 18 mètres

Le cycle VECTO *Urban* semble particulièrement énergivore, car la variante Diesel de référence a une consommation plus élevée qu'attendu. Cela tient aux nombreuses phases à l'arrêt, lors desquelles la puissance des auxiliaires continue à être prélevée, et aux nombreuses phases d'arrêt / redémarrages propres aux profils de mission de ce type de véhicule.

Il est intéressant de comparer ces résultats à ceux obtenus sur les trajets des lignes lyonnaises. La Figure 25 montre un écart important avec les résultats sur ces trajets. Cet écart s'explique par la 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 des auxiliaires prise en compte dans les simulations. A titre de comparaison supplémentaire avec le cycle VECTO, la variante Diesel de référence a une consommation de 51.2L/100km en moyenne sur les cycles lyonnais, qui est proche de la consommation attendue pour ce type de véhicule.

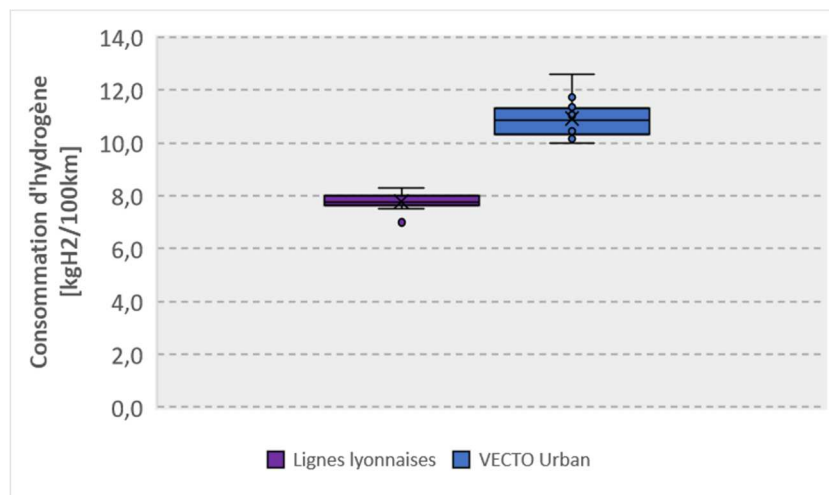


Figure 25 : Comparaison entre les résultats des variantes FCEV rechargeables de bus urbain de 18 mètres sur les différents cycles, pour 80 passagers

4.3. Coût total de possession

4.3.1. Cas d'étude

Les cas d'étude sont similaires à ceux présentés en Figure 17 pour le poids lourd, mais avec des tailles de batterie de 25, 50, 100 et 150 kWh, une pile à combustible de 60, 90, 120 ou 150 kW, un moteur électrique de 250 kW et une masse d'hydrogène embarquée de 40kg.

Les mêmes rendements FC et MTH-H2 sont considérés que dans le cas du poids lourd : un rendement pic « de base » à 44% pour le moteur thermique et 55% pour la pile à combustible, ainsi que des configurations plus optimistes de 50% pour les moteurs thermiques à hydrogène et 65% pour la pile. La durée de vie du bus articulé de 18 mètres est de 12 ans, pour un kilométrage annuel de 40 000 km.

4.3.2. Résultats

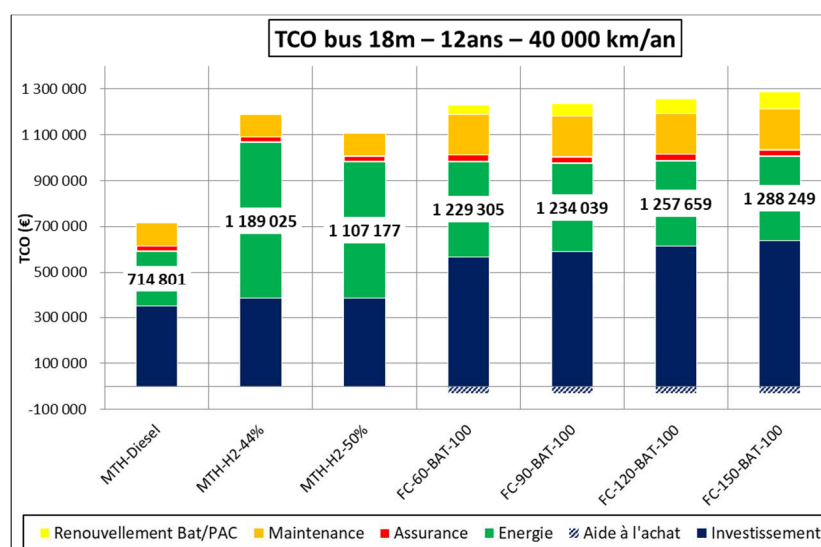


Figure 26 : TCO du bus 18m

L'ensemble des valeurs de TCO est disponible en ANNEXE 3, pour les différentes configurations de GMP et les 3 hypothèses de coût de l'hydrogène considérées.

La Figure 26 présente la comparaison du TCO de la configuration conventionnelle, thermique Diesel, aux différentes architectures à hydrogène, dans l'hypothèse de coût de l'hydrogène correspondant à de « l'hydrogène renouvelable local ». Le rendement pic pour la pile à combustible considérée ici est 55%.

Toutes les configurations à hydrogène entraînent une multiplication par deux du TCO par rapport à la motorisation thermique Diesel. L'écart maximal entre le TCO des solutions à hydrogène est de 20%.

Comme dans le cas précédent, c'est la dépense énergétique, associée à la consommation et au prix de l'hydrogène, qui entraîne la hausse du TCO entre les solutions thermiques. L'amélioration du rendement du MTH-H2 n'entraîne qu'un faible gain sur le TCO (7%) et la hausse de l'investissement par rapport à la version Diesel est due au réservoir d'hydrogène (500€/kg d'H2 transporté).

La différence entre les TCO MTH-H2 et FCEV est principalement de deux natures. D'abord l'investissement est multiplié par 1,5 pour le FCEV, en raison du coût de la PàC (500 €/kW), ce qui donne, malgré une aide à l'achat de 30 000€, un prix de vente des bus à hydrogène FCEV de l'ordre de 600 000€, cohérent avec les annonces de FCH [36].

En revanche cette hausse de l'investissement avec le passage à la FC est compensée par une baisse de la consommation d'hydrogène et donc de la dépense associée. Le passage d'une motorisation thermique à hydrogène à une pile à combustible permet un gain de consommation d'hydrogène allant de 19 à 45% avec un rendement FC de 55% et jusqu'à 52% pour un rendement plus optimiste de 65%. Ainsi une baisse du prix de l'H2 avantagerait plutôt la solution MTH-H2, tandis que la baisse du prix de la pile à combustible, entraînée par la maturation technologique et l'industrialisation des processus de fabrication, serait à l'avantage de la solution FCEV.

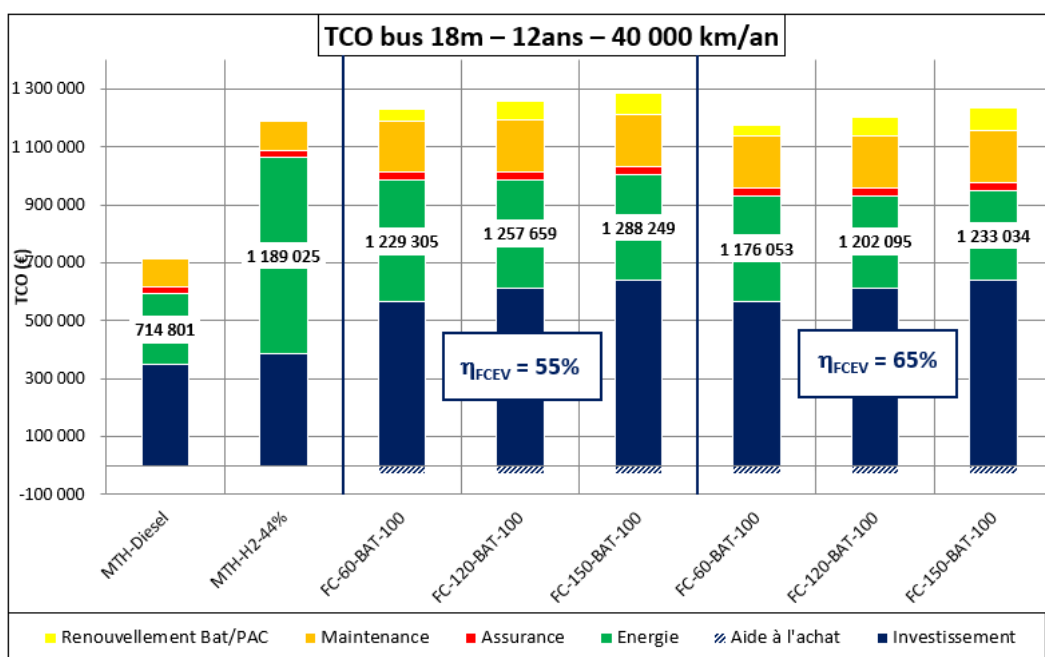
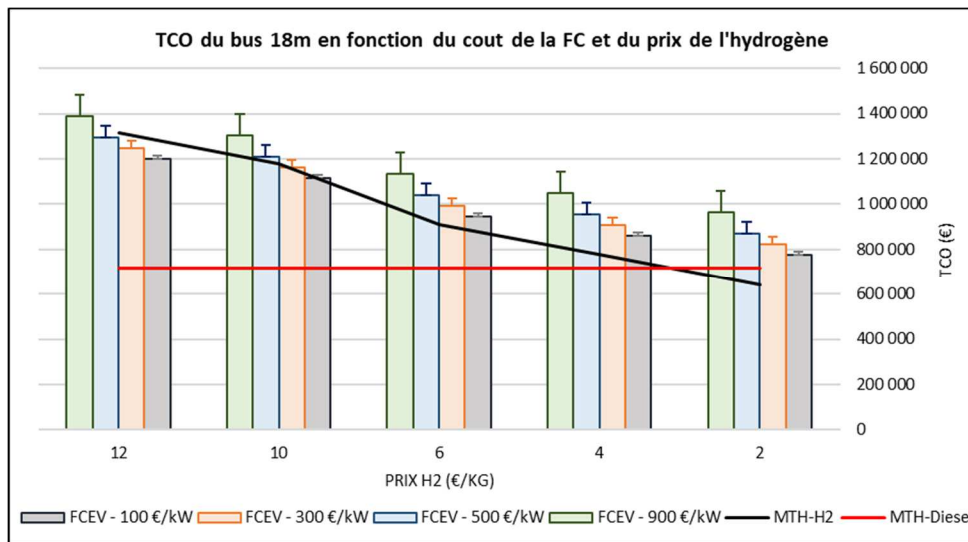


Figure 27 : Influence du rendement de la FC sur le TCO du bus 18m

La Figure 27 présente le TCO des différentes motorisations pour les deux valeurs de rendement FC considérées : 55 et 65 %, en pic. L'amélioration de 10 points du rendement de la pile à combustible entraîne un gain de 4% du TCO. L'écart entre les solutions FCEV et MTH-H2 est réduite à moins de 2%.



FC : 120 kW et $\eta_{pic} = 55\%$, batterie : 25 kWh, $\eta_{MTH-H2} = 44\%$. La barre d'erreur représente le renouvellement batterie et FC.

Figure 28 : TCO du bus 18m en fonction du coût de la FC et du prix de l'hydrogène

La Figure 28 cherche à déterminer les conditions permettant d'atteindre le seuil de rentabilité des solutions à hydrogène par rapport à la configuration de référence Diesel. La solution thermique à hydrogène devient intéressante pour un prix de l'hydrogène de 3€/kg, correspondant au prix actuel de l'hydrogène carboné. Pour un prix de l'hydrogène de 10€/kg, le FCEV est plus intéressant que le MTH-H2 si la FC coûte moins de 500€/kW et ne nécessite pas un renouvellement pendant la durée de vie du bus. A 12€/kg, le FCEV est plus intéressant si la FC coûte moins de 500€/kW, malgré la prise en compte du renouvellement. Le TCO du FCEV est proche de celui du MTH-Diesel dans le cas le plus optimiste présenté ici : un coût de la FC de 100€/kW, pas de renouvellement nécessaire, et un prix de l'hydrogène de 2€/kg.

4.4. Analyse du cycle de vie

Evaluation des impacts potentiels sur le changement climatique

Dans le cas du bus, l'unité fonctionnelle est le transport de personnes sur 40 000 km / an pendant 12 ans dans un contexte de trafic donné. Les impacts sont calculés en référence à cette unité fonctionnelle.

Résultat Indicateur de réchauffement climatique, scénario hydrogène bas carbone

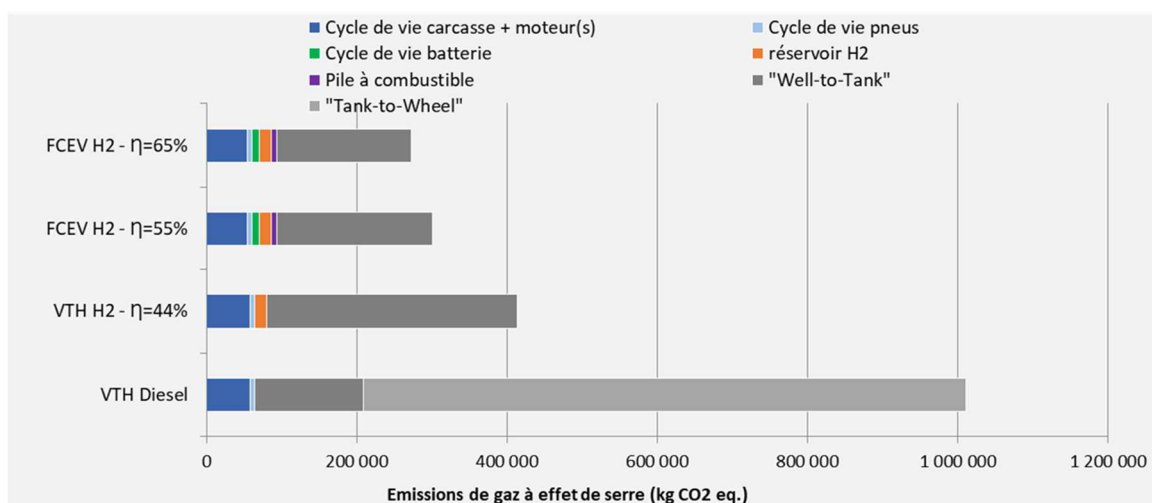


Figure 29 : Résultats ACV du bus 18 m pour le scénario hydrogène bas carbone

On retrouve les résultats ACV du bus 18 m pour le scénario hydrogène bas carbone sur la Figure 29. Dans le cas du bus 18m, on retrouve les mêmes tendances que pour le poids lourd 44 tonnes avec quelques différences notables. Les impacts du bus Diesel sont une nouvelle fois bien supérieurs aux bus à hydrogène. En effet, le bus Diesel présente pratiquement deux fois plus d'émissions de GES que le bus VTH-H2. Dans le cas du bus, la part des impacts de la production d'hydrogène reste majoritaire dans ce scénario, même si celle-ci est moins importante que dans le cas du poids lourd car la distance parcourue au long de la durée de vie du bus est moins importante que pour le poids lourd. Le bus FCEV présente les meilleurs résultats en termes de potentiel d'impact de réchauffement climatique.

Résultat Indicateur de réchauffement climatique, scénario hydrogène renouvelable

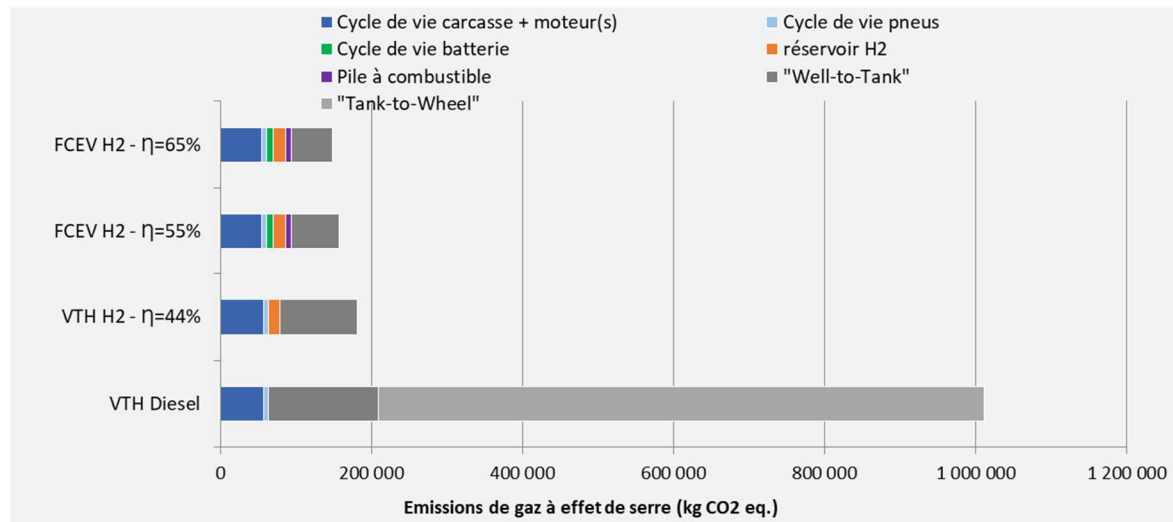


Figure 30 : Résultats ACV du bus 18 m pour le scénario hydrogène renouvelable

On retrouve les résultats ACV du bus articulé de 18 mètres pour le scénario hydrogène renouvelable sur la Figure 30. Dans ce scénario, on obtient les mêmes conclusions que dans le cas du poids lourd 44 tonnes. L'utilisation d'hydrogène renouvelable permet de réduire considérablement les impacts des bus à hydrogène. Dans le cas du bus FCEV, la pile à combustible (90 kW) est beaucoup plus petite que dans le cas du poids lourd (225 kW). C'est donc pour cela que son impact reste mineur sur l'ensemble du cycle de vie du bus FCEV.

Pour conclure, le bus FCEV reste la meilleure solution en termes d'émissions de GES avec ce scénario, même si l'écart avec le bus VTH-H2 s'est réduit par rapport au scénario hydrogène bas carbone.

5. Autocar régional

Cette partie traite de l'étude de l'autocar régional. Ce type d'autocar diffère des autocars à plancher haut, et se rapproche d'un autobus de 12 mètres. Ces véhicules sont principalement destinés à des trajets interurbains, par exemple pour des missions de transport scolaire.

5.1. Variantes considérées et mise en données

Les données véhicules sont récapitulées dans le Tableau 17. La mise en données a été effectuée pour être représentative d'un véhicule récent. Les résultats de consommation pour la configuration de référence Diesel doivent permettre de valider ces hypothèses.

SCx	4,5 m ²
Crr	7 kg/t
Masse carcasse	11 445 kg
Pneus	275/70 R22,5

Tableau 17 : Hypothèses véhicules pour l'autocar régional

De même que pour le bus urbain de 18 mètres, une puissance de traction de 250 kW a été retenue pour cette application. Le même module de base de 30 kW a été considéré, avec davantage de systèmes différents, à 2, 3, 4, 5 et 6 modules, ainsi qu'une variante supplémentaire avec 3 modules de 75 kW. Une puissance auxiliaire moyenne de 4 kW a été appliquée sur l'ensemble des variantes. L'ANNEXE 4 contient des résultats avec une puissance auxiliaire supérieure prenant en compte une consommation élevée liée à l'utilisation de résistances électriques pour le chauffage de l'autocar en hiver, par exemple.

5.2. Consommation sur cycle

L'autocar considéré doit pouvoir emporter au maximum 60 passagers. Le poids moyen d'un passager a été pris à 70kg. Le cycle d'usage a été simulé avec différentes charges en passager, qui correspondent à un chargement nul (aucun passager), à la mi-charge (30 passagers) ou au chargement maximal (60 passagers). La pondération est donnée dans le Tableau 18.

0 passagers	30 passagers	60 passagers	Nombre moyen de passagers
20%	50%	30%	33

Tableau 18 : Pondération de référence pour le calcul de la consommation moyenne des autocars régionaux dans ce rapport

Le cycle d'évaluation retenu pour l'autocar régional est le cycle VECTO *Interurban*. Celui-ci est présenté en Figure 43 de l'ANNEXE 1. Ce cycle se caractérise par des phases urbaines avec de nombreux arrêts et redémarrages favorables à la récupération d'énergie au freinage, ainsi que par des phases de roulage à plus de 70 km/h. La présence de phases à haute vitesse sur le profil de mission de ce type de véhicule justifie l'ajout de variantes supplémentaires à plus forte puissance de pile à combustible.

Les résultats de simulation sont présentés sur la Figure 31. A la lecture des résultats de simulation, des ordres de grandeur de consommation pour chaque architecture peuvent être établis. Ceux-ci sont récapitulés dans le Tableau 19. Les résultats détaillés en consommation et en autonomie sont récapitulés dans l'ANNEXE 4.

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

Tableau 19 : Ordres de grandeur de consommation et d'autonomie pour les variantes considérées d'autocar régional

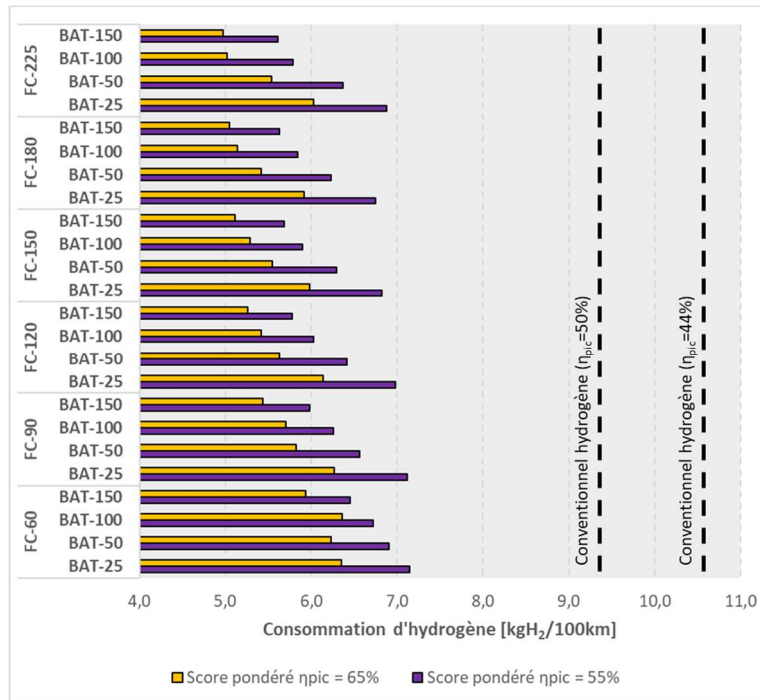


Figure 31 : Récapitulatif des consommations pondérées des variantes rechargeables d'autocar régional

5.3. Coût total de possession

5.3.1. Cas d'étude

L'autocar régional est considéré avec des cas d'études similaires aux véhicules précédents. Les tailles de pile à combustible étudiées sont 60, 90, 120, 150, 180 et 225 kW, et les tailles de batteries 25, 50, 100 et 150 kWh, pour un moteur électrique de 250 kW et une masse d'hydrogène embarquée de 40 kg. Les motorisations thermiques possèdent un moteur de 250 kW.

Sa durée de vie est fixée à 8 ans, pour 60 000 kilomètres par an. L'hydrogène considéré est de l'hydrogène carboné produit localement, avec un prix de 12€/kg en 2022 et 7,6€ en 2030.

5.3.2. Résultats

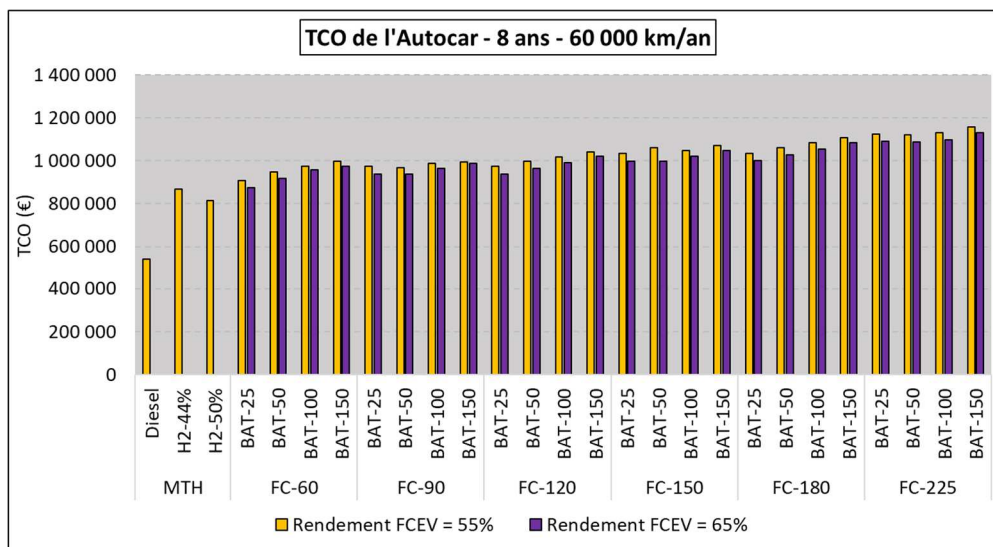


Figure 32 : TCO de l'autocar

L'ensemble des résultats est disponible en ANNEXE 4, pour l'ensemble des configurations étudiées (variantes de GMP et de prix de l'hydrogène).

La Figure 32 présente le TCO de l'autocar régional dans les différentes configurations étudiées et dans l'hypothèse d'un « hydrogène renouvelable local ». Comme pour les autres véhicules, le passage à une motorisation à hydrogène entraîne une multiplication du TCO par 1,5 à 2 par rapport à la configuration de référence Diesel. La variation de la taille de la batterie ainsi que l'amélioration du rendement de la pile à combustible entraînent de faibles variations du TCO (moins de 5%). Peu importe les choix batterie et rendement, la hiérarchie entre les solutions reste la même : la motorisation thermique Diesel a le TCO le plus faible, suivie par le MTH-H2 puis le FCEV.

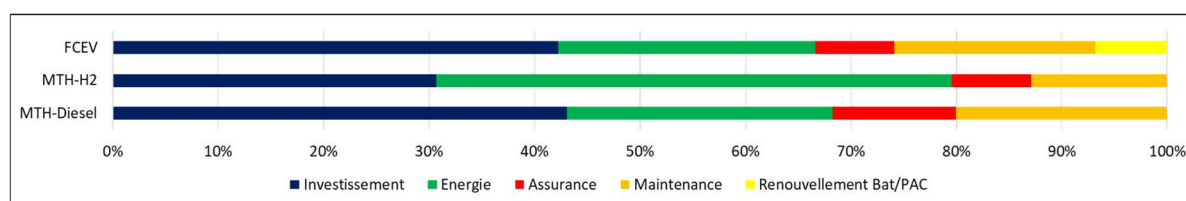


Figure 33 : Autocar - répartition du TCO par poste de dépense, moyenne sur les différentes architectures

La Figure 33 montre la répartition du TCO pour chaque type de solution. Cette répartition est très similaire d'un véhicule à l'autre. La solution FCEV est la plus équilibrée en termes de structure de coûts : 1/3 du TCO est dédiée à l'investissement, 1/3 à la dépense énergétique et le tiers restant aux opérations de maintenance, assurance et renouvellement de la FC et de la batterie. A l'inverse, pour la solution thermique à hydrogène, la dépense énergétique représente 55% du TCO et l'investissement n'en représente que 15. Ainsi la réduction du prix de l'hydrogène aura une très forte influence sur la baisse du TCO du MTH-H2, tandis que pour le FCEV, il faudra que cette baisse soit coordonnée avec une baisse du coût de la pile à combustible pour qu'il devienne compétitif avec la version Diesel.

6. Pelle sur chenilles de 75 tonnes

Le dernier volet de cette étude consiste à étudier l'intérêt du passage à des solutions à hydrogène pour le cas particulier d'un véhicule off-road, en l'occurrence la pelle sur chenilles de 75 tonnes. Une fois encore, les contraintes d'intégration des groupes motopropulseurs à bord de l'engin n'ont pas été considérées ici, et il n'a pas été tenu compte des contraintes particulières d'exploitation pour cette application, qui pourraient conduire à privilégier la solution à moteur thermique plutôt que la solution à pile à combustible. Par exemple, la présence éventuelle d'une ambiance particulièrement poussiéreuse (qui pourrait être préjudiciable à la durée de vie de la pile à combustible) ; ou les difficultés à refroidir des engins travaillant à vitesse de déplacement nulle (a priori plus grandes dans le cas de la pile à combustible) ; ou encore l'impact des vibrations sur la durabilité de la pile à combustible.

La pelle considérée est illustrée en Figure 34. La répartition de la masse par poste est détaillée sur la figure.

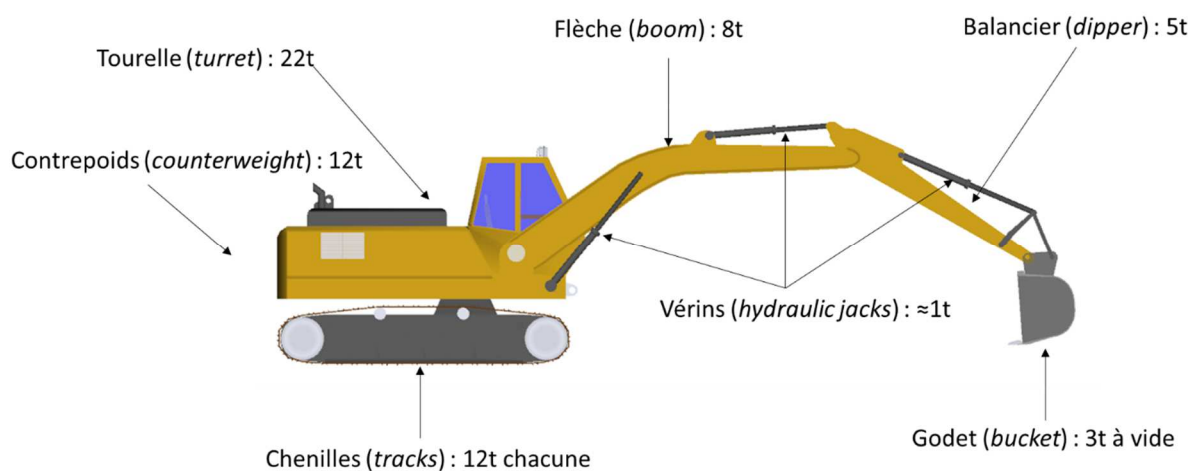


Figure 34 : Illustration de la pelle sur chenilles de 75 tonnes et de la masse des différents éléments principaux

6.1. Variantes considérées et mise en données

La méthode d'évaluation de la consommation pour cette application diffère largement des autres véhicules traités dans cette étude. En effet, un simulateur spécifique a été utilisé, issu de la base de démonstrations du logiciel Simcenter Amesim. La difficulté à obtenir des données précises sur le dimensionnement des circuits hydrauliques de ce type d'engins a conduit à utiliser le paramétrage par défaut de ce simulateur. Seule la cartographie de rendement du moteur Diesel a été appliquée dans le simulateur. La puissance visée pour cette application est de l'ordre de 400kW.

Un module PàC de base 75kW a été considéré, et des systèmes à 2, 3, 4, 5 et 6 modules ont été simulés, en plus de la configuration de référence Diesel, et d'une configuration hybride à rotation électrique de la tourelle. Une seule et même batterie de 25kWh est utilisée pour l'ensemble des architectures électrifiées.

Le simulateur de l'architecture thermique est présenté en Figure 35. Selon l'architecture, la source d'énergie primaire et le système de rotation de la tourelle est modifié, selon le récapitulatif du Tableau 20.

Architecture	Source d'énergie primaire	Système de rotation de la cabine
Thermique	Moteur thermique	Transmission hydrostatique
Hybride	Moteur thermique	Transmission électrique à deux moteurs
Electrique à pile à combustible	Pile à combustible, batterie et moteur électrique	Transmission électrique à deux moteurs

Tableau 20 : Récapitulatif des différences entre architectures de la pelle sur chenilles de 75 tonnes

6.2. Consommation sur cycle

L'usage de la pelle sur chenilles peut se diviser en plusieurs phases de fonctionnement [37,38] :

- La phase de *dig and dump* qui consiste à remplir le godet et à le vider dans une benne ou sur un tas. Dans ce cycle, la tourelle effectue une rotation après avoir chargé le godet, et une rotation après l'avoir déchargé. Ce va-et-vient en rotation justifie l'utilisation d'une transmission électrique pour la rotation de la tourelle. La transmission électrique permet, d'une part, de récupérer une partie de l'énergie cinétique de rotation au freinage, mais aussi d'accélérer la mise en rotation grâce au couple élevé à régime nul des machines électriques. Un double gain, en consommation et en temps de cycle, est permis par l'hybridation sur ce cycle.
- La phase de *grading* qui consiste à aplanir le sol à l'aide du godet.
- La phase de *travelling* qui consiste à se déplacer sur le chantier entre deux zones de travail.
- La phase d'*idling* ou phase de ralenti, pendant des pauses de l'opérateur ou des temps d'attente.

L'étude bibliographique [39] a permis d'établir que les phases de *dig and dump*, *grading* et *traveling* entraînent une consommation d'énergie relativement similaire. Le simulateur est à la base une démonstration dédiée à la simulation du cycle de *dig and dump*. L'évaluation de la consommation a donc seulement été effectuée sur ce cycle. Il est à noter que la simulation est effectuée sans modélisation de l'interaction avec le sol ou les gravats, et sans chargement, selon le même procédé que l'évaluation de la consommation lors d'essais réels. En conditions réelles, cette méthode garantit la répétabilité des essais. Du reste, la part de la consommation de la phase d'*idling* a été négligée. De plus, en l'absence de données suffisantes pour le recalage des simulateurs, la consommation sur cycle ne sera pas mise en avant. L'écart de consommation entre les différentes architectures et variantes sera principalement étudié.

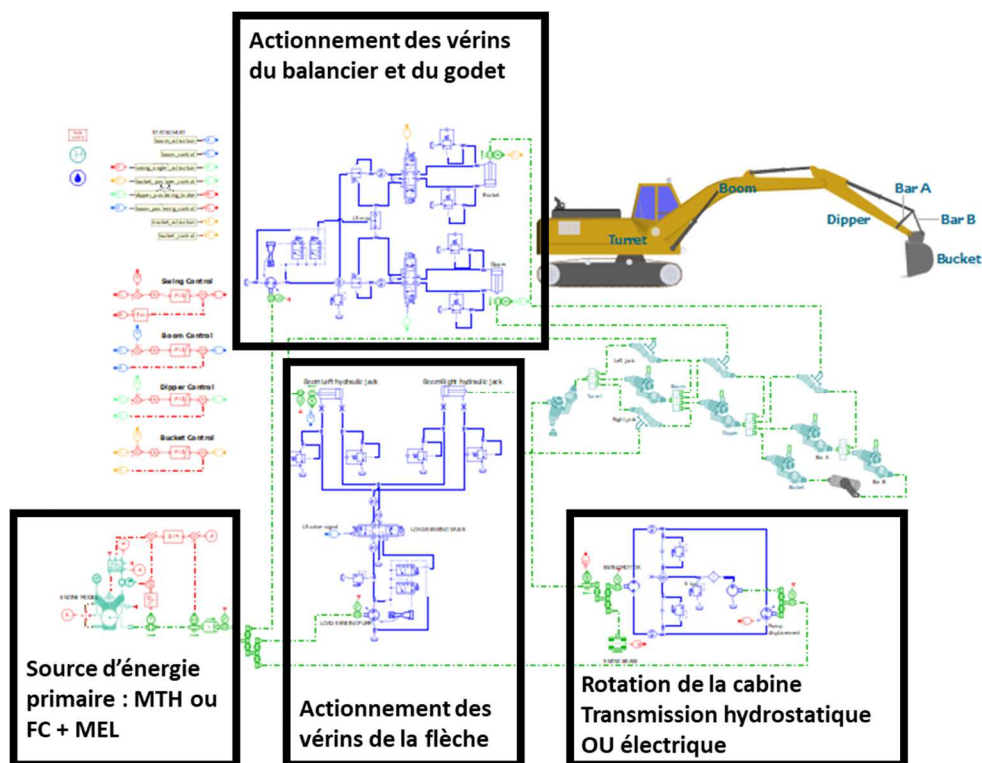


Figure 35 : Vue d'ensemble du simulateur de la pelle sur chenilles de 75 tonnes

Comme indiqué plus haut, l'électrification de la rotation de la tourelle permet de gagner en temps de cycle. Ce gain a été évalué par simulation à environ 10%. Ainsi, plutôt que de comparer des consommations horaires, ce sont des écarts de consommation à iso-production, ou iso-nombre de cycles effectués, qui sont exprimés. L'architecture thermique avec moteur Diesel fait toujours office de référence.

La Figure 36 récapitule ces écarts de consommation pour les différentes variantes étudiées. La puissance moyenne sur le cycle est de l'ordre de 150kW. L'hybridation apporte un gain de l'ordre de 6% par rapport à une variante thermique. Une pile à combustible de puissance trop faible n'amène pas de gain en

consommation énergétique, et est même plus énergivore dans le cas d'une hypothèse de rendement pic à 55%. Avec des systèmes pile à combustible plus puissants, des gains de consommation énergétiques significatifs peuvent être attendus.

Pour rappel, comme précisé dans la section 2.1.1, les écarts de consommation entre les différentes versions à moteur thermique, Diesel ou à combustion d'hydrogène, s'expliquent à la fois par la différence de rendement pic et par la forme de la cartographie de rendement. Ici, on considère des moteurs thermiques d'une puissance de l'ordre de 400kW, ce qui est éloigné du moteur à hydrogène de référence, dont la puissance maximale est de l'ordre de 200kW. L'hypothèse qui consiste à simplement augmenter la cylindrée du moteur simulé pour conserver la même forme de cartographie de rendement et le même rendement pic est donc plutôt défavorable à la consommation des variantes à moteur thermique à hydrogène, puisqu'avec un tel écart de puissance par rapport au moteur initial, on peut s'attendre à une amélioration du rendement. Cette amélioration reste néanmoins difficile à quantifier à l'heure actuelle.

Les tableaux de résultats détaillés sont disponibles dans l'ANNEXE 5.

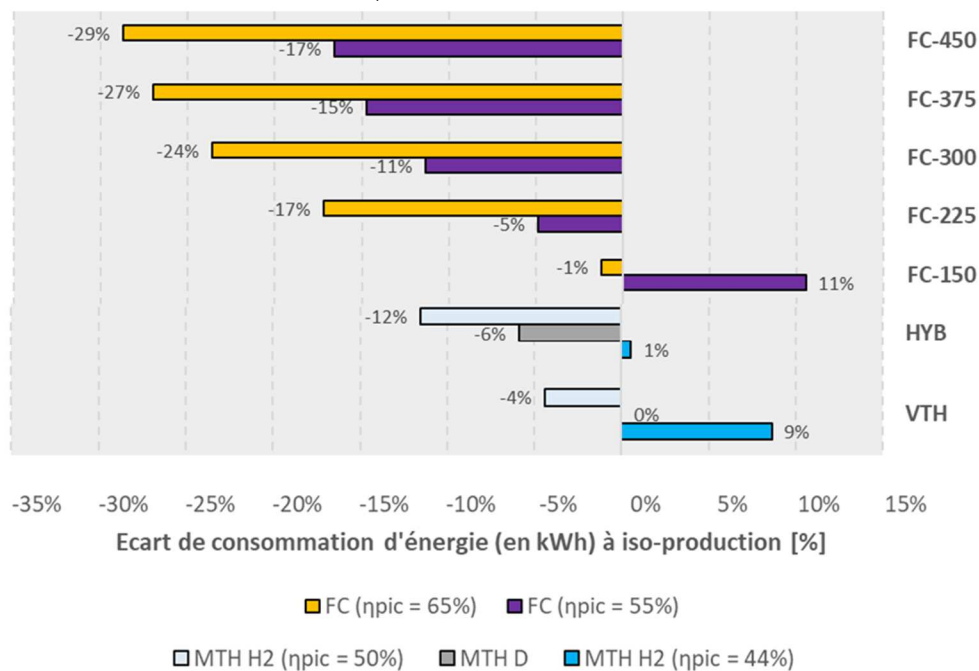


Figure 36 : Récapitulatif des écarts de consommation des variantes de pelles sur chenilles de 75 tonnes

6.3. Coût total de possession

6.3.1. Cas d'étude

Comme expliqué en partie 2.2, peu d'informations ont pu être collectées sur la structure de coût d'une pelle sur chenilles de 75 tonnes, ces informations dépendant fortement du *business mode*/de l'exploitant (location pour différents chantiers, exploitation pour un usage propre) et des conditions d'exploitation. Les informations récoltées permettent de travailler en relatif, par rapport à la pelle de référence Diesel, et uniquement sur les postes de coût liés à l'investissement et à la dépense énergétique.

Les différentes configurations étudiées ici sont :

- Motorisation thermique Diesel (MTH 400 kW) ;
- Motorisation thermique hydrogène (MTH 400 kW, 2 rendements pic : 44 et 50%) ;
- Motorisation hybride : moteur thermique de 400 kW (Diesel ou hydrogène) + 2 moteurs électriques de 100kW + 1 batterie de 25 kWh ;
- Motorisation électrique à pile à combustible (FCEV 150, 225, 300, 375 ou 400 kW) + 2 moteurs électriques de 400 et 100 kW + 1 batterie de 25 kWh. Deux rendements pic sont considérés pour la FC : 55 et 65%.

Une masse d'hydrogène embarquée de 80kg est considérée, permettant une autonomie d'une journée d'activité. Une durée de vie de 5 ans, avec 2 000 heures de fonctionnement annuel est considérée.

La consommation d'énergie, issue de la phase précédente, est prise à iso-production, c'est-à-dire pour un service rendu équivalent à celui de la configuration de référence (même nombre de cycles effectués).

6.3.2. Résultats

L'ensemble des résultats est disponible en ANNEXE 5.

Etant donné le manque d'information sur certains éléments de l'analyse économique (assurance et maintenance notamment), le TCO est présenté de manière comparative par rapport à la configuration de référence, sur la Figure 37. L'investissement requis pour une pelleteuse de cette taille fonctionnant au gazole est estimée à 525 000 €, et la dépense énergétique associée est de 375 000 €. Le passage au MTH-H2 entraîne une hausse de l'investissement correspondant au réservoir à hydrogène (40 000€).

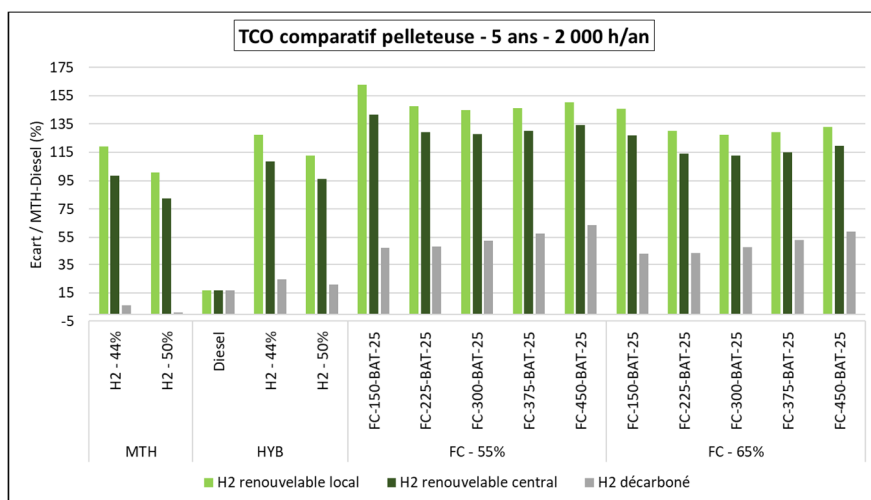


Figure 37 : TCO comparatif de la pelleteuse sur chenilles 75t (Pelleteuse Diesel prise pour référence = 0 ; par exemple, la pelleteuse hybride Diesel revient environ 15 % plus cher que cette référence)

Etant donnée l'importante dépense énergétique, le passage au moteur thermique à hydrogène entraîne une multiplication du TCO par plus du double dans le cas le moins favorable (H2 renouvelable local à 12€/kg en 2022). L'hybridation entraîne des résultats peu différents de l'architecture conventionnelle, car la différence d'investissement est faible et le gain en consommation aussi (gain de 9%).

Concernant les différentes solutions à pile à combustible, la différence avec la configuration de référence diminue lorsque la taille de la FC augmente. En effet, la hausse du coût d'investissement (500€/kW de FC) est compensée par le gain en consommation et donc la dépense associée à la consommation d'hydrogène. Tous les cas d'étude FCEV où l'hydrogène est décarboné entraînent une hausse du TCO supérieure à 100%.

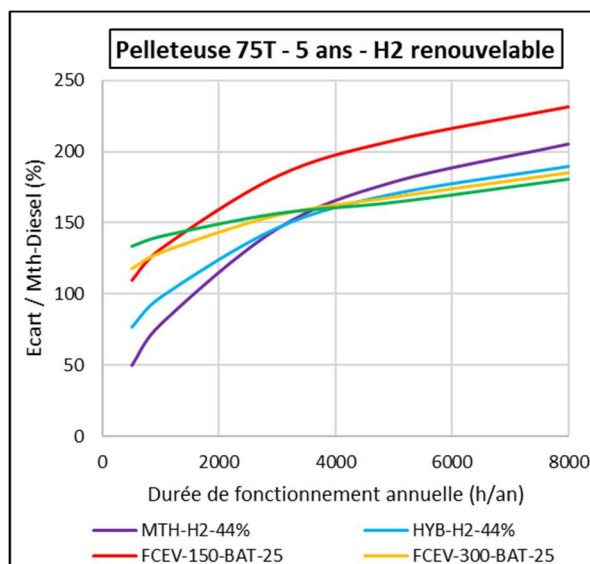
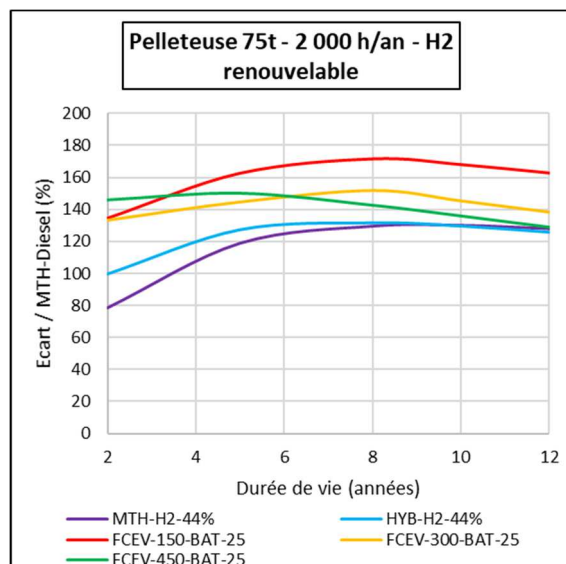


Figure 38 : TCO comparatif en fonction de la durée de vie (à gauche) et de la durée de fonctionnement annuelle (à droite) de la pelleuse sur chenilles (rendement pic FC 55%) (Pelleuse Diesel prise pour référence = 0 ; par exemple, la pelleuse MTH-H2 utilisée 2 ans à raison de 2000h/an revient 80% plus cher que la version Diesel)

La Figure 38 présente l'influence de la durée de vie et de la durée de fonctionnement annuelle sur le TCO de la pelleuse. Au-delà de 5 000 h/an ou de 6 ans de durée de vie, un remplacement du pack batterie et de la pile à combustible est pris en compte.

La variation de ces paramètres modifie la hiérarchie entre les solutions : pour une durée de vie moyenne de 5 ans, l'écart de TCO décroît avec la hausse de la puissance de la pile à combustible, mais ce n'est pas le cas aux extrêmes. De plus l'écart avec la solution thermique Diesel décroît lorsque la durée de vie augmente, et alors que la solution la plus intéressante était le moteur thermique à hydrogène pour une faible durée de vie, il est dépassé par l'hybride à hydrogène et la FC-450 lorsque la durée de vie dépasse 10 ans.

De même la hiérarchie est modifiée lorsque la durée de fonctionnement annuelle varie, d'où la nécessité de choisir la solution la plus appropriée en fonction des besoins individuels de chaque utilisateur.

7. Conclusion / Perspectives

Le véhicule électrique est une voie 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 famille 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 du recours à l'hydrogène pour quatre véhicules lourds peu susceptibles d'être 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 de la consommation énergétique de ces véhicules a permis de statuer sur le fort intérêt des solutions électrifiées à hydrogène pour réduire la consommation énergétique de ces véhicules, et de quantifier cette réduction qui peut atteindre jusqu'à 40% environ par rapport au moteur thermique à hydrogène. Le dimensionnement du couple PàC-batterie est un facteur important sur la consommation d'hydrogène. L'impact du rendement de la pile à combustible a été démontré, et diffère d'un véhicule à l'autre, ainsi que selon l'usage considéré. 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 rôle majeur dans l'efficacité énergétique du véhicule. Néanmoins, il a été montré que l'électrification a aussi un intérêt pour les véhicules long-routiers, pour lesquels la récupération d'énergie est possible dans les descentes, notamment. Une synthèse des résultats de consommation sur les différents cycles a été proposée pour chaque volet, dans le but d'illustrer un usage moyen, non-représentatif de l'ensemble des véhicules. Des tableaux exhaustifs en annexe permettent d'ajuster les calculs et les hypothèses à d'autres conditions d'usage. Les principaux ordres de grandeur de consommation sont fournis dans le Tableau 21 ci-dessous.

	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 21 : 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)

Cette étude énergétique n'a pas tenu compte des contraintes d'intégration des différents éléments dans les véhicules, et doit être considérée comme une étude de sensibilité sur l'effet du dimensionnement des composants de la chaîne de traction sur la consommation. D'autres problématiques n'ont pas été prises en compte, telles que le vieillissement de la pile à combustible ou de la batterie et la baisse de leurs performances, ou bien l'impact de la température ambiante sur le rendement des composants.

L'analyse énergétique a également servi de base pour l'évaluation économique des solutions alternatives à hydrogène. L'évaluation économique a été réalisée en considérant des véhicules qui seraient mis en circulation en 2022, donc avec des hypothèses de coûts actuels, puis ensuite exploités pendant 5 à 12 ans selon les véhicules. L'utilisation de l'indicateur TCO (Coût Total de Possession) 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 étant chère. Il a été identifié que 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. Il est ici démontré que pour tous les véhicules, 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 (prix actuel de l'hydrogène carboné) 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. On peut également déduire des résultats, qu'aujourd'hui, les aides à l'achat ne suffisent pas à absorber le surcoût des solutions utilisant une pile à combustible.

Cette étude économique donne ainsi des éléments d'accompagnement pour les exploitants souhaitant convertir leur flotte vers des solutions à hydrogène. Ce sont toutefois des résultats généraux basés sur des hypothèses moyennes, et il est toujours plus pertinent d'évaluer le TCO sur un usage réel pour en tirer des conclusions propres à son contexte d'utilisation. Enfin certaines hypothèses générales, notamment sur la pelle de chantier, souffrent d'un manque de fiabilité et mériteraient d'être enrichies par des retours d'expérience en conditions réelles.

Les consommations obtenues à l'aide de l'analyse énergétique ont aussi permis de réaliser l'analyse environnementale de ces solutions innovantes à hydrogène dans le cas du poids lourd 44 tonnes et du bus articulé de 18 mètres, grâce à la méthodologie de l'analyse de cycle de vie. Pour la production d'hydrogène, deux scénarios ont été considérés : un premier 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 décarbonée issue d'éolien onshore (« hydrogène décarboné »).

Les résultats montrent que, 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. De plus, pour les deux types de véhicule, les impacts de la production d'hydrogène représentent la majorité des impacts du cycle de vie (impacts d'ordre 1), notamment dans le cas du scénario hydrogène bas carbone. 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. Dans ce cas, les véhicules à pile à combustible présentent les émissions de GES les plus faibles.

L'utilisation d'hydrogène renouvelable permet de réduire encore de moitié environ les émissions de GES du poids lourd et du bus. Pour ce scénario, les écarts de consommation ne permettent plus de différencier nettement les véhicules à pile à combustible des versions à moteur thermique à hydrogène, notamment pour le poids lourd. Il devient alors nécessaire de considérer les impacts d'ordre 2 (pile à combustible, batterie, moteur thermique, moteur électrique) pour pouvoir déterminer la solution qui présente les meilleures émissions de GES, mais les écarts sont très faibles.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] ACEA, "Vehicles in use Europe," 2022.
Koch, D., Eßer, E., Kureti, S. et al, "H₂-deNO_x Catalyst for H₂ Combustion Engines," *MTZ Worldwide* 81, 30-35, 2020, doi:10.1007/s38313-020-0229-3.
- [2] Sery, J., Leduc, P., "Fuel cell behavior and energy balance on board a Hyundai Nexa," *International Journal of Engine Research*, 2021, doi:10.1177/14680874211059046.
- [3] Sens, M. et al, "Hydrogen Powertrains in Competition to Fossil Fuel Based Internal Combustion Engines and Battery Electric Powertrains," *42nd International Vienna Motor Symposium*, 29-30 April 2021.
- [4] Argonne National Laboratory, Energy Systems Division, "Technology Assessment of a Fuel Cell Vehicle: 2017 Toyota Mirai," *Report # ANL/ESD-18/12*, 2017.
- [5] Dabadie, J., Sciarretta, A., Font, G., and Le Berr, F., "Automatic Generation of Online Optimal Energy Management Strategies for Hybrid Powertrain Simulation," *SAE Technical Paper 2017-24-0173*, 2017, doi:10.4271/2017-24-0173.
- [6] ADEME, IFPEN, "Etude Energétique, Economique et Environnementale du Transport Routier à Horizon 2040 (E4T 2040)," 2022.
- [7] T&E, "Electric buses arrive on time," 2018.
- [8] Ricardo, "Fuel Cell: a sustainable clean solution for long haul commercial vehicles," 2020.
- [9] France Hydrogène Mobilité, "Quelles perspectives pour le poids lourd électrique à hydrogène pour le transport de marchandises?," 2020.
- [10] CATP, "Etude comparative sur les différentes motorisations de bus," 2017.
- [11] ADEME, "Panorama et évaluation des différentes filières d'autobus urbains," 2015.
- [12] Preda, I., Popescu, D., "Considerations on Green Public Procurement of Coaches," *Journal of Eastern Europe Research in Business and Economics*, 2019, doi:10.5171/2019.139043.
- [13] Ricardo Energy & Environment, "Improving understanding of technology and costs for CO₂ reductions from cars and LCVs in the period to 2030 and development of cost curves," 2014.
- [14] BEUC, "Low carbon cars in the 2020s: consumer impacts and EU policy implication," 2016.
- [15] BNEF, "Annual battery price survey," 2020.
- [16] Nykvist, B., Sprei, F., Nilsson, M., "Assessing the progress toward lower priced long range battery electric vehicles," *Energy Policy*, vol. 124, pp. 144-155, 2019, doi:10.1016/j.enpol.2018.09.035.
- [17] European Climate Foundation, "Fueling Europe's future," 2019.
- [18] RTE, *Futurs énergétiques 2050*, 2021.
- [19] Deloitte, "Fueling the future of mobility," 2020.
- [20] IVECO IRISBUS, "Autobus, un devoir d'exemplarité environnementale," 2012, consulté le 14 novembre 2017.
- [21] European Commission, JRC, IPTS, "Environmental Improvement of Passenger Cars (IMPRO-car)," [22] JRC scientific and technical reports, 2008.
- [23] ADEME, "Analyse du cycle de vie relative à l'hydrogène," 2020.
- [24] Greet Model. [Online]. <https://greet.es.anl.gov/>
- [25] DOE, "DOE Advanced Truck Technologies – Subsection of the Electrified Powertrain Roadmap," 2019.
- [26] Bareiß, K., de la Rua, C., Möckl, M., Hamacher, T., "Life cycle assessment of hydrogen from proton exchange membrane water electrolysis in future energy systems," *Applied Energy*, vol. 237, pp. 862-872, 2019, doi:10.1016/j.apenergy.2019.01.001.

- Zhao, G., Schrøder Pedersen, A., "Life Cycle Assessment of Hydrogen Production and Consumption in an Isolated Territory," *Procedia CIRP*, vol. 69, pp. 529-533, 2018,
 [27] doi:10.1016/j.procir.2017.11.100.
- FCH JU, "Life Cycle Assessment of Hydrogen and Fuel Cell Technologies," JRC Technical Report,
 [28] 2020.
- JEC, "Well-To-Wheels report v5," JRC Science for Policy Report, 2020.
- ADEME, "Elaboration selon les principes des ACV des bilans énergétiques, des émissions GES et des autres impacts environnementaux induits par l'ensemble des filières de véhicules électriques et
 [30] thermiques," 2012.
- European Commission, "Renewable Energy – Recast to 2030 (RED II)," 2018.
 [31]
- ADEME, "Transport et logistique des déchets ," 2014.
 UNFCCC. (2020), *GHG data from the UNFCCC*, <https://unfccc.int/process-and-meetings/transparency-and-reporting/greenhouse-gas-data/ghg-data-unfccc/ghg-data-from-unfccc>.
 [33]
- Vehicle Energy Consumption calculation Tool. (2021, January)., ,
 [34] https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/vecto_en.
- Comité National Routier, "Enquête Longue Distance," 2019.
 [35]
- FCH JU, "Strategies for joint procurement of fuel cell buses," 2018, doi:10.2843/459429.
 Altare, G., Padovani, D., Nervegna, N., "A Commercial Excavator: Analysis, Modelling and Simulation of the Hydraulic Circuit," *SAE Technical Paper 2012-01-2040*, 2012, doi:10.4271/2012-01-
 [37] 2040.
- Vukovic, M., Leifeld, R., Murrenhoff, H., "Reducing Fuel Consumption in Hydraulic Excavators—A
 [38] Comprehensive Analysis," *Energies*, 2017, 10(5):687. doi:10.3390/en10050687.
- Fecke, M., "Bewertung der Energieeffizienz von Baumaschinen mithilfe einer praxisnahen Lastzyklusentwicklung für einen In-Situ-Test," *Dissertation zur Erlangung eines Doktorgrades*
 [39] *Doktor-Ingenieur*, Wuppertal, Bergischen Universität Wuppertal, 2018.
- SIA, "A COMPLETER,"
 [40]
- Ecoinvent. (2022) [Online]. <https://ecoinvent.org/>
 [41]

INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES

TABLEAUX

Tableau 1 : Hypothèses de densité gravimétrique.....	13
Tableau 2 : Hypothèses de maintenance et assurance pour les différents véhicules.....	17
Tableau 3 : Scénarios durée de vie des véhicules, batteries, piles à combustible et kilométrage annuel..	18
Tableau 4 : Les architectures étudiées dans la partie ACV	18
Tableau 5 : Modélisation de la pile à combustible.....	19
Tableau 6 : Valeurs d'émissions GES pour la production d'hydrogène	20
Tableau 7 : Valeurs des consommations selon les différentes architectures pour le poids lourd et le bus	21
Tableau 8 : Hypothèses véhicules pour le poids lourd 44 tonnes.....	23
Tableau 9 : Evaluation des critères du cahier des charges pour les poids lourd 44 tonnes à pile à combustible (entre parenthèses, les performances batterie vide).....	23
Tableau 10 : Performances à 8% de pente pour les poids lourds 44 tonnes à pile à combustible (entre parenthèses, les performances batterie vide)	24
Tableau 11 : Pondération de référence pour le calcul de la consommation moyenne des poids lourds 44 tonnes dans ce rapport.....	25
Tableau 12 : Ordres de grandeur de consommation et d'autonomie pour les variantes considérées de poids lourds 44 tonnes.....	26
Tableau 13 : Hypothèses véhicules pour le bus urbain articulé de 18 mètres	33
Tableau 14 : Caractéristiques GMP de quelques bus articulés de 18 mètres en circulation	33
Tableau 15 : Pondération de référence pour le calcul de la consommation moyenne des bus urbains de 18 mètres	33
Tableau 16 : Ordres de grandeur de consommation et d'autonomie pour les variantes considérées de bus urbain de 18 mètres.....	34
Tableau 17 : Hypothèses véhicules pour l'autocar régional.....	39
Tableau 18 : Pondération de référence pour le calcul de la consommation moyenne des autocars régionaux dans ce rapport	39
Tableau 19 : Ordres de grandeur de consommation et d'autonomie pour les variantes considérées d'autocar régional.....	40
Tableau 20 : Récapitulatif des différences entre architectures de la pelle sur chenilles de 75 tonnes	42
Tableau 21 : Ordres de grandeur des consommations de combustible pour les différents véhicules étudiés.....	47
Tableau 22 : Consommation d'hydrogène sur les cycles VECTO en épuisement de charge batterie des variantes à pile à combustible de poids lourd 44 tonnes.....	64
Tableau 23 : Consommation d'hydrogène sur les cycles VECTO en maintien de charge batterie des variantes à pile à combustible de poids lourd 44 tonnes.....	65
Tableau 24 : Consommation d'hydrogène sur les cycles VECTO des variantes à pile à combustible de poids lourd 44 tonnes	66
Tableau 25 : Consommation électrique sur les cycles VECTO des variantes à pile à combustible de poids lourd 44 tonnes	67
Tableau 26 : Autonomie sur les cycles VECTO des variantes à pile à combustible de poids lourd 44 tonnes.....	68
Tableau 27 : Consommation simulée sur les trajets réels des variantes à pile à combustible de poids lourd 44 tonnes (départ batterie pleine, arrivée batterie vide).....	69
Tableau 28 : Consommation d'hydrogène sur les cycles VECTO en épuisement de charge batterie des variantes hybrides thermique H2 - électrique de poids lourd 44 tonnes.....	71
Tableau 29 : Consommation d'hydrogène sur les cycles VECTO en maintien de charge batterie des variantes hybrides thermique H2 - électrique de poids lourd 44 tonnes.....	72
Tableau 30 : Consommation d'hydrogène sur les cycles VECTO des variantes hybrides thermique H2 - électrique de poids lourd 44 tonnes	73
Tableau 31 : Consommation électrique sur les cycles VECTO des variantes hybrides thermique H2 - électrique de poids lourd 44 tonnes	74
Tableau 32 : Autonomie sur les cycles VECTO des variantes hybrides thermique H2 - électrique de poids lourd 44 tonnes	75
Tableau 33 : Consommation simulée sur les trajets réels des variantes hybrides thermique H2 - électrique de poids lourd 44 tonnes (départ batterie pleine, arrivée batterie vide).....	76
Tableau 34 : Ordres de grandeur des émissions d'oxydes d'azote pour les variantes de poids lourds 44 tonnes à moteur à combustion interne d'hydrogène.....	77
Tableau 35 : TCO du poids lourd 44t, résultats complets (€)	77

Tableau 36 : Consommation sur le cycle VECTO Urban en épuisement de charge batterie des variantes à pile à combustible de bus articulé de 18 mètres.....	79
Tableau 37 : Consommation sur le cycle VECTO Urban en maintien de charge batterie des variantes à pile à combustible de bus articulé de 18 mètres.....	80
Tableau 38 : Consommation d'hydrogène sur le cycle VECTO Urban des variantes à pile à combustible de bus articulé de 18 mètres (avec et sans prise en compte d'une consommation du système de chauffage/ventilation/climatisation CVC).....	81
Tableau 39 : Consommation électrique sur le cycle VECTO Urban des variantes à pile à combustible de bus articulé de 18 mètres (avec et sans prise en compte d'une consommation du système de chauffage/ventilation/climatisation CVC).....	82
Tableau 40 : Autonomie sur le cycle VECTO Urban des variantes à pile à combustible de bus articulé de 18 mètres (avec et sans prise en compte d'une consommation du système de chauffage/ventilation/climatisation CVC).....	83
Tableau 41 : Consommation simulée sur les trajets réels des variantes à pile à combustible de bus articulé de 18 mètres (maintien de charge batterie, avec et sans prise en compte d'une consommation du système de chauffage/ventilation/climatisation CVC).....	84
Tableau 42 : Bus 18m, résultats TCO complets (€).....	85
Tableau 43 : Consommation sur le cycle VECTO Interurban en épuisement de charge batterie des variantes à pile à combustible de car régional (avec et sans prise en compte d'une consommation du système de chauffage/ventilation/climatisation CVC).....	87
Tableau 44 : Consommation sur le cycle VECTO Interurban en maintien de charge des variantes à pile à combustible de car régional (avec et sans prise en compte d'une consommation du système de chauffage/ventilation/climatisation CVC).....	88
Tableau 45 : Consommation d'hydrogène sur le cycle VECTO <i>Interurban</i> des variantes à pile à combustible de car régional (avec et sans prise en compte d'une consommation du système de chauffage/ventilation/climatisation CVC).....	89
Tableau 46 : Consommation électrique sur le cycle VECTO <i>Interurban</i> des variantes à pile à combustible de car régional (avec et sans prise en compte d'une consommation du système de chauffage/ventilation/climatisation CVC).....	90
Tableau 47 : Autonomie sur le cycle VECTO Interurban des variantes à pile à combustible de car régional (avec et sans prise en compte d'une consommation du système de chauffage/ventilation/climatisation CVC).....	91
Tableau 48 : TCO Autocar, résultats complets (€).....	92
Tableau 49 : Consommation horaire sur le cycle « dig and dump » des différentes variantes de pelle sur chenilles de 75 tonnes.....	93
Tableau 50 : Temps de cycle sur le cycle « dig and dump » des différentes variantes de pelle sur chenilles de 75 tonnes.....	93
Tableau 51 : Consommation à iso-production sur le cycle « dig and dump » des différentes variantes de pelle sur chenilles de 75 tonnes.....	93
Tableau 52 : Ecart de consommation horaire d'énergie sur le cycle « dig and dump » des différentes variantes de pelle sur chenilles de 75 tonnes.....	94
Tableau 53 : Ecart de consommation d'énergie à iso-production sur le cycle « dig and dump » des différentes variantes de pelle sur chenilles de 75 tonnes.....	94
Tableau 54 : TCO comparatif : écart par rapport à la version à MTH – Diesel (en %).....	94

FIGURES

Figure 1 : Illustration de la désignation des différents cas étudiés.....	8
Figure 2 : Cartographie de rendement effectif (en %) du moteur thermique à combustion d'hydrogène utilisé dans l'étude (dérivée de [2]).....	9
Figure 3 : Courbes de rendement des systèmes pile à combustible utilisés dans l'étude et courbes de références issues de mesures sur véhicules légers ([3,4,5]).....	10
Figure 4 : Comparaison entre les courbes de rendement de 2 systèmes pile à combustible en fonction du nombre de modules (en supposant un rendement pic à 65% pour chaque module).....	10
Figure 5 : Cartographie de rendement (en %) du système « machine électrique + onduleur ».....	11
Figure 6 : Exemple de modèle Simcenter Amesim pour la simulation d'un véhicule à pile à combustible.....	12
Figure 7 : <i>Détail des étapes de calcul pour arriver au TCO</i>	13
Figure 8 : <i>Calcul du TCO</i>	14
Figure 9 : <i>Représentation de l'approche bottom-up utilisée pour déterminer le prix de vente des véhicules</i>	14
Figure 10 : <i>Scenarios de prix des batteries (pack complet) entre 2020 et 2050 (source : [18])</i>	16
Figure 11 : <i>Evolution du prix de l'hydrogène</i>	17
Figure 12 : Modélisation de la production d'hydrogène.....	20
Figure 13 : Etapes considérées dans le périmètre WtW incluant le cycle de vie véhicule.....	22

Figure 14 : Masse à vide des configurations de poids lourds 44 tonnes	24
Figure 15 : Récapitulatif des consommations pondérées des variantes rechargeables de poids lourd 44 tonnes.....	26
Figure 16 : Comparaison entre les résultats sur les cycles VECTO avec chargement et ceux sur les trajets réels avec chargement (FCEV rechargeables, $\eta_{pic} = 65\%$)	27
Figure 17 : Cas d'étude de l'analyse TCO du PL 44t.....	28
Figure 18 : TCO du poids lourd 44t, durée de vie 12 ans (PàC avec un rendement pic de 65%).....	28
Figure 19 : TCO du poids lourd 44t, durée de vie 4 ans	29
Figure 20 : Analyse de sensibilité TCO PL 44t - origine de l'hydrogène (a) et kilométrage annuel (b).....	29
Figure 21 : TCO du poids lourd 44t en fonction du prix de l'hydrogène et de la pile à combustible	30
Figure 22 : Résultats ACV du poids lourd 44t pour le scénario hydrogène bas carbone	31
Figure 23 : Résultats ACV du poids lourd 44t pour le scénario hydrogène renouvelable	32
Figure 24 : Récapitulatif des consommations pondérées des variantes rechargeables de bus articulé de 18 mètres	34
Figure 25 : Comparaison entre les résultats des variantes FCEV rechargeables de bus urbain de 18 mètres sur les différents cycles, pour 80 passagers.....	35
Figure 26 : TCO du bus 18m	35
Figure 27 : Influence du rendement de la FC sur le TCO du bus 18m.....	36
Figure 28 : TCO du bus 18m en fonction du coût de la FC et du prix de l'hydrogène.....	37
Figure 29 : Résultats ACV du bus 18 m pour le scénario hydrogène bas carbone	37
Figure 30 : Résultats ACV du bus 18 m pour le scénario hydrogène renouvelable.....	38
Figure 31 : Récapitulatif des consommations pondérées des variantes rechargeables d'autocar régional	40
Figure 32 : TCO de l'autocar	41
Figure 33 : Autocar - répartition du TCO par poste de dépense, moyenne sur les différentes architectures.....	41
Figure 34 : Illustration de la pelle sur chenilles de 75 tonnes et de la masse des différents éléments principaux.....	42
Figure 35 : Vue d'ensemble du simulateur de la pelle sur chenilles de 75 tonnes	43
Figure 36 : Récapitulatif des écarts de consommation des variantes de pelles sur chenilles de 75 tonnes	44
Figure 37 : TCO comparatif de la pelleuse sur chenilles 75t	45
Figure 38 : TCO comparatif en fonction de la durée de vie (gauche) et de la durée de fonctionnement annuelle (droite) de la pelleuse sur chenilles (rendement pic FC 55%)	46
Figure 39 : Cycle VECTO Urban Delivery	55
Figure 40 : Cycle VECTO Regional Delivery	55
Figure 41 : Cycle VECTO Longhaul	56
Figure 42 : Cycle VECTO Urban	56
Figure 43 : Cycle VECTO Interurban.....	57
Figure 44 : Trajet Paris – Lille.....	58
Figure 45 : Trajet Rennes – Strasbourg.....	59
Figure 46 : Trajet Bordeaux – Strasbourg	60
Figure 47 : Trajet Lyon – Milan	61
Figure 48 : Trajets de bus lyonnais	62
Figure 49 : Répartition de la masse (en kg) des variantes à pile à combustible de poids lourd 44 tonnes (masse d'hydrogène embarquée : 50kg).....	63
Figure 50 : Répartition de la masse (en kg) des variantes hybride thermique H2 - électrique de poids lourd 44 tonnes (masse d'hydrogène embarquée : 50kg)	70
Figure 51 : Répartition de la masse (en kg) des variantes à pile à combustible de bus articulé de 18 mètres (masse d'hydrogène embarquée : 40kg).....	78
Figure 52 : Répartition de la masse (en kg) des variantes à pile à combustible d'autocar régional (masse d'hydrogène embarquée : 40kg)	86

SIGLES ET ACRONYMES

ACV	Analyse du Cycle de Vie
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
BEV	<i>Battery Electric Vehicle</i> (véhicule électrique à batterie)
BV	Boîte de vitesses
CVC	Chauffage, ventilation, climatisation
D	Diesel
ECMS	<i>Energy Consumption Minimization Strategy</i> (stratégie de minimisation de la consommation énergétique)
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
NOx	Oxydes d'azote (NO, NO ₂)
PàC	Pile à combustible
PHEV	<i>Plug-in Hybrid Electric Vehicle</i> (véhicule hybride rechargeable)
PL	Poids lourd
PEM, PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell (pile à combustible à membrane échangeuse de protons)
PME	Pression Moyenne Effective
SMR	Steam Methane Reforming (Vaporeformage de méthane)
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)
VHU	Véhicule hors d'usage
VTH	Véhicule à architecture conventionnelle avec moteur thermique

ANNEXES

ANNEXE 1 : Compléments sur les cycles d'usage

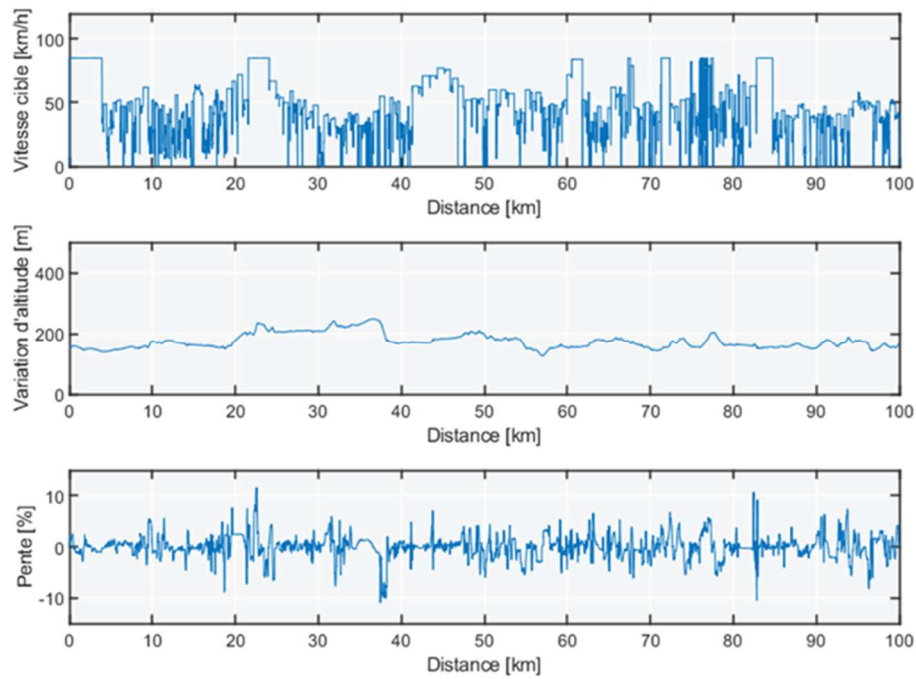


Figure 39 : Cycle VECTO Urban Delivery

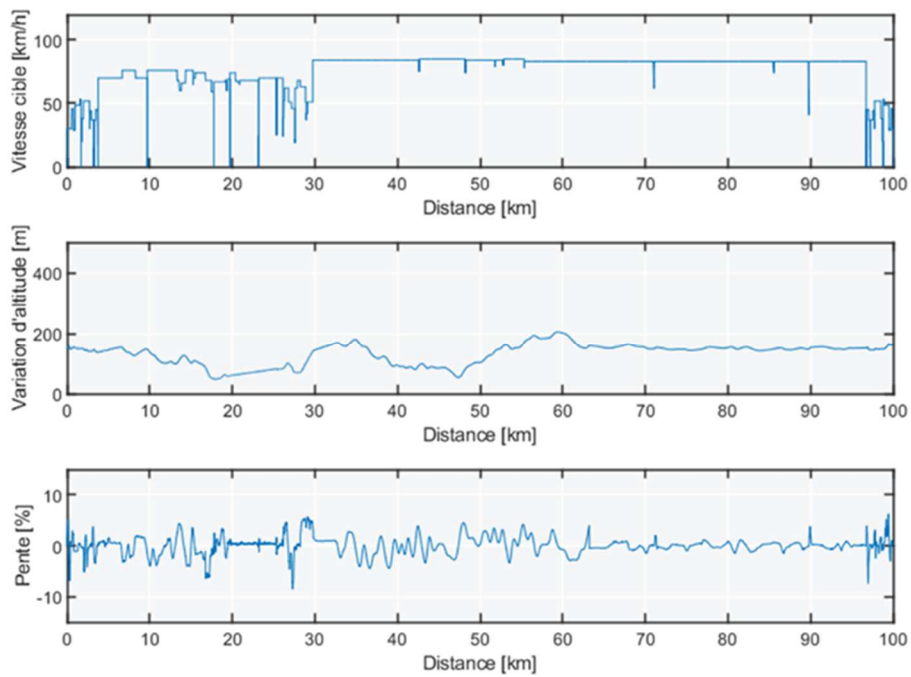


Figure 40 : Cycle VECTO Regional Delivery

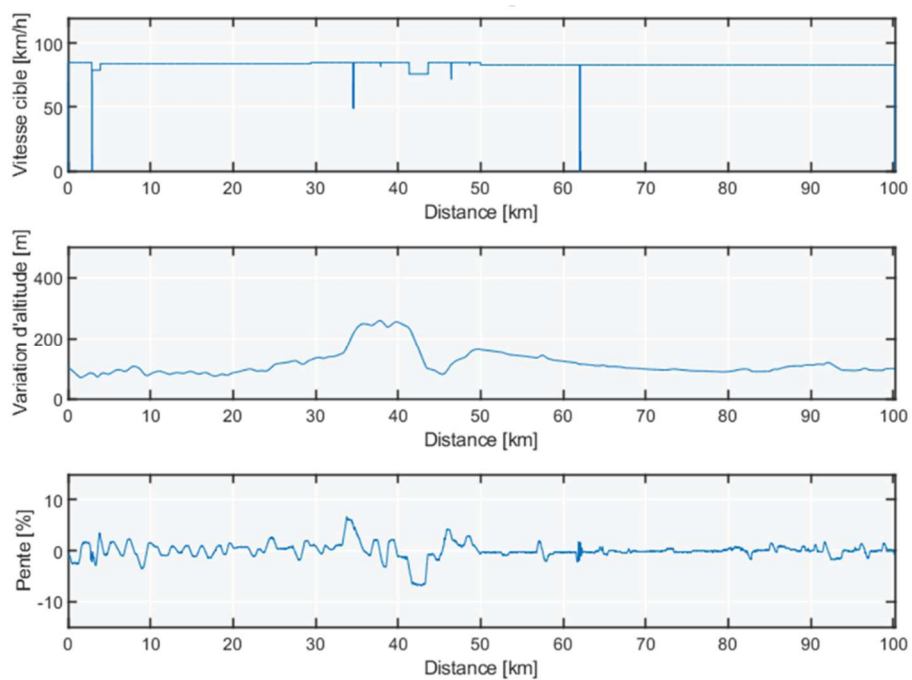


Figure 41 : Cycle VECTO Longhaul

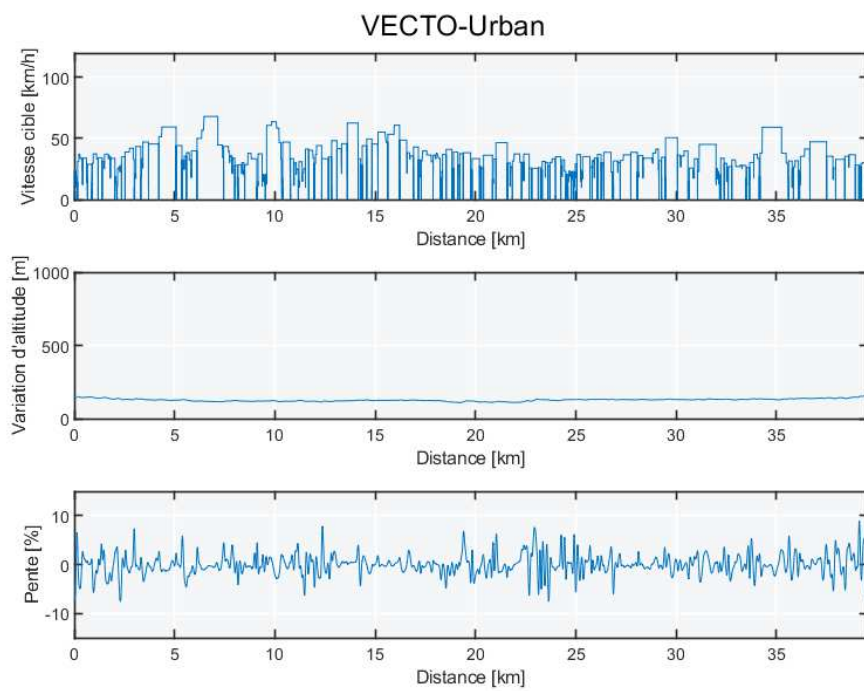


Figure 42 : Cycle VECTO Urban

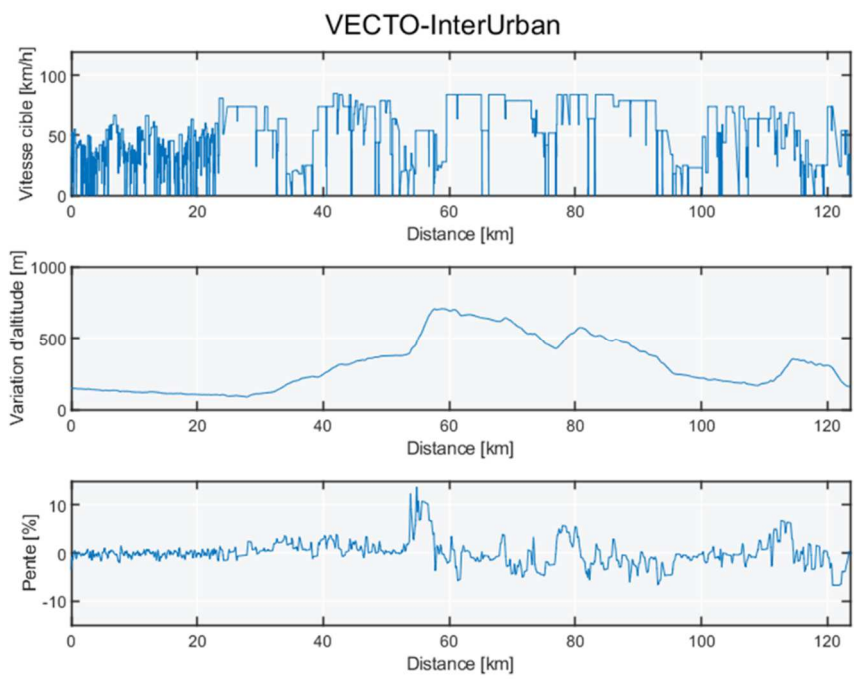


Figure 43 : Cycle VECTO Interurban

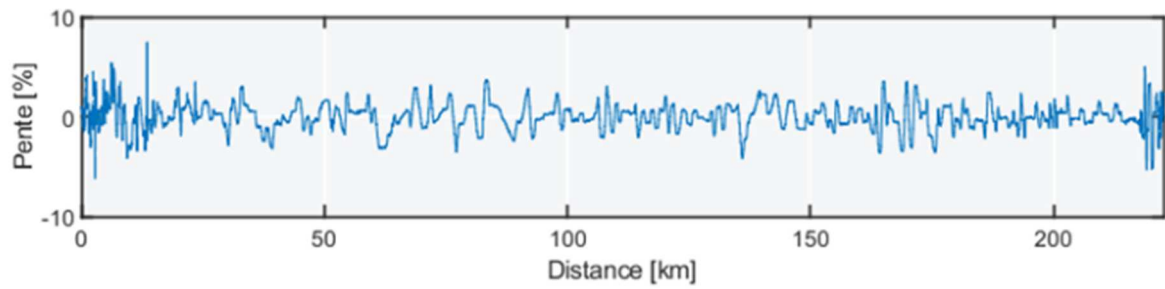
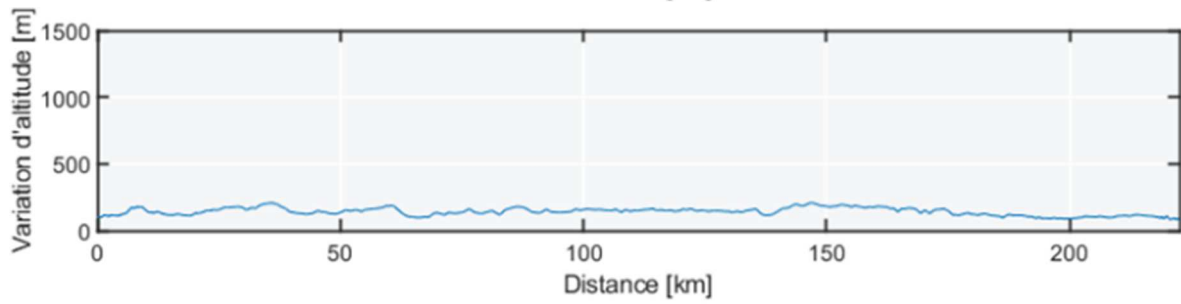
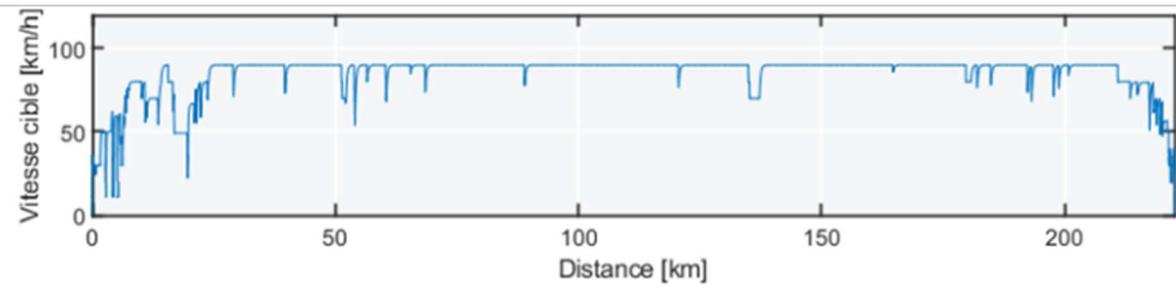


Figure 44 : Trajet Paris – Lille

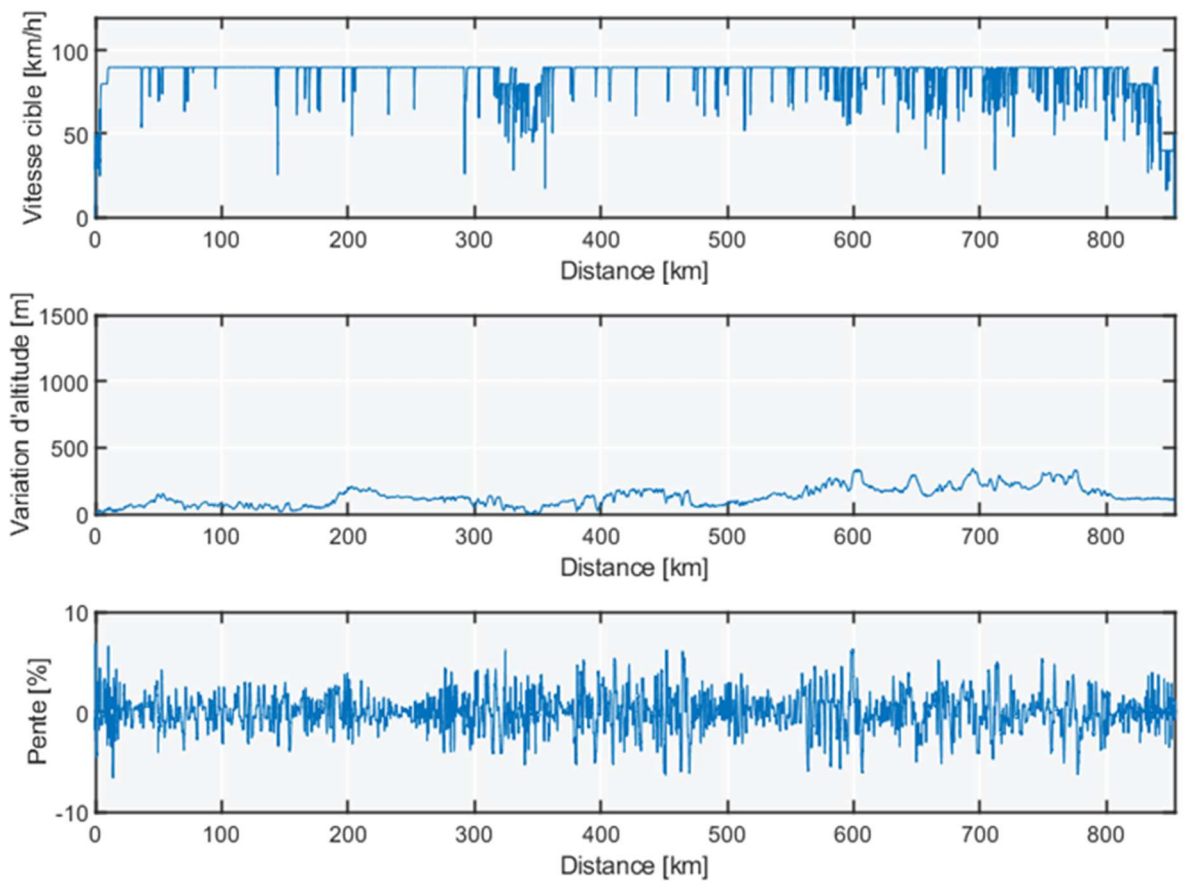


Figure 45 : Trajet Rennes – Strasbourg

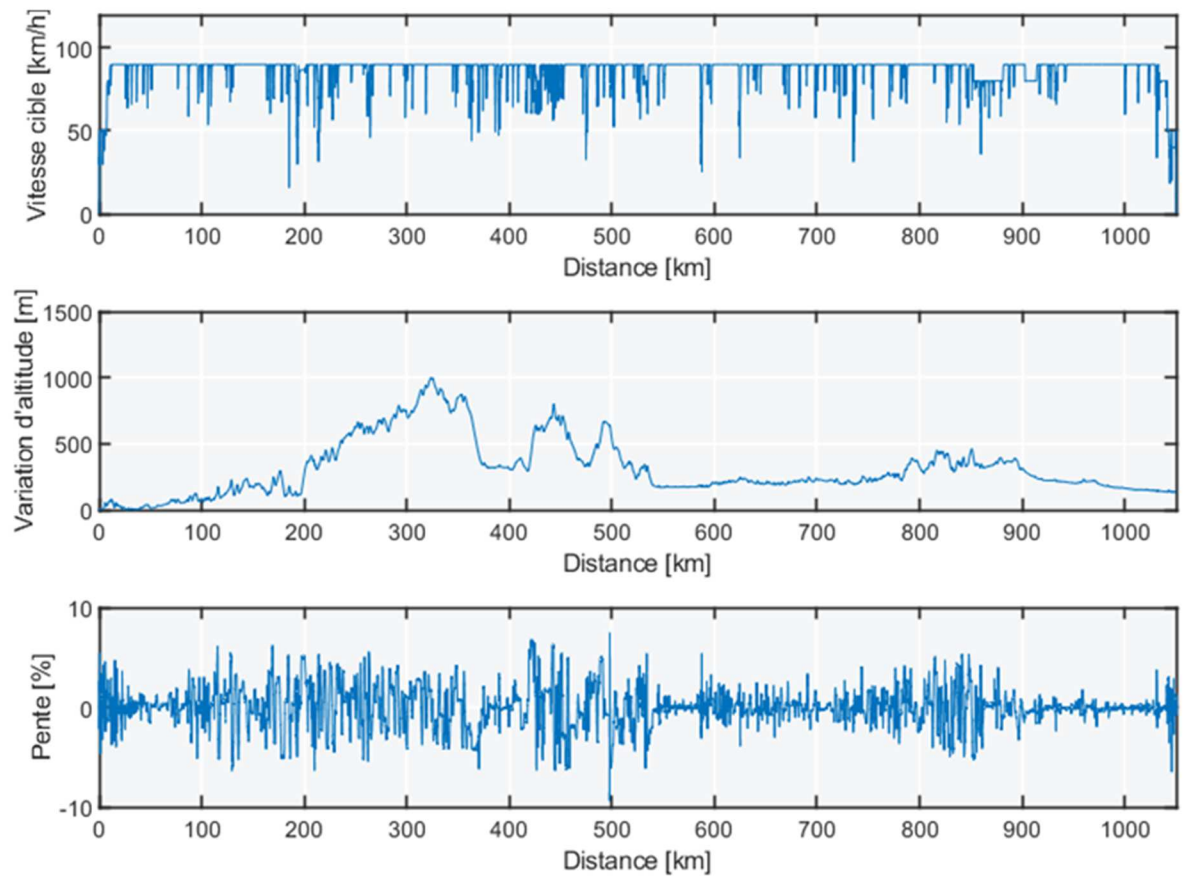


Figure 46 : Trajet Bordeaux – Strasbourg

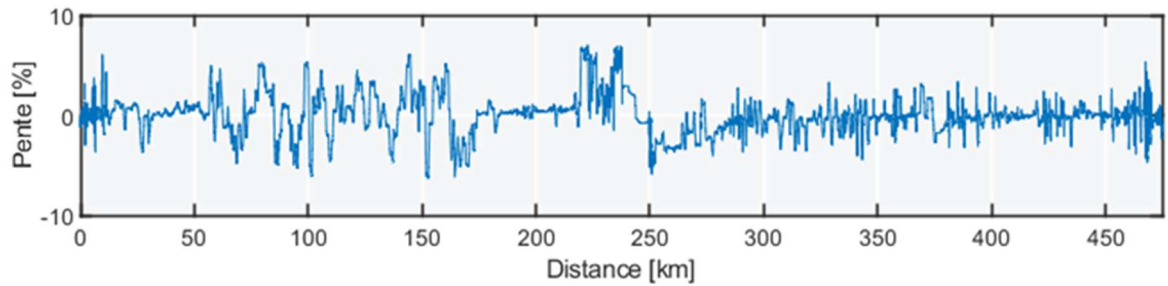
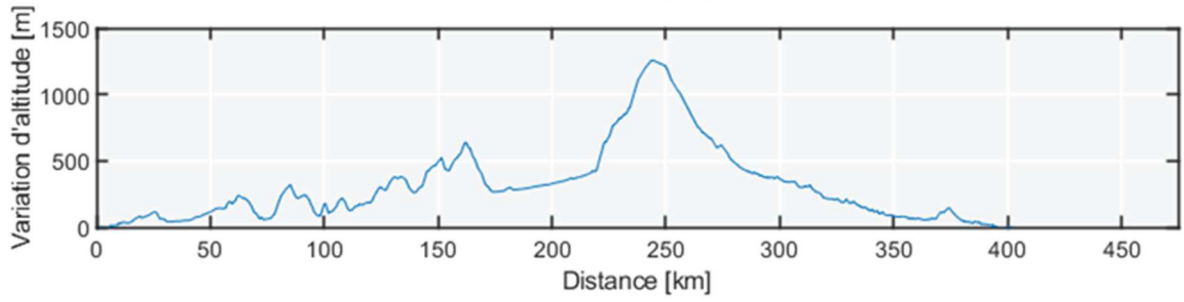
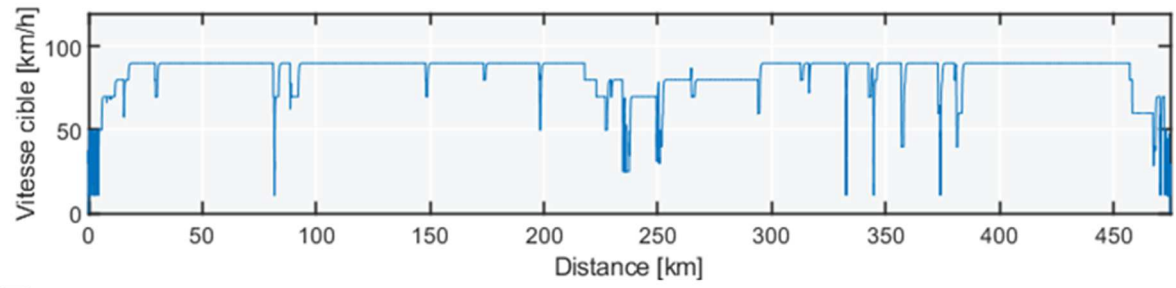
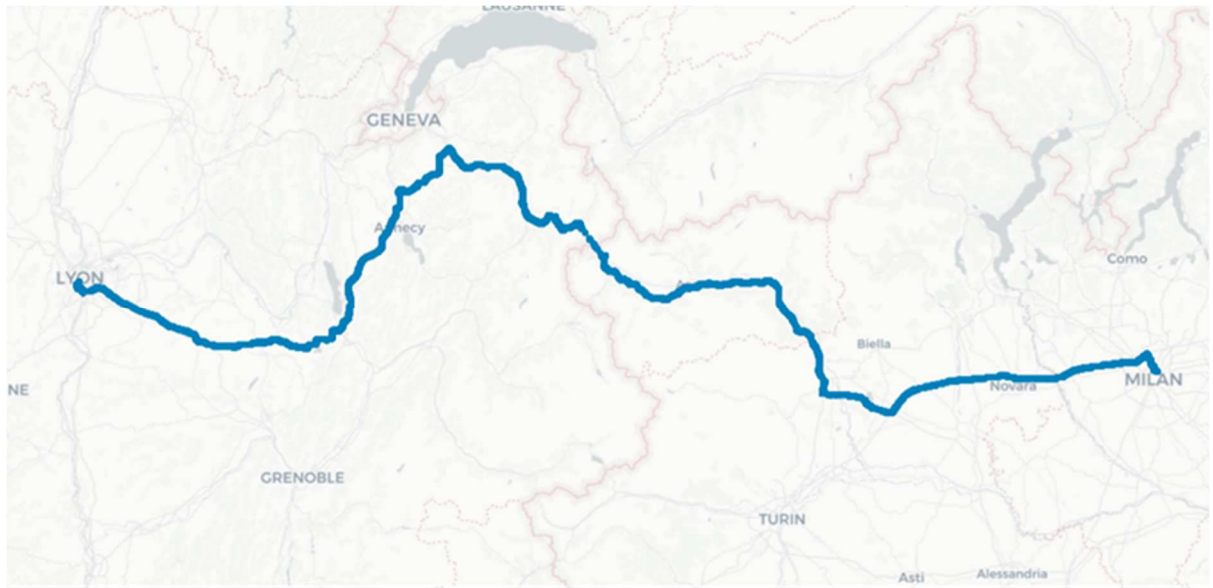


Figure 47 : Trajet Lyon – Milan

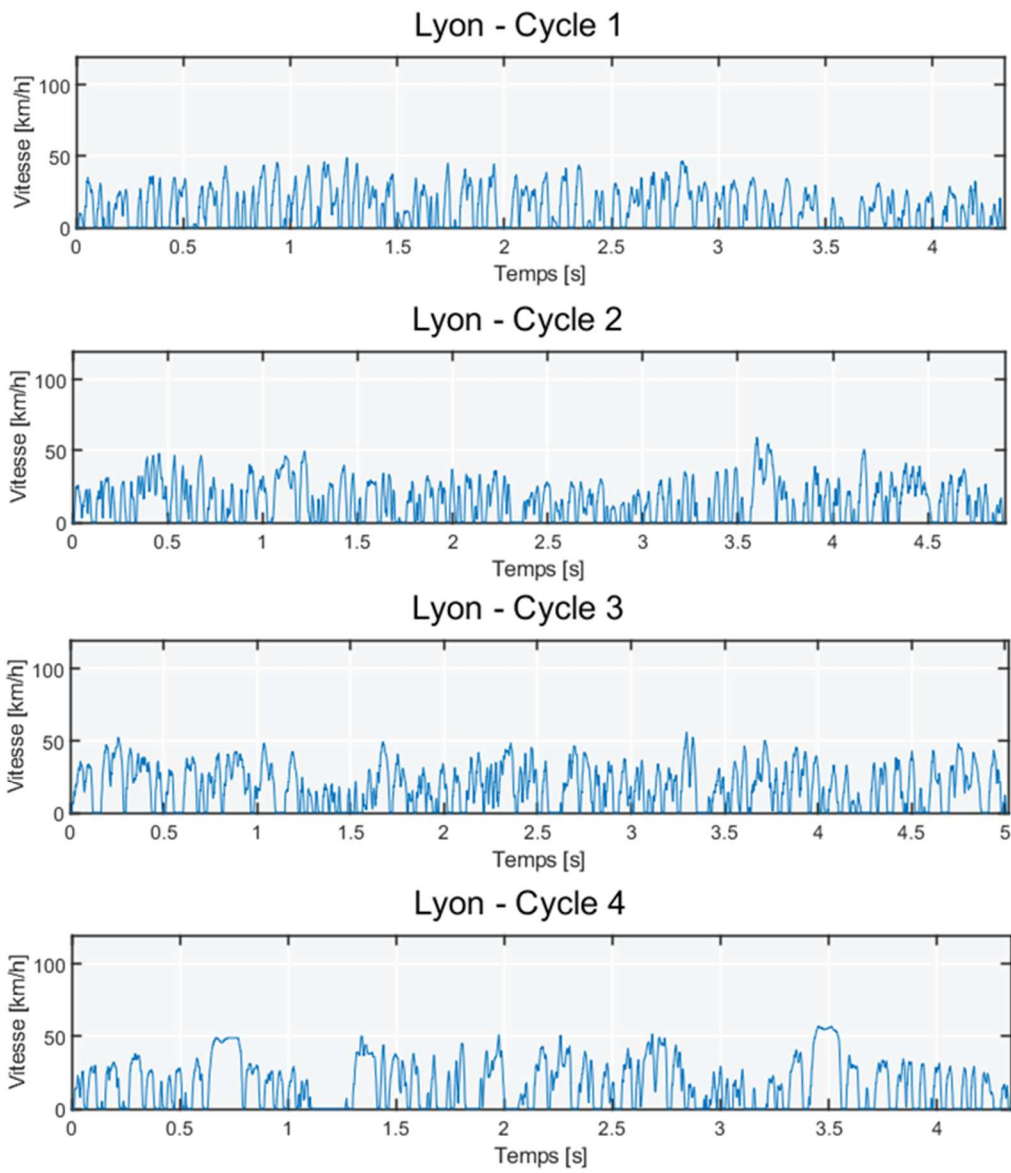
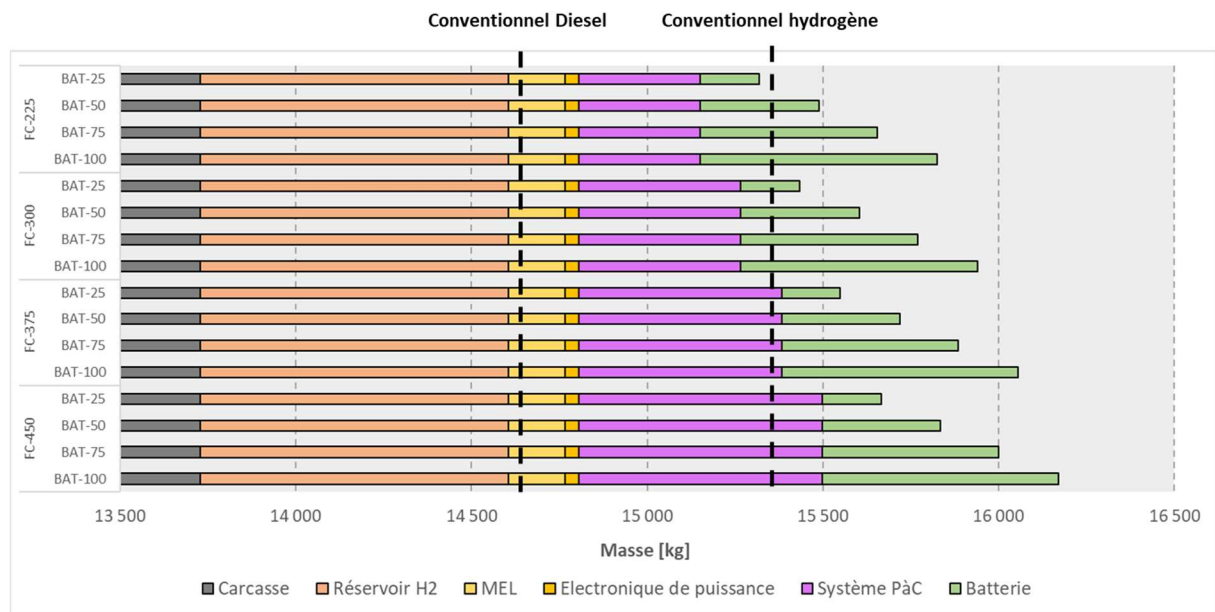


Figure 48 : Trajets de bus lyonnais

ANNEXE 2 : Compléments sur les poids lourds 44 tonnes



		Carcasse	Réservoir H2	MEL	Electronique de puissance	Système PaC	Batterie	Total	Chargement maximal [kg]
FC-225	BAT-25	13 728	877	160	40	346	168	15 319	28 681
	BAT-50	13 728	877	160	40	346	337	15 488	28 512
	BAT-75	13 728	877	160	40	346	504	15 655	28 345
	BAT-100	13 728	877	160	40	346	673	15 824	28 176
FC-300	BAT-25	13 728	877	160	40	462	168	15 434	28 566
	BAT-50	13 728	877	160	40	462	337	15 604	28 396
	BAT-75	13 728	877	160	40	462	504	15 770	28 230
	BAT-100	13 728	877	160	40	462	673	15 939	28 061
FC-375	BAT-25	13 728	877	160	40	577	168	15 550	28 450
	BAT-50	13 728	877	160	40	577	337	15 719	28 281
	BAT-75	13 728	877	160	40	577	504	15 886	28 114
	BAT-100	13 728	877	160	40	577	673	16 055	27 945
FC-450	BAT-25	13 728	877	160	40	692	168	15 665	28 335
	BAT-50	13 728	877	160	40	692	337	15 834	28 166
	BAT-75	13 728	877	160	40	692	504	16 001	27 999
	BAT-100	13 728	877	160	40	692	673	16 170	27 830

Figure 49 : Répartition de la masse (en kg) des variantes à pile à combustible de poids lourd 44 tonnes (masse d'hydrogène embarquée : 50kg)

Epuisement de charge (départ batterie pleine, arrivée batterie vide à la fin d'un cycle de 100km)							
Consommation [kgH2/100km]		à vide			avec chargement moyen (19,3t)		
		Urban	Regional	Longhaul	Urban	Regional	Longhaul
FC _{55%} -225	BAT-25	8,3	5,2	4,8	18,4	9,8	8,1
	BAT-50	7,2	4,0	3,9	17,0	8,3	7,0
	BAT-75	6,1	3,1	3,0	15,9	7,1	5,8
	BAT-100	5,1	2,6	2,3	14,9	6,2	5,0
FC _{55%} -300	BAT-25	8,3	5,1	4,7	18,6	9,4	7,8
	BAT-50	7,2	4,0	3,7	17,3	8,0	6,6
	BAT-75	6,2	3,0	2,9	16,1	6,8	5,7
	BAT-100	5,2	2,2	2,1	15,1	6,0	4,6
FC _{55%} -375	BAT-25	8,2	5,0	4,6	18,5	9,3	7,7
	BAT-50	7,2	4,0	3,7	17,3	7,8	6,5
	BAT-75	6,2	3,2	3,1	16,1	6,7	5,5
	BAT-100	5,3	2,6	2,4	15,1	5,7	4,5
FC _{55%} -450	BAT-25	8,2	4,9	4,6	18,2	9,0	7,5
	BAT-50	7,2	4,0	3,6	17,0	7,7	6,3
	BAT-75	6,2	3,1	3,1	15,9	6,7	5,4
	BAT-100	5,2	2,2	2,2	14,9	6,0	4,5

FC _{65%} -225	BAT-25	7,3	4,5	4,1	16,3	8,5	7,0
	BAT-50	6,3	3,4	3,3	15,1	7,2	6,0
	BAT-75	5,4	2,6	2,6	14,2	6,1	5,0
	BAT-100	4,5	2,2	1,9	13,3	5,3	4,3
FC _{65%} -300	BAT-25	7,2	4,3	4,0	16,4	8,2	6,7
	BAT-50	6,3	3,4	3,1	15,3	6,9	5,6
	BAT-75	5,4	2,6	2,5	14,3	5,8	4,9
	BAT-100	4,6	1,9	1,8	13,4	5,1	4,0
FC _{65%} -375	BAT-25	7,2	4,3	3,9	16,3	8,1	6,6
	BAT-50	6,3	3,4	3,2	15,3	6,7	5,5
	BAT-75	5,4	2,7	2,6	14,3	5,7	4,7
	BAT-100	4,6	2,2	2,1	13,3	4,9	3,9
FC _{65%} -450	BAT-25	7,1	4,2	3,9	16,0	7,8	6,5
	BAT-50	6,2	3,4	3,1	14,9	6,6	5,4
	BAT-75	5,4	2,6	2,6	14,0	5,7	4,6
	BAT-100	4,6	1,9	1,8	13,1	5,1	3,8

Tableau 22 : Consommation d'hydrogène sur les cycles VECTO en épuisement de charge batterie des variantes à pile à combustible de poids lourd 44 tonnes

Maintien de charge (sur un cycle de 100km)										
Consommation [kgH2/100km]		à vide			avec chargement moyen (19,3t)			Score pondéré		
		Urban	Regional	Longhaul	Urban	Regional	Longhaul	cycles à vide	cycles avec chargement	tous les cycles
FC _{55%} -225	BAT-25	9.3	5.9	5.8	19.4	10.6	9.1	6.0	9.9	8.8
	BAT-50	9.2	5.9	5.7	19.2	10.1	9.0	6.0	9.7	8.6
	BAT-75	9.1	5.8	5.7	19.1	10.0	8.9	5.9	9.6	8.5
	BAT-100	9.2	5.9	5.7	19.0	10.0	8.9	5.9	9.6	8.5
FC _{55%} -300	BAT-25	9.3	5.8	5.6	19.6	10.1	8.8	5.9	9.5	8.5
	BAT-50	9.2	5.7	5.6	19.3	9.7	8.6	5.8	9.3	8.3
	BAT-75	9.1	5.7	5.6	19.2	9.6	8.5	5.8	9.2	8.2
	BAT-100	9.1	5.7	5.6	19.2	9.6	8.5	5.8	9.3	8.3
FC _{55%} -375	BAT-25	9.2	5.7	5.5	19.5	9.7	8.6	5.8	9.3	8.3
	BAT-50	9.1	5.6	5.5	19.3	9.4	8.3	5.7	9.1	8.1
	BAT-75	9.1	5.6	5.4	19.2	9.4	8.2	5.7	9.0	8.0
	BAT-100	9.1	5.6	5.4	19.2	9.4	8.2	5.7	9.0	8.0
FC _{55%} -450	BAT-25	9.1	5.7	5.5	19.2	9.6	8.5	5.7	9.2	8.2
	BAT-50	9.0	5.6	5.4	19.0	9.3	8.3	5.7	9.0	8.0
	BAT-75	9.0	5.5	5.4	18.9	9.2	8.1	5.6	8.9	7.9
	BAT-100	9.0	5.6	5.4	18.8	9.2	8.1	5.7	8.8	7.9

FC _{65%} -225	BAT-25	8.2	5.1	5.0	17.3	9.3	7.9	5.2	8.6	7.6
	BAT-50	8.1	5.0	4.9	17.0	8.7	7.8	5.1	8.4	7.4
	BAT-75	8.1	5.0	4.9	17.0	8.6	7.7	5.1	8.3	7.4
	BAT-100	8.1	5.0	4.9	16.9	8.6	7.7	5.1	8.3	7.4
FC _{65%} -300	BAT-25	8.1	5.0	4.8	17.4	8.7	7.6	5.1	8.3	7.3
	BAT-50	8.1	4.9	4.7	17.2	8.3	7.4	5.0	8.0	7.1
	BAT-75	8.0	4.9	4.7	17.1	8.2	7.3	5.0	7.9	7.1
	BAT-100	8.0	4.9	4.7	17.0	8.2	7.3	5.0	7.9	7.1
FC _{65%} -375	BAT-25	8.1	4.9	4.7	17.3	8.4	7.4	4.9	8.1	7.2
	BAT-50	8.0	4.8	4.7	17.1	8.0	7.1	4.9	7.7	6.9
	BAT-75	8.0	4.8	4.7	16.9	8.0	7.1	4.9	7.7	6.9
	BAT-100	8.0	4.8	4.7	17.0	8.0	7.1	4.9	7.7	6.9
FC _{65%} -450	BAT-25	7.9	4.8	4.6	16.9	8.2	7.3	4.9	7.9	7.0
	BAT-50	7.9	4.8	4.6	16.7	7.9	7.1	4.8	7.7	6.9
	BAT-75	7.9	4.8	4.6	16.6	7.9	6.9	4.8	7.6	6.8
	BAT-100	7.9	4.8	4.6	16.6	7.9	6.9	4.9	7.6	6.8

Tableau 23 : Consommation d'hydrogène sur les cycles VECTO en maintien de charge batterie des variantes à pile à combustible de poids lourd 44 tonnes

Résultats (prenant en compte la phase d'épuisement de charge et le maintien de charge)										
Consommation [kgH2/100km]	à vide			avec chargement moyen (19,3t)			Score pondéré			
	Urban	Regional	Longhaul	Urban	Regional	Longhaul	cycles à vide	cycles avec chargement	tous les cycles	
FC _{55%} -225	BAT-25	9,1	5,9	5,7	19,0	10,5	8,9	5,9	9,7	8,6
	BAT-50	8,8	5,7	5,5	18,4	9,7	8,6	5,8	9,3	8,3
	BAT-75	8,6	5,5	5,4	18,0	9,4	8,4	5,6	9,0	8,0
	BAT-100	8,5	5,5	5,3	17,6	9,3	8,3	5,5	8,9	7,9
FC _{55%} -300	BAT-25	9,1	5,7	5,5	19,2	10,0	8,6	5,8	9,4	8,3
	BAT-50	8,8	5,5	5,4	18,6	9,3	8,3	5,6	9,0	8,0
	BAT-75	8,6	5,4	5,3	18,1	9,1	8,1	5,5	8,7	7,8
	BAT-100	8,5	5,3	5,2	17,7	9,0	7,9	5,4	8,6	7,7
FC _{55%} -375	BAT-25	9,0	5,6	5,4	19,1	9,7	8,5	5,7	9,2	8,2
	BAT-50	8,8	5,4	5,3	18,6	9,1	8,0	5,5	8,7	7,8
	BAT-75	8,6	5,3	5,2	18,1	8,9	7,8	5,4	8,5	7,6
	BAT-100	8,5	5,3	5,1	17,7	8,8	7,7	5,4	8,3	7,5
FC _{55%} -450	BAT-25	9,0	5,6	5,4	18,8	9,5	8,3	5,6	9,0	8,0
	BAT-50	8,7	5,5	5,2	18,3	9,0	8,0	5,5	8,6	7,7
	BAT-75	8,5	5,3	5,1	17,8	8,8	7,7	5,4	8,4	7,5
	BAT-100	8,4	5,2	5,1	17,5	8,6	7,6	5,3	8,2	7,4

FC _{65%} -225	BAT-25	8,0	5,0	4,9	16,9	9,1	7,8	5,1	8,4	7,5
	BAT-50	7,8	4,8	4,7	16,4	8,4	7,5	5,0	8,1	7,2
	BAT-75	7,7	4,8	4,7	16,1	8,2	7,3	4,9	7,9	7,0
	BAT-100	7,6	4,7	4,6	15,7	8,1	7,2	4,9	7,8	6,9
FC _{65%} -300	BAT-25	8,0	4,9	4,7	17,0	8,6	7,5	5,0	8,1	7,2
	BAT-50	7,8	4,7	4,6	16,5	8,1	7,1	4,8	7,8	6,9
	BAT-75	7,6	4,7	4,5	16,2	7,8	6,9	4,7	7,5	6,7
	BAT-100	7,5	4,6	4,5	15,8	7,8	6,8	4,7	7,4	6,6
FC _{65%} -375	BAT-25	7,9	4,8	4,6	16,9	8,3	7,3	4,9	8,0	7,1
	BAT-50	7,7	4,7	4,5	16,5	7,8	6,9	4,8	7,5	6,7
	BAT-75	7,6	4,6	4,5	16,1	7,6	6,7	4,7	7,4	6,6
	BAT-100	7,5	4,6	4,4	15,8	7,5	6,6	4,7	7,3	6,5
FC _{65%} -450	BAT-25	7,8	4,8	4,6	16,6	8,2	7,1	4,8	7,8	6,9
	BAT-50	7,6	4,6	4,5	16,1	7,7	6,8	4,7	7,5	6,7
	BAT-75	7,5	4,6	4,4	15,8	7,5	6,6	4,7	7,2	6,5
	BAT-100	7,4	4,5	4,4	15,5	7,5	6,5	4,6	7,1	6,4

MTH _{44%} -410 H2	13,0	7,6	7,1	23,0	12,3	10,4	7,5	11,3	10,2
MTH _{50%} -410 H2	11,5	6,7	6,2	20,3	10,8	9,1	6,6	9,9	9,0
MTH-410 Diesel [L/100km]	37,6	23,3	22,0	70,2	38,0	32,6	23,2	35,2	31,8

Tableau 24 : Consommation d'hydrogène sur les cycles VECTO des variantes à pile à combustible de poids lourd 44 tonnes

Résultats (prenant en compte la phase d'épuisement de charge et le maintien de charge)										
Consommation élec. [kWh/100km]		à vide			avec chargement moyen (19,3t)			Score pondéré		
		Urban	Regional	Longhaul	Urban	Regional	Longhaul	cycles à vide	cycles avec chargement	tous les cycles
FC _{55%} -225	BAT-25	3,6	2,3	2,3	7,6	4,2	3,6	2,4	3,9	3,4
	BAT-50	7,1	4,5	4,4	14,7	7,8	6,9	4,6	7,4	6,6
	BAT-75	10,3	6,7	6,5	21,5	11,3	10,1	6,7	10,8	9,6
	BAT-100	13,6	8,8	8,5	28,1	14,9	13,2	8,9	14,2	12,7
FC _{55%} -300	BAT-25	3,6	2,3	2,2	7,7	4,0	3,4	2,3	3,7	3,3
	BAT-50	7,1	4,4	4,3	14,9	7,5	6,6	4,5	7,2	6,4
	BAT-75	10,3	6,5	6,3	21,7	10,9	9,7	6,6	10,5	9,4
	BAT-100	13,6	8,5	8,3	28,3	14,4	12,7	8,7	13,7	12,3
FC _{55%} -375	BAT-25	3,6	2,2	2,2	7,7	3,9	3,4	2,3	3,7	3,3
	BAT-50	7,0	4,3	4,2	14,9	7,3	6,4	4,4	7,0	6,2
	BAT-75	10,3	6,4	6,2	21,7	10,7	9,4	6,5	10,2	9,1
	BAT-100	13,5	8,5	8,2	28,4	14,0	12,3	8,6	13,3	12,0
FC _{55%} -450	BAT-25	3,6	2,2	2,1	7,5	3,8	3,3	2,2	3,6	3,2
	BAT-50	7,0	4,4	4,2	14,6	7,2	6,4	4,4	6,9	6,2
	BAT-75	10,2	6,3	6,1	21,4	10,5	9,3	6,4	10,1	9,0
	BAT-100	13,4	8,4	8,1	27,9	13,8	12,1	8,5	13,2	11,8

FC _{65%} -225	BAT-25	3,2	2,0	2,0	6,8	3,7	3,1	2,0	3,4	3,0
	BAT-50	6,3	3,9	3,8	13,1	6,7	6,0	4,0	6,5	5,8
	BAT-75	9,2	5,7	5,6	19,3	9,8	8,7	5,9	9,4	8,4
	BAT-100	12,1	7,6	7,4	25,2	13,0	11,5	7,8	12,4	11,1
FC _{65%} -300	BAT-25	3,2	2,0	1,9	6,8	3,4	3,0	2,0	3,3	2,9
	BAT-50	6,2	3,8	3,7	13,2	6,4	5,7	3,9	6,2	5,5
	BAT-75	9,2	5,6	5,4	19,4	9,4	8,3	5,7	9,0	8,1
	BAT-100	12,0	7,4	7,2	25,3	12,4	10,9	7,5	11,9	10,6
FC _{65%} -375	BAT-25	3,2	1,9	1,8	6,8	3,3	2,9	1,9	3,2	2,8
	BAT-50	6,2	3,7	3,6	13,2	6,3	5,5	3,8	6,0	5,4
	BAT-75	9,1	5,5	5,4	19,3	9,2	8,1	5,7	8,8	7,9
	BAT-100	12,0	7,3	7,1	25,3	12,1	10,6	7,5	11,6	10,4
FC _{65%} -450	BAT-25	3,1	1,9	1,8	6,6	3,3	2,9	1,9	3,1	2,8
	BAT-50	6,1	3,7	3,6	12,9	6,2	5,5	3,8	6,0	5,3
	BAT-75	9,0	5,5	5,3	18,9	9,1	7,9	5,6	8,7	7,8
	BAT-100	11,8	7,2	7,0	24,8	12,0	10,4	7,4	11,4	10,2

Tableau 25 : Consommation électrique sur les cycles VECTO des variantes à pile à combustible de poids lourd 44 tonnes

Résultats (prenant en compte la phase d'épuisement de charge et le maintien de charge)										
Autonomie [km]		à vide			avec chargement moyen (19,3t)			Score pondéré		
		Urban	Regional	Longhaul	Urban	Regional	Longhaul	cycles à vide	cycles avec chargement	tous les cycles
FC _{55%} -225	BAT-25	548	854	882	263	478	559	844	517	583
	BAT-50	566	884	903	272	514	579	866	538	604
	BAT-75	580	902	929	278	531	597	889	554	622
	BAT-100	589	907	943	285	537	605	902	563	632
FC _{55%} -300	BAT-25	550	874	907	260	502	580	865	535	601
	BAT-50	566	901	932	269	535	604	889	558	626
	BAT-75	580	929	948	276	551	620	906	573	641
	BAT-100	590	940	959	282	556	632	918	583	652
FC _{55%} -375	BAT-25	553	889	924	261	518	592	880	545	613
	BAT-50	568	920	949	269	547	623	904	573	641
	BAT-75	581	936	967	277	562	642	921	589	658
	BAT-100	591	941	976	282	571	652	931	600	668
FC _{55%} -450	BAT-25	559	895	934	266	526	602	889	555	623
	BAT-50	574	916	959	274	556	628	912	579	647
	BAT-75	588	946	977	281	569	648	931	596	665
	BAT-100	598	958	985	286	578	661	941	607	677

FC _{65%} -225	BAT-25	621	992	1022	295	548	641	976	592	668
	BAT-50	639	1034	1053	304	593	666	1006	617	695
	BAT-75	653	1050	1068	311	610	686	1022	635	714
	BAT-100	660	1054	1078	317	618	695	1030	644	723
FC _{65%} -300	BAT-25	626	1018	1057	294	580	667	1005	614	692
	BAT-50	642	1056	1092	302	621	700	1038	644	724
	BAT-75	655	1072	1107	309	638	722	1053	663	743
	BAT-100	665	1081	1117	316	645	733	1064	673	754
FC _{65%} -375	BAT-25	631	1038	1083	295	601	684	1027	629	708
	BAT-50	646	1070	1105	303	638	727	1050	666	745
	BAT-75	658	1084	1116	311	655	742	1062	680	759
	BAT-100	667	1090	1125	316	663	752	1071	690	769
FC _{65%} -450	BAT-25	640	1047	1098	302	612	700	1042	643	723
	BAT-50	656	1081	1120	310	648	731	1064	671	752
	BAT-75	669	1097	1130	317	662	755	1075	692	772
	BAT-100	677	1107	1142	323	669	766	1087	702	782

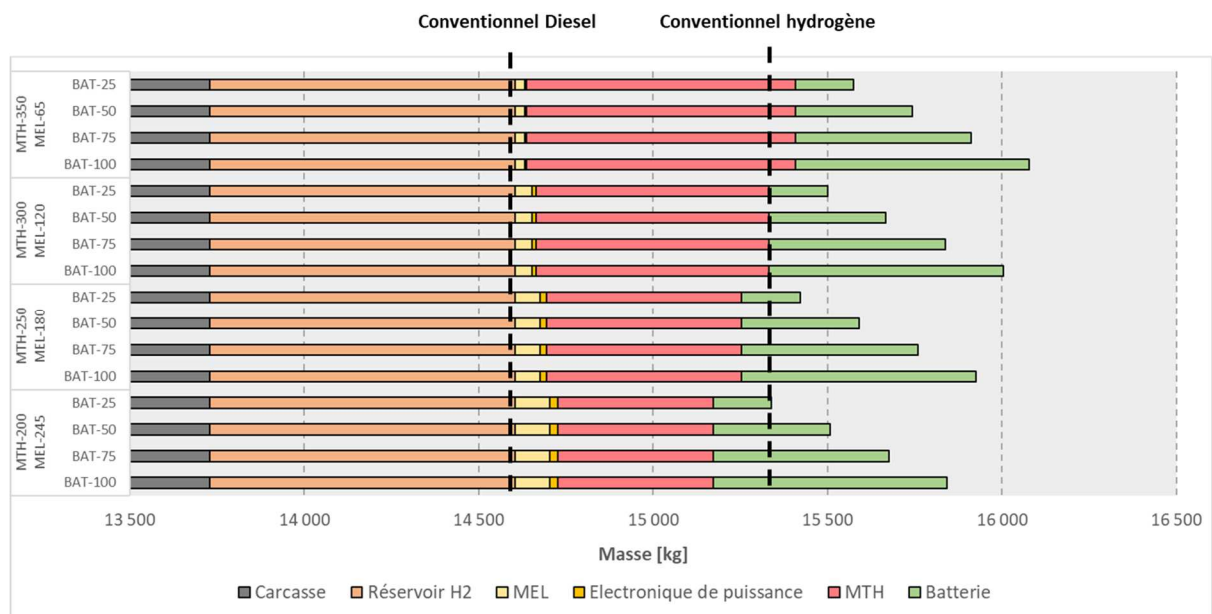
Tableau 26 : Autonomie sur les cycles VECTO des variantes à pile à combustible de poids lourd 44 tonnes

Consommation [kgH2/100km]		Score pondéré sur les cycles VECTO avec chargement	avec chargement moyen (19,3t)				
			Longhaul	Paris-Lille	Rennes-Strasbourg	Bordeaux-Strasbourg	Lyon-Milan
FC _{55%} -225	BAT-25	9,6	8,9	9,7	10,8	11,3	11,3
	BAT-50	9,1	8,6	9,0	10,4	10,9	10,7
	BAT-75	8,9	8,4	8,5	10,2	10,1	10,2
	BAT-100	8,7	8,2	8,0	10,1	10,0	9,7
FC _{55%} -300	BAT-25	9,2	8,6	9,2	10,5	10,7	11,1
	BAT-50	8,8	8,2	8,5	10,1	10,0	10,6
	BAT-75	8,5	8,0	8,5	9,9	9,9	10,0
	BAT-100	8,4	7,9	8,1	9,8	9,8	9,5
FC _{55%} -375	BAT-25	9,0	8,4	8,7	10,5	10,6	10,9
	BAT-50	8,5	8,0	8,6	9,7	9,8	10,3
	BAT-75	8,3	7,8	8,2	9,6	9,6	9,7
	BAT-100	8,2	7,7	7,7	9,4	9,5	9,2
FC _{55%} -450	BAT-25	8,9	8,3	8,5	10,5	10,6	10,5
	BAT-50	8,4	7,8	8,4	9,6	9,7	9,9
	BAT-75	8,2	7,7	7,9	9,5	9,5	9,5
	BAT-100	8,1	7,6	7,5	9,4	9,5	9,0

FC _{65%} -225	BAT-25	8,4	7,8	8,5	9,4	9,4	9,9
	BAT-50	8,1	7,5	8,0	9,1	9,1	9,3
	BAT-75	7,9	7,3	7,4	8,9	8,8	8,8
	BAT-100	7,8	7,2	7,0	8,8	8,7	8,3
FC _{65%} -300	BAT-25	8,1	7,5	8,0	9,1	9,3	9,7
	BAT-50	7,8	7,1	7,4	8,8	8,8	9,2
	BAT-75	7,5	6,9	7,5	8,6	8,6	8,7
	BAT-100	7,4	6,8	7,1	8,5	8,4	8,2
FC _{65%} -375	BAT-25	8,0	7,3	7,5	9,1	9,2	9,5
	BAT-50	7,5	6,9	7,5	8,4	8,7	8,9
	BAT-75	7,4	6,7	7,1	8,2	8,5	8,3
	BAT-100	7,3	6,6	6,7	8,1	8,4	7,8
FC _{65%} -450	BAT-25	7,8	7,1	7,4	9,1	9,2	9,1
	BAT-50	7,5	6,8	7,2	8,3	8,7	8,5
	BAT-75	7,2	6,6	6,8	8,1	8,6	8,1
	BAT-100	7,1	6,5	6,5	8,1	8,4	7,6

MTH _{44%} 410kW H2	11,3	10,4	10,8	12,2	12,2	11,5
MTH _{50%} 410kW H2	9,9	9,1	9,5	10,7	10,8	10,1
MTH 410kW Diesel	35,2 L/100km	32,6 L/100km	33,7 L/100km	37,8 L/100km	38,0 L/100km	35,8 L/100km

Tableau 27 : Consommation simulée sur les trajets réels des variantes à pile à combustible de poids lourd 44 tonnes (départ batterie pleine, arrivée batterie vide)



		Carcasse	Réservoir H2	MEL	Electronique de puissance	MTH	Batterie	Total	Chargement maximal [kg]
MTH-350 MEL-65	BAT-25	13 728	877	26	6,5	770	168	15 575	28 425
	BAT-50	13 728	877	26	6,5	770	336	15 743	28 257
	BAT-75	13 728	877	26	6,5	770	505	15 912	28 088
	BAT-100	13 728	877	26	6,5	770	671	16 078	27 922
MTH-300 MEL-120	BAT-25	13 728	877	48	12	667	168	15 500	28 500
	BAT-50	13 728	877	48	12	667	336	15 668	28 332
	BAT-75	13 728	877	48	12	667	505	15 837	28 163
	BAT-100	13 728	877	48	12	667	671	16 003	27 997
MTH-250 MEL-180	BAT-25	13 728	877	72	18	559	168	15 422	28 578
	BAT-50	13 728	877	72	18	559	336	15 590	28 410
	BAT-75	13 728	877	72	18	559	505	15 759	28 241
	BAT-100	13 728	877	72	18	559	671	15 925	28 075
MTH-200 MEL-245	BAT-25	13 728	877	98	25	445	168	15 340	28 660
	BAT-50	13 728	877	98	25	445	336	15 508	28 492
	BAT-75	13 728	877	98	25	445	505	15 677	28 323
	BAT-100	13 728	877	98	25	445	671	15 843	28 157

Figure 50 : Répartition de la masse (en kg) des variantes hybride thermique H2 - électrique de poids lourd 44 tonnes (masse d'hydrogène embarquée : 50kg)

Epuisement de charge (départ batterie pleine, arrivée batterie vide à la fin d'un cycle de 100km)							
Consommation [kgH2/100km]		à vide			avec chargement moyen (19,3t)		
		Urban	Regional	Longhaul	Urban	Regional	Longhaul
MTH _{44%} 350kW MEL 65kW	BAT-25	9,8	6,0	5,7	19,8	10,4	8,9
	BAT-50	8,9	5,1	4,9	18,9	9,5	8,0
	BAT-75	7,9	4,3	3,9	17,9	8,6	7,3
	BAT-100	7,2	3,6	3,1	17,4	8,3	6,6
MTH _{44%} 300kW MEL 120kW	BAT-25	9,5	5,9	5,6	19,5	10,0	8,9
	BAT-50	8,4	4,9	4,7	18,3	9,2	8,0
	BAT-75	7,7	3,9	3,6	17,2	8,1	6,9
	BAT-100	6,8	3,2	2,7	16,4	7,5	6,0
MTH _{44%} 250kW MEL 180kW	BAT-25	9,3	5,7	5,5	19,5	10,1	8,8
	BAT-50	8,0	4,8	4,5	18,1	9,1	7,8
	BAT-75	7,1	3,9	3,5	17,0	8,0	6,9
	BAT-100	6,5	3,1	2,5	16,3	7,3	5,9
MTH _{44%} 200kW MEL 245kW	BAT-25	9,0	5,6	5,4	20,6	10,4	8,7
	BAT-50	7,7	4,8	4,4	18,2	9,0	7,7
	BAT-75	7,0	3,7	3,4	17,0	8,1	6,7
	BAT-100	6,2	3,1	2,4	15,8	7,1	5,7

MTH _{50%} 350kW MEL 65kW	BAT-25	8,7	5,2	5,1	17,4	9,1	7,9
	BAT-50	7,9	4,5	4,3	16,6	8,3	7,1
	BAT-75	7,0	3,7	3,4	15,8	7,6	6,4
	BAT-100	6,4	3,1	2,7	15,3	7,3	5,8
MTH _{50%} 300kW MEL 120kW	BAT-25	8,4	5,2	4,9	17,2	8,8	7,8
	BAT-50	7,4	4,3	4,1	16,1	8,1	7,0
	BAT-75	6,8	3,4	3,2	15,1	7,1	6,1
	BAT-100	6,0	2,8	2,4	14,4	6,6	5,3
MTH _{50%} 250kW MEL 180kW	BAT-25	8,2	5,0	4,8	17,2	8,9	7,8
	BAT-50	7,1	4,2	3,9	16,0	8,0	6,8
	BAT-75	6,3	3,4	3,1	14,9	7,1	6,1
	BAT-100	5,8	2,8	2,2	14,3	6,4	5,2
MTH _{50%} 200kW MEL 245kW	BAT-25	7,9	5,0	4,7	18,1	9,2	7,7
	BAT-50	6,8	4,3	3,9	16,0	7,9	6,7
	BAT-75	6,2	3,3	3,0	15,0	7,1	5,9
	BAT-100	5,5	2,7	2,1	13,9	6,3	5,0

Tableau 28 : Consommation d'hydrogène sur les cycles VECTO en épuisement de charge batterie des variantes hybrides thermique H2 - électrique de poids lourd 44 tonnes

Maintenance de charge (sur un cycle de 100km)										
Consommation [kgH2/100km]		à vide			avec chargement moyen (19,3t)			Score pondéré		
		Urban	Regional	Longhaul	Urban	Regional	Longhaul	cycles à vide	cycles avec chargement	tous les cycles
MTH _{44%} 350kW MEL 65kW	BAT-25	10.8	6.8	6.5	20.9	11.3	9.8	6.8	10.5	9.5
	BAT-50	10.9	6.8	6.5	20.9	11.3	9.8	6.9	10.5	9.5
	BAT-75	11.0	6.9	6.6	21.0	11.3	9.8	6.9	10.6	9.5
	BAT-100	11.1	6.9	6.6	21.0	11.4	9.8	6.9	10.6	9.5
MTH _{44%} 300kW MEL 120kW	BAT-25	10.5	6.8	6.4	20.6	11.1	9.7	6.7	10.5	9.4
	BAT-50	10.6	6.8	6.4	20.6	11.1	9.8	6.7	10.5	9.4
	BAT-75	10.6	6.8	6.4	20.6	11.2	9.8	6.8	10.5	9.4
	BAT-100	10.7	6.8	6.5	20.7	11.2	9.8	6.8	10.6	9.5
MTH _{44%} 250kW MEL 180kW	BAT-25	10.4	6.7	6.3	20.7	11.2	9.7	6.6	10.5	9.4
	BAT-50	10.3	6.7	6.3	20.6	11.1	9.8	6.6	10.5	9.4
	BAT-75	10.4	6.8	6.3	20.6	11.1	9.8	6.7	10.5	9.4
	BAT-100	10.5	6.8	6.4	20.6	11.2	9.8	6.7	10.5	9.4
MTH _{44%} 200kW MEL 245kW	BAT-25	10.3	6.7	6.3	21.0	11.4	9.8	6.6	10.5	9.4
	BAT-50	10.2	6.7	6.3	20.9	11.2	9.7	6.6	10.5	9.4
	BAT-75	10.2	6.7	6.3	20.9	11.3	9.8	6.6	10.5	9.4
	BAT-100	10.3	6.8	6.3	20.8	11.2	9.8	6.6	10.5	9.4

MTH _{50%} 350kW MEL 65kW	BAT-25	9.5	6.0	5.7	18.4	9.9	8.6	6.0	9.3	8.3
	BAT-50	9.6	6.0	5.8	18.4	9.9	8.6	6.0	9.3	8.3
	BAT-75	9.7	6.1	5.8	18.5	10.0	8.6	6.1	9.3	8.4
	BAT-100	9.7	6.1	5.8	18.5	10.0	8.7	6.1	9.3	8.4
MTH _{50%} 300kW MEL 120kW	BAT-25	9.3	6.0	5.6	18.2	9.8	8.6	5.9	9.2	8.3
	BAT-50	9.3	6.0	5.6	18.1	9.8	8.6	5.9	9.2	8.3
	BAT-75	9.3	6.0	5.7	18.2	9.8	8.6	6.0	9.3	8.3
	BAT-100	9.4	6.0	5.7	18.2	9.8	8.6	6.0	9.3	8.3
MTH _{50%} 250kW MEL 180kW	BAT-25	9.1	5.9	5.6	18.2	9.8	8.6	5.8	9.2	8.3
	BAT-50	9.1	5.9	5.6	18.1	9.8	8.6	5.8	9.2	8.3
	BAT-75	9.1	6.0	5.6	18.1	9.8	8.6	5.9	9.3	8.3
	BAT-100	9.2	6.0	5.6	18.1	9.8	8.6	5.9	9.3	8.3
MTH _{50%} 200kW MEL 245kW	BAT-25	9.0	5.9	5.5	18.5	10.0	8.6	5.8	9.3	8.3
	BAT-50	8.9	5.9	5.5	18.4	9.9	8.6	5.8	9.2	8.2
	BAT-75	9.0	5.9	5.5	18.3	9.9	8.6	5.8	9.3	8.3
	BAT-100	9.0	6.0	5.6	18.3	9.9	8.6	5.8	9.3	8.3

Tableau 29 : Consommation d'hydrogène sur les cycles VECTO en maintien de charge batterie des variantes hybrides thermique H2 - électrique de poids lourd 44 tonnes

Résultats (prenant en compte la phase d'épuisement de charge et le maintien de charge)										
Consommation [kgH2/100km]		à vide			avec chargement moyen (19,3t)			Score pondéré		
		Urban	Regional	Longhaul	Urban	Regional	Longhaul	cycles à vide	cycles avec chargement	tous les cycles
MTH _{44%} 350kW MEL 65kW	BAT-25	10,6	6,7	6,4	20,4	11,1	9,6	6,7	10,4	9,3
	BAT-50	10,5	6,6	6,3	20,1	10,9	9,4	6,6	10,2	9,2
	BAT-75	10,4	6,5	6,2	19,8	10,8	9,3	6,5	10,1	9,0
	BAT-100	10,3	6,5	6,2	19,6	10,7	9,2	6,5	10,0	9,0
MTH _{44%} 300kW MEL 120kW	BAT-25	10,3	6,6	6,3	20,2	10,9	9,6	6,6	10,3	9,2
	BAT-50	10,1	6,5	6,2	19,7	10,7	9,4	6,5	10,1	9,1
	BAT-75	10,0	6,4	6,1	19,3	10,5	9,3	6,4	9,9	8,9
	BAT-100	9,9	6,4	6,0	19,0	10,4	9,1	6,3	9,8	8,8
MTH _{44%} 250kW MEL 180kW	BAT-25	10,1	6,6	6,2	20,2	10,9	9,6	6,5	10,3	9,2
	BAT-50	9,9	6,5	6,1	19,6	10,7	9,4	6,4	10,1	9,0
	BAT-75	9,7	6,4	6,0	19,2	10,5	9,2	6,3	9,9	8,9
	BAT-100	9,7	6,3	5,9	19,0	10,4	9,1	6,2	9,8	8,7
MTH _{44%} 200kW MEL 245kW	BAT-25	10,0	6,6	6,2	20,8	11,2	9,6	6,5	10,3	9,2
	BAT-50	9,7	6,5	6,0	19,8	10,7	9,3	6,3	10,1	9,0
	BAT-75	9,6	6,4	6,0	19,4	10,6	9,2	6,2	9,9	8,8
	BAT-100	9,5	6,3	5,9	18,9	10,4	9,0	6,2	9,7	8,7

MTH _{50%} 350kW MEL 65kW	BAT-25	9,4	5,9	5,6	18,0	9,7	8,5	5,9	9,1	8,2
	BAT-50	9,2	5,8	5,6	17,7	9,6	8,3	5,8	9,0	8,1
	BAT-75	9,1	5,8	5,5	17,4	9,5	8,2	5,8	8,9	8,0
	BAT-100	9,0	5,7	5,4	17,3	9,4	8,1	5,7	8,8	7,9
MTH _{50%} 300kW MEL 120kW	BAT-25	9,1	5,8	5,5	17,8	9,6	8,4	5,8	9,1	8,1
	BAT-50	8,9	5,8	5,5	17,3	9,4	8,3	5,7	8,9	8,0
	BAT-75	8,8	5,7	5,4	17,0	9,2	8,1	5,6	8,7	7,8
	BAT-100	8,7	5,6	5,3	16,7	9,2	8,0	5,6	8,6	7,7
MTH _{50%} 250kW MEL 180kW	BAT-25	8,9	5,8	5,5	17,8	9,6	8,4	5,7	9,1	8,1
	BAT-50	8,7	5,7	5,4	17,3	9,4	8,3	5,6	8,9	7,9
	BAT-75	8,6	5,6	5,3	16,9	9,2	8,1	5,5	8,7	7,8
	BAT-100	8,5	5,6	5,2	16,7	9,1	8,0	5,5	8,6	7,7
MTH _{50%} 200kW MEL 245kW	BAT-25	8,8	5,8	5,4	18,3	9,8	8,4	5,7	9,1	8,1
	BAT-50	8,5	5,7	5,3	17,4	9,5	8,2	5,6	8,9	7,9
	BAT-75	8,4	5,6	5,2	17,0	9,3	8,1	5,5	8,7	7,8
	BAT-100	8,4	5,5	5,2	16,6	9,1	8,0	5,4	8,6	7,7

MTH _{44%} -410 H2	13,0	7,6	7,1	23,0	12,3	10,4	7,5	11,3	10,2
MTH _{50%} -410 H2	11,5	6,7	6,2	20,3	10,8	9,1	6,6	9,9	9,0
MTH-410 Diesel [L/100km]	37,6	23,3	22,0	70,2	38,0	32,6	23,2	35,2	31,8

Tableau 30 : Consommation d'hydrogène sur les cycles VECTO des variantes hybrides thermique H2 - électrique de poids lourd 44 tonnes

Résultats (prenant en compte la phase d'épuisement de charge et le maintien de charge)										
Consommation élec. [kWh/100km]		à vide			avec chargement moyen (19,3t)			Score pondéré		
		Urban	Regional	Longhaul	Urban	Regional	Longhaul	cycles à vide	cycles avec chargement	tous les cycles
MTH _{44%} 350kW MEL 65kW	BAT-25	4,3	2,7	2,6	8,2	4,4	3,8	2,7	4,1	3,7
	BAT-50	8,4	5,3	5,1	16,1	8,7	7,6	5,3	8,1	7,3
	BAT-75	12,4	7,8	7,5	23,7	12,9	11,2	7,9	12,1	10,9
	BAT-100	16,5	10,4	9,9	31,4	17,2	14,8	10,4	16,0	14,3
MTH _{44%} 300kW MEL 120kW	BAT-25	4,1	2,7	2,5	8,1	4,4	3,8	2,6	4,1	3,7
	BAT-50	8,1	5,2	5,0	15,7	8,6	7,5	5,2	8,1	7,3
	BAT-75	12,0	7,7	7,3	23,2	12,6	11,1	7,7	11,9	10,7
	BAT-100	15,9	10,2	9,6	30,4	16,7	14,6	10,1	15,7	14,1
MTH _{44%} 250kW MEL 180kW	BAT-25	4,1	2,6	2,5	8,1	4,4	3,8	2,6	4,1	3,7
	BAT-50	7,9	5,2	4,9	15,7	8,5	7,5	5,1	8,1	7,2
	BAT-75	11,7	7,7	7,2	23,1	12,6	11,1	7,6	11,9	10,6
	BAT-100	15,5	10,1	9,4	30,3	16,6	14,5	9,9	15,6	14,0
MTH _{44%} 200kW MEL 245kW	BAT-25	4,0	2,6	2,5	8,3	4,5	3,8	2,6	4,1	3,7
	BAT-50	7,7	5,2	4,8	15,8	8,6	7,5	5,1	8,1	7,2
	BAT-75	11,5	7,6	7,1	23,2	12,7	11,0	7,5	11,9	10,6
	BAT-100	15,2	10,1	9,4	30,3	16,6	14,5	9,9	15,6	13,9

MTH _{50%} 350kW MEL 65kW	BAT-25	3,7	2,4	2,3	7,2	3,9	3,4	2,4	3,6	3,3
	BAT-50	7,4	4,7	4,5	14,1	7,7	6,6	4,7	7,2	6,4
	BAT-75	10,9	6,9	6,6	20,9	11,4	9,9	6,9	10,6	9,6
	BAT-100	14,5	9,1	8,7	27,6	15,1	13,0	9,1	14,0	12,6
MTH _{50%} 300kW MEL 120kW	BAT-25	3,6	2,3	2,2	7,1	3,8	3,4	2,3	3,6	3,2
	BAT-50	7,1	4,6	4,4	13,8	7,5	6,6	4,6	7,1	6,4
	BAT-75	10,6	6,8	6,4	20,4	11,1	9,8	6,8	10,5	9,4
	BAT-100	14,0	9,0	8,5	26,8	14,7	12,8	8,9	13,8	12,4
MTH _{50%} 250kW MEL 180kW	BAT-25	3,6	2,3	2,2	7,1	3,8	3,4	2,3	3,6	3,2
	BAT-50	6,9	4,6	4,3	13,8	7,5	6,6	4,5	7,1	6,3
	BAT-75	10,3	6,8	6,3	20,3	11,1	9,8	6,6	10,5	9,4
	BAT-100	13,7	8,9	8,3	26,7	14,6	12,8	8,7	13,8	12,3
MTH _{50%} 200kW MEL 245kW	BAT-25	3,5	2,3	2,2	7,3	3,9	3,4	2,3	3,6	3,2
	BAT-50	6,8	4,5	4,3	13,9	7,6	6,6	4,5	7,1	6,3
	BAT-75	10,1	6,7	6,3	20,5	11,2	9,7	6,6	10,5	9,3
	BAT-100	13,4	8,9	8,2	26,6	14,6	12,7	8,7	13,7	12,2

Tableau 31 : Consommation électrique sur les cycles VECTO des variantes hybrides thermique H2 - électrique de poids lourd 44 tonnes

Résultats (prenant en compte la phase d'épuisement de charge et le maintien de charge)										
Autonomie [km]		à vide			avec chargement moyen (19,3t)			Score pondéré		
		Urban	Regional	Longhaul	Urban	Regional	Longhaul	cycles à vide	cycles avec chargement	tous les cycles
MTH _{44%} 350kW MEL 65kW	BAT-25	470	746	779	245	452	521	742	483	537
	BAT-50	476	756	790	249	459	530	752	491	546
	BAT-75	483	765	803	253	465	536	764	497	553
	BAT-100	486	772	812	255	466	541	772	501	558
MTH _{44%} 300kW MEL 120kW	BAT-25	485	753	795	248	459	522	757	485	542
	BAT-50	494	765	807	254	467	530	769	494	551
	BAT-75	499	776	820	259	476	540	781	503	561
	BAT-100	505	784	832	263	480	549	792	510	569
MTH _{44%} 250kW MEL 180kW	BAT-25	493	757	804	247	458	523	766	485	543
	BAT-50	507	771	820	255	469	533	781	496	555
	BAT-75	513	781	834	260	477	541	794	504	564
	BAT-100	515	790	847	264	483	550	806	512	572
MTH _{44%} 200kW MEL 245kW	BAT-25	499	761	810	240	447	523	772	483	542
	BAT-50	517	774	827	253	466	535	789	496	556
	BAT-75	521	787	839	258	473	544	800	505	565
	BAT-100	526	793	853	264	481	553	812	514	575

MTH _{50%} 350kW MEL 65kW	BAT-25	534	848	885	278	513	592	843	549	610
	BAT-50	541	859	898	283	521	602	855	558	620
	BAT-75	549	869	912	287	528	609	868	565	628
	BAT-100	552	877	923	290	530	615	877	570	634
MTH _{50%} 300kW MEL 120kW	BAT-25	551	855	903	282	522	594	860	552	616
	BAT-50	561	870	917	289	531	603	874	561	626
	BAT-75	567	882	932	294	541	614	887	572	637
	BAT-100	573	891	946	299	546	623	900	580	646
MTH _{50%} 250kW MEL 180kW	BAT-25	560	861	914	281	520	594	871	551	617
	BAT-50	576	876	932	290	533	606	888	563	630
	BAT-75	583	888	948	296	542	615	903	573	641
	BAT-100	586	898	963	300	549	625	915	581	650
MTH _{50%} 200kW MEL 245kW	BAT-25	567	864	921	273	508	595	877	549	616
	BAT-50	588	879	940	287	529	608	896	564	632
	BAT-75	592	894	954	293	537	618	909	574	642
	BAT-100	597	902	970	300	547	628	923	584	653

Tableau 32 : Autonomie sur les cycles VECTO des variantes hybrides thermique H2 - électrique de poids lourd 44 tonnes

Consommation [kgH2/100km]		Score pondéré sur les cycles VECTO avec chargement	avec chargement moyen (19,3t)				
			Longhaul	Paris-Lille	Rennes-Strasbourg	Bordeaux-Strasbourg	Lyon-Milan
MTH _{44%} 350kW MEL 65kW	BAT-25	10,4	9,6	9,5	11,3	11,5	10,6
	BAT-50	10,2	9,4	9,4	11,2	11,3	10,1
	BAT-75	10,1	9,3	9,0	11,1	11,2	9,7
	BAT-100	10,0	9,2	8,6	10,9	11,1	9,3
MTH _{44%} 300kW MEL 120kW	BAT-25	10,3	9,6	9,6	11,2	11,8	10,8
	BAT-50	10,1	9,4	9,4	11,1	11,0	10,4
	BAT-75	9,9	9,3	9,0	11,0	11,0	10,0
	BAT-100	9,8	9,1	8,6	10,9	10,9	9,6
MTH _{44%} 250kW MEL 180kW	BAT-25	10,3	9,6	9,7	11,1	12,0	11,1
	BAT-50	10,1	9,4	9,4	11,0	10,7	10,4
	BAT-75	9,9	9,2	8,9	10,9	10,7	10,0
	BAT-100	9,8	9,1	8,5	10,8	10,8	9,6
MTH _{44%} 200kW MEL 245kW	BAT-25	10,3	9,6	9,7	10,8	11,7	10,8
	BAT-50	10,1	9,3	9,1	10,7	11,4	10,3
	BAT-75	9,9	9,2	8,7	10,6	10,4	9,9
	BAT-100	9,7	9,0	8,2	10,6	10,3	9,4

MTH _{50%} 350kW MEL 65kW	BAT-25	9,1	8,5	8,4	9,9	10,2	9,3
	BAT-50	9,0	8,3	8,2	9,8	9,9	8,8
	BAT-75	8,9	8,2	7,9	9,7	9,8	8,5
	BAT-100	8,8	8,1	7,6	9,6	9,8	8,2
MTH _{50%} 300kW MEL 120kW	BAT-25	9,1	8,4	8,4	9,9	10,4	9,5
	BAT-50	8,9	8,3	8,3	9,8	9,7	9,1
	BAT-75	8,7	8,1	7,9	9,7	9,6	8,8
	BAT-100	8,6	8,0	7,6	9,6	9,6	8,5
MTH _{50%} 250kW MEL 180kW	BAT-25	9,1	8,4	8,5	9,8	10,6	9,8
	BAT-50	8,9	8,3	8,2	9,7	9,5	9,2
	BAT-75	8,7	8,1	7,8	9,6	9,4	8,8
	BAT-100	8,6	8,0	7,5	9,5	9,5	8,5
MTH _{50%} 200kW MEL 245kW	BAT-25	9,1	8,4	8,5	9,5	10,3	9,5
	BAT-50	8,9	8,2	8,0	9,4	10,0	9,1
	BAT-75	8,7	8,1	7,6	9,4	9,1	8,7
	BAT-100	8,6	8,0	7,2	9,3	9,0	8,3

MTH _{44%} -410 H2	11,3	10,4	10,8	12,2	12,2	11,5
MTH _{50%} -410 H2	9,9	9,1	9,5	10,7	10,8	10,1
MTH-410 Diesel [L/100km]	35,2 L/100km	32,6 L/100km	33,7 L/100km	37,8 L/100km	38,0 L/100km	35,8 L/100km

Tableau 33 : Consommation simulée sur les trajets réels des variantes hybrides thermique H2 - électrique de poids lourd 44 tonnes (départ batterie pleine, arrivée batterie vide)

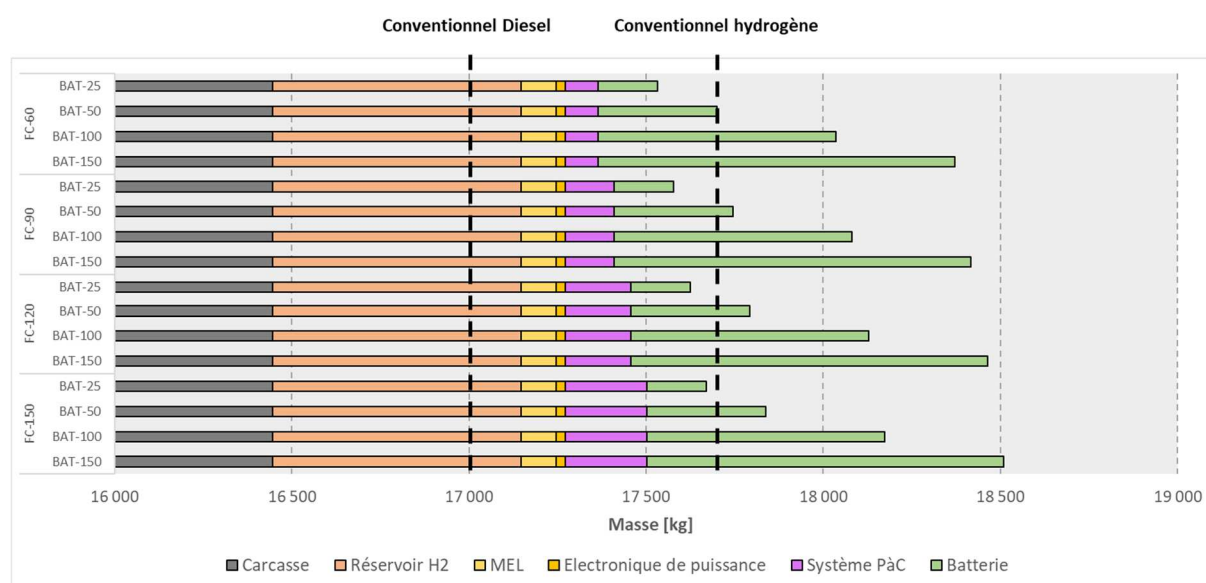
	Sortie moteur	Canule d'échappement	
		avec DeNOx Keyou	avec SCR efficace à 90%
VTH H2	204 mg/km	99 mg/km	21 mg/km (conso urée 366 g/1000km)
PHEV H2	255 +/- 25 mg/km	113 +/- 5 mg/km	26 +/- 3 mg/km (conso urée 460 +/- 30 g/1000km)

Tableau 34 : Ordres de grandeur des émissions d'oxydes d'azote pour les variantes de poids lourds 44 tonnes à moteur à combustion interne d'hydrogène

	Taille moteur/FC (kW)	Taille batterie (kWh)	TCO (€)		
			H2 renouvelable local	H2 renouvelable central	H2 carboné
MTH Diesel	410	/	441 801 (Gazole)		
MTH H2 44%	410		1 035 987	935 414	454 691
MTH H2 50%	410		938 883	850 141	425 974
PHEV	200	25	1 042 847	951 878	517 065
		50	1 051 380	885 084	539 030
		75	1 063 314	976 097	559 219
		100	1 074 596	988 865	579 088
	250	25	1 046 890	956 098	522 128
		50	1 055 045	966 155	541 277
		75	1 067 030	979 562	561 482
		100	1 079 864	993 700	581 851
	300	25	1 046 703	955 706	520 758
		50	1 062 075	894 181	544 799
		75	1 072 627	984 724	564 565
		100	1 086 119	999 447	585 171
	350	25	1 059 385	967 603	528 900
		50	1 071 115	980 810	549 167
		75	1 085 576	996 404	570 179
		100	1 102 378	1 014 048	591 847
FCEV - 65%	225	25	1 054 769	980 984	628 300
		50	1 054 119	983 203	644 235
		75	1 061 907	992 815	662 570
		100	1 077 618	1 009 387	683 256
	300	25	1 112 309	1 041 076	700 595
		50	1 109 670	1 041 532	715 843
		75	1 117 674	1 051 318	734 147
		100	1 132 654	1 067 232	754 526
	375	25	1 177 522	1 107 915	775 207
		50	1 172 276	1 106 065	789 593
		75	1 184 544	1 119 594	809 146
		100	1 200 313	1 136 195	829 726
	450	25	1 244 073	1 175 927	850 203
		50	1 245 832	1 180 233	866 678
		75	1 254 355	1 190 462	885 068
		100	1 269 929	1 206 883	905 535
FCEV - 55%	225	25	1 144 001	1 059 404	655 043
		50	1 142 513	1 060 946	671 073
		75	1 146 675	1 067 427	688 636
		100	1 160 185	1 082 117	708 962
	300	25	1 201 136	1 119 140	727 216
		50	1 198 174	1 119 372	742 714
		75	1 205 556	1 128 670	761 171
		100	1 218 058	1 142 460	781 115
	375	25	1 267 088	1 186 629	802 050
		50	1 260 978	1 184 081	816 525
		75	1 267 623	1 192 719	834 693
		100	1 281 161	1 207 411	854 897
	450	25	1 335 260	1 256 066	877 531
		50	1 333 637	1 257 458	893 337
		75	1 339 435	1 265 349	911 230
		100	1 352 001	1 279 176	931 087

Tableau 35 : TCO du poids lourd 44t, résultats complets (en €, sur 12 ans, 90 000 km/an)

ANNEXE 3 : Compléments sur les bus articulés de 18 mètres



		Carcasse	Réservoir H2	MEL	Electronique de puissance	Système PàC	Batterie	Total	Nombre max de passagers de 70kg (pour un PTAC de 30t)
FC-60	BAT-25	16 445	702	100	25	92	168	17 532	178
	BAT-50	16 445	702	100	25	92	336	17 700	176
	BAT-100	16 445	702	100	25	92	671	18 035	171
	BAT-150	16 445	702	100	25	92	1 006	18 370	166
FC-90	BAT-25	16 445	702	100	25	138	168	17 578	177
	BAT-50	16 445	702	100	25	138	336	17 746	175
	BAT-100	16 445	702	100	25	138	671	18 081	170
	BAT-150	16 445	702	100	25	138	1 006	18 416	165
FC-120	BAT-25	16 445	702	100	25	185	168	17 624	177
	BAT-50	16 445	702	100	25	185	336	17 792	174
	BAT-100	16 445	702	100	25	185	671	18 127	170
	BAT-150	16 445	702	100	25	185	1 006	18 463	165
FC-150	BAT-25	16 445	702	100	25	231	168	17 670	176
	BAT-50	16 445	702	100	25	231	336	17 838	174
	BAT-100	16 445	702	100	25	231	671	18 173	169
	BAT-150	16 445	702	100	25	231	1 006	18 509	164

Figure 51 : Répartition de la masse (en kg) des variantes à pile à combustible de bus articulé de 18 mètres (masse d'hydrogène embarquée : 40kg)

Epuisement de charge (départ batterie pleine, arrivée batterie vide à la fin d'un cycle de 39,5km)							
Consommation [kgH2/100km]		VECTO Urban (sans CVC)			VECTO Urban (CVC 17kW)		
		0 pass	80 pass	160 pass	0 pass	80 pass	160 pass
FC _{55%} -60	BAT-25	6,3	10,4	14,0	13,9	17,2	20,5
	BAT-50	3,6	7,4	11,7	11,3	14,5	17,8
	BAT-100	0,0	2,3	7,0	5,5	9,1	13,9
	BAT-150	0,0	0,0	1,4	0,0	3,5	8,1
FC _{55%} -90	BAT-25	6,0	10,4	14,9	13,4	17,2	21,5
	BAT-50	3,7	7,6	12,3	11,0	14,6	18,7
	BAT-100	0,0	2,4	7,7	5,5	9,4	14,4
	BAT-150	0,0	0,0	1,5	0,0	3,6	8,5
FC _{55%} -120	BAT-25	5,9	10,1	15,1	13,0	17,2	22,0
	BAT-50	3,5	7,4	12,4	10,4	14,5	19,1
	BAT-100	0,0	2,9	7,9	5,3	9,9	14,7
	BAT-150	0,0	0,0	1,7	0,0	3,6	8,6
FC _{55%} -150	BAT-25	5,8	9,7	15,0	12,7	16,6	22,0
	BAT-50	3,5	7,1	12,2	9,9	14,0	19,2
	BAT-100	0,0	2,9	8,0	5,1	9,5	14,5
	BAT-150	0,0	0,0	1,6	0,0	3,4	8,5

FC _{65%} -60	BAT-25	5,3	9,0	12,3	12,1	15,1	18,0
	BAT-50	2,8	6,1	10,0	9,7	12,4	15,4
	BAT-100	0,0	2,0	5,7	4,9	8,1	11,9
	BAT-150	0,0	0,0	1,2	0,0	3,1	7,2
FC _{65%} -90	BAT-25	5,0	8,9	13,0	11,6	15,0	18,9
	BAT-50	2,8	6,3	10,5	9,4	12,6	16,3
	BAT-100	0,0	2,1	6,3	4,9	8,4	12,2
	BAT-150	0,0	0,0	1,4	0,0	3,2	7,5
FC _{65%} -120	BAT-25	4,9	8,6	13,2	11,3	15,1	19,3
	BAT-50	2,7	6,1	10,6	8,8	12,5	16,6
	BAT-100	0,0	2,1	6,5	4,6	8,3	12,7
	BAT-150	0,0	0,0	1,5	0,0	3,2	7,7
FC _{65%} -150	BAT-25	4,9	8,3	13,0	11,0	14,4	19,2
	BAT-50	3,3	5,9	10,4	8,3	12,0	16,6
	BAT-100	0,0	2,1	6,6	4,4	7,9	12,4
	BAT-150	0,0	0,0	1,5	0,0	3,0	7,5

Tableau 36 : Consommation sur le cycle VECTO Urban en épuisement de charge batterie des variantes à pile à combustible de bus articulé de 18 mètres

Maintenance de charge (sur un cycle de 39,5km)									
Consommation [kgH2/100km]		VECTO Urban (sans CVC)			Score sans CVC	VECTO Urban (CVC 17kW)			Score avec CVC
		0 pass	80 pass	160 pass		0 pass	80 pass	160 pass	
FC _{55%} -60	BAT-25	8.7	12.9	19.5	14.0	16.1	21.5		
	BAT-50	8.3	12.3	18.3	13.3	15.6	20.7		
	BAT-100	8.3	12.5	18.3	13.4	15.8	20.7		
	BAT-150	8.3	12.5	18.3	13.4	15.8	20.8		
FC _{55%} -90	BAT-25	8.3	11.9	17.2	12.8	15.9	18.8	25.0	20.1
	BAT-50	7.8	11.5	16.4	12.2	14.1	18.2	24.1	19.2
	BAT-100	7.9	11.5	16.5	12.3	14.4	18.5	24.1	19.4
	BAT-150	7.9	11.5	16.5	12.3	14.3	18.4	24.0	19.3
FC _{55%} -120	BAT-25	8.1	11.4	16.1	12.1	13.9	17.6	22.9	18.4
	BAT-50	7.7	11.1	15.6	11.8	13.6	17.3	22.3	18.0
	BAT-100	7.8	11.1	15.8	11.8	13.6	17.3	22.4	18.1
	BAT-150	7.7	11.3	15.8	11.9	13.7	17.3	22.4	18.1
FC _{55%} -150	BAT-25	7.8	11.2	15.7	11.9	13.4	17.1	22.1	17.9
	BAT-50	7.7	10.8	15.2	11.5	13.3	16.6	21.5	17.4
	BAT-100	7.7	11.1	15.2	11.7	13.4	17.0	21.5	17.6
	BAT-150	7.6	11.1	15.2	11.6	13.3	16.6	21.5	17.4

FC _{65%} -60	BAT-25	7.6	11.2	17.2	12.3	14.1	19.1		
	BAT-50	7.2	10.8	16.2	11.7	13.7	18.4		
	BAT-100	7.3	10.8	16.2	11.7	13.8	18.4		
	BAT-150	7.3	10.8	16.2	11.7	13.8	18.5		
FC _{65%} -90	BAT-25	7.1	10.2	14.9	11.0	14.1	16.3	22.0	17.6
	BAT-50	6.8	9.8	14.3	10.6	12.2	15.9	21.3	16.8
	BAT-100	6.9	9.9	14.3	10.6	12.3	15.9	21.3	16.8
	BAT-150	6.8	9.9	14.3	10.6	12.2	15.9	21.2	16.7
FC _{65%} -120	BAT-25	6.9	9.8	13.9	10.4	11.9	15.2	19.9	15.9
	BAT-50	6.7	9.5	13.4	10.1	11.7	14.9	19.4	15.6
	BAT-100	6.7	9.5	13.4	10.1	11.8	15.0	19.4	15.6
	BAT-150	6.7	9.5	13.5	10.1	11.7	14.9	19.5	15.6
FC _{65%} -150	BAT-25	6.7	9.6	13.5	10.2	11.5	14.7	19.1	15.4
	BAT-50	6.6	9.2	13.1	9.8	11.3	14.3	18.6	15.0
	BAT-100	6.6	9.4	13.1	10.0	11.4	14.5	18.6	15.1
	BAT-150	6.6	9.4	13.1	9.9	11.3	14.5	18.6	15.1

Tableau 37 : Consommation sur le cycle VECTO Urban en maintien de charge batterie des variantes à pile à combustible de bus articulé de 18 mètres

Résultats (prenant en compte la phase d'épuisement de charge et le maintien de charge)									
Consommation [kgH2/100km]		VECTO Urban (sans CVC)			Score sans CVC	VECTO Urban (CVC 17kW)			Score avec CVC
		0 pass	80 pass	160 pass		0 pass	80 pass	160 pass	
FC _{55%} -60	BAT-25	8.5	12.6	18.5	13.5	15.8	20.6		
	BAT-50	7.9	11.8	17.2	12.6	14.9	19.5		
	BAT-100	7.7	11.4	16.5	12.2	14.4	18.6		
	BAT-150	7.7	11.2	15.7	11.8	13.7	17.7		
FC _{55%} -90	BAT-25	8.1	11.7	16.8	12.5	15.5	18.5	24.2	19.6
	BAT-50	7.5	11.0	15.8	11.8	13.7	17.6	22.9	18.4
	BAT-100	7.3	10.6	15.2	11.3	13.2	17.0	22.0	17.7
	BAT-150	7.4	10.3	14.3	10.9	12.5	16.1	20.8	16.8
FC _{55%} -120	BAT-25	7.9	11.2	15.9	12.0	13.8	17.5	22.7	18.3
	BAT-50	7.4	10.7	15.1	11.4	13.2	16.8	21.6	17.5
	BAT-100	7.2	10.3	14.6	11.0	12.6	16.1	20.8	16.8
	BAT-150	7.2	10.2	13.9	10.7	12.0	15.2	19.8	15.9
FC _{55%} -150	BAT-25	7.7	11.0	15.6	11.7	13.3	17.0	22.1	17.8
	BAT-50	7.4	10.4	14.8	11.1	12.9	16.2	21.0	17.0
	BAT-100	7.1	10.3	14.2	10.8	12.4	15.8	20.1	16.4
	BAT-150	7.1	10.0	13.4	10.4	11.8	14.7	19.0	15.4

FC _{65%} -60	BAT-25	7,4	11,0	16,4	11,9	13,8	18,4		
	BAT-50	6,9	10,3	15,3	11,1	13,2	17,4		
	BAT-100	6,8	9,9	14,7	10,7	12,7	16,7		
	BAT-150	6,8	9,7	14,1	10,5	12,1	16,0		
FC _{65%} -90	BAT-25	6,9	10,1	14,7	10,8	13,8	16,1	21,3	17,2
	BAT-50	6,5	9,5	13,8	10,2	11,9	15,4	20,3	16,2
	BAT-100	6,4	9,2	13,3	9,9	11,5	14,8	19,6	15,6
	BAT-150	6,4	9,0	12,6	9,6	10,9	14,1	18,7	14,8
FC _{65%} -120	BAT-25	6,8	9,7	13,8	10,3	11,9	15,2	19,8	15,9
	BAT-50	6,4	9,2	13,0	9,8	11,4	14,5	18,8	15,2
	BAT-100	6,3	8,9	12,5	9,5	11,0	14,0	18,2	14,7
	BAT-150	6,3	8,7	12,0	9,2	10,5	13,4	17,4	14,0
FC _{65%} -150	BAT-25	6,6	9,5	13,5	10,1	11,4	14,7	19,1	15,4
	BAT-50	6,3	8,9	12,7	9,5	11,0	14,0	18,2	14,6
	BAT-100	6,2	8,8	12,3	9,3	10,7	13,6	17,5	14,2
	BAT-150	6,2	8,6	11,7	9,0	10,2	13,0	16,7	13,6

MTH _{44%} -250 H2	15,3	18,6	22,0	19,0				
MTH _{50%} -250 H2	13,5	16,4	19,3	16,7				
MTH-250 Diesel [L/100km]	51,2	62,4	73,7	63,6				

Tableau 38 : Consommation d'hydrogène sur le cycle VECTO Urban des variantes à pile à combustible de bus articulé de 18 mètres (avec et sans prise en compte d'une consommation du système de chauffage/ventilation/climatisation CVC)

Résultats (prenant en compte la phase d'épuisement de charge et le maintien de charge)									
Consommation élec. [kWh/100km]		VECTO Urban (sans CVC)			Score sans CVC	VECTO Urban (CVC 17kW)			Score avec CVC
		0 pass	80 pass	160 pass		0 pass	80 pass	160 pass	
FC _{55%} -60	BAT-25	4,3	6,3	9,2	6,8	7,9	10,3		
	BAT-50	7,9	11,8	17,2	12,6	14,9	19,5		
	BAT-100	15,4	22,7	33,0	24,3	28,7	37,2		
	BAT-150	23,1	33,5	47,1	35,5	41,0	53,2		
FC _{55%} -90	BAT-25	4,0	5,9	8,4	6,3	7,8	9,3	12,1	9,8
	BAT-50	7,5	11,0	15,8	11,8	13,7	17,6	22,9	18,4
	BAT-100	14,7	21,2	30,4	22,6	26,5	33,9	44,0	35,5
	BAT-150	22,1	31,0	43,0	32,8	37,6	48,2	62,5	50,4
FC _{55%} -120	BAT-25	3,9	5,6	8,0	6,0	6,9	8,8	11,4	9,2
	BAT-50	7,4	10,7	15,1	11,4	13,2	16,8	21,6	17,5
	BAT-100	14,4	20,6	29,2	22,0	25,2	32,3	41,6	33,6
	BAT-150	21,5	30,5	41,6	32,0	36,1	45,6	59,3	47,8
FC _{55%} -150	BAT-25	3,8	5,5	7,8	5,9	6,7	8,5	11,0	8,9
	BAT-50	7,4	10,4	14,8	11,1	12,9	16,2	21,0	17,0
	BAT-100	14,3	20,6	28,4	21,7	24,7	31,7	40,3	32,8
	BAT-150	21,3	29,9	40,3	31,3	35,3	44,2	57,1	46,3

FC _{65%} -60	BAT-25	3,7	5,5	8,2	6,0	6,9	9,2		
	BAT-50	6,9	10,3	15,3	11,1	13,2	17,4		
	BAT-100	13,6	19,8	29,4	21,4	25,4	33,5		
	BAT-150	20,4	29,2	42,4	31,4	36,4	48,1		
FC _{65%} -90	BAT-25	3,5	5,0	7,3	5,4	6,9	8,0	10,7	8,6
	BAT-50	6,5	9,5	13,8	10,2	11,9	15,4	20,3	16,2
	BAT-100	12,8	18,4	26,6	19,7	23,0	29,6	39,1	31,1
	BAT-150	19,1	27,0	37,9	28,7	32,6	42,3	56,1	44,5
FC _{65%} -120	BAT-25	3,4	4,8	6,9	5,2	5,9	7,6	9,9	7,9
	BAT-50	6,4	9,2	13,0	9,8	11,4	14,5	18,8	15,2
	BAT-100	12,6	17,8	25,1	18,9	22,0	28,1	36,4	29,3
	BAT-150	18,8	26,0	36,1	27,6	31,4	40,1	52,3	42,0
FC _{65%} -150	BAT-25	3,3	4,7	6,7	5,0	5,7	7,3	9,6	7,7
	BAT-50	6,3	8,9	12,7	9,5	11,0	14,0	18,2	14,6
	BAT-100	12,4	17,6	24,6	18,7	21,3	27,2	35,0	28,4
	BAT-150	18,5	25,7	35,1	27,1	30,6	39,0	50,2	40,7

Tableau 39 : Consommation électrique sur le cycle VECTO Urban des variantes à pile à combustible de bus articulé de 18 mètres (avec et sans prise en compte d'une consommation du système de chauffage/ventilation/climatisation CVC)

Résultats (prenant en compte la phase d'épuisement de charge et le maintien de charge)									
Autonomie [km]		VECTO Urban (sans CVC)			Autonomie sans CVC	VECTO Urban (CVC 17kW)			Autonomie avec CVC
		0 pass	80 pass	160 pass		0 pass	80 pass	160 pass	
FC _{55%} -60	BAT-25	468	318	217	295	254	194		
	BAT-50	506	340	233	317	268	205		
	BAT-100	519	352	243	329	279	215		
	BAT-150	520	359	255	338	293	226		
FC _{55%} -90	BAT-25	494	341	238	319	257	216	165	204
	BAT-50	531	362	253	340	292	227	175	217
	BAT-100	545	378	263	354	302	236	182	226
	BAT-150	544	387	279	365	319	249	192	238
FC _{55%} -120	BAT-25	507	357	251	334	291	228	176	218
	BAT-50	540	375	265	352	303	238	185	228
	BAT-100	554	389	274	364	318	248	192	238
	BAT-150	558	394	288	375	332	263	203	251
FC _{55%} -150	BAT-25	520	363	256	341	300	235	181	225
	BAT-50	544	383	271	360	311	247	191	236
	BAT-100	561	389	282	369	324	253	199	244
	BAT-150	565	401	298	384	340	272	210	259

FC _{65%} -60	BAT-25	540	364	243	336	289	218		
	BAT-50	579	388	262	360	303	230		
	BAT-100	589	404	272	373	316	239		
	BAT-150	589	410	283	382	330	250		
FC _{65%} -90	BAT-25	576	396	273	369	291	249	187	233
	BAT-50	613	421	291	393	336	260	197	247
	BAT-100	623	435	301	405	348	270	205	257
	BAT-150	628	445	316	418	368	283	214	270
FC _{65%} -120	BAT-25	592	414	290	388	337	264	202	252
	BAT-50	622	437	307	409	352	276	212	263
	BAT-100	634	450	319	423	364	285	220	273
	BAT-150	640	461	332	435	382	299	229	286
FC _{65%} -150	BAT-25	607	423	297	396	350	272	209	260
	BAT-50	630	448	314	419	364	286	220	273
	BAT-100	643	456	325	429	375	294	228	282
	BAT-150	648	467	341	443	392	308	239	295

Tableau 40 : Autonomie sur le cycle VECTO Urban des variantes à pile à combustible de bus articulé de 18 mètres (avec et sans prise en compte d'une consommation du système de chauffage/ventilation/climatisation CVC)

Consommation [kgH2/100km]		Sans CVC					Avec CVC 17kW				
		Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Moyenne	Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Moyenne
FC _{55%} -60	BAT-25	8,6	8,4	8,2	7,9	8,3	17,8	17,0	15,6	15,9	16,6
	BAT-50	8,4	8,2	7,9	7,8	8,1	17,6	16,8	15,3	15,7	16,4
	BAT-100	8,4	8,1	7,9	7,8	8,0	17,6	16,8	15,3	15,7	16,4
	BAT-150	8,4	8,1	7,9	7,9	8,1	17,6	16,8	15,4	15,7	16,4
FC _{55%} -90	BAT-25	7,6	7,4	7,7	7,7	7,6	16,4	15,9	14,2	14,5	15,3
	BAT-50	8,0	7,9	7,7	7,7	7,8	16,1	15,4	13,9	14,3	14,9
	BAT-100	8,4	8,1	7,7	7,7	8,0	15,8	15,0	13,7	14,0	14,6
	BAT-150	8,4	8,1	7,7	7,7	8,0	15,8	15,0	13,7	14,2	14,7
FC _{55%} -120	BAT-25	8,1	7,8	7,6	7,4	7,7	15,7	15,0	13,7	14,0	14,6
	BAT-50	7,9	7,7	7,3	7,4	7,6	15,3	14,7	13,3	13,6	14,2
	BAT-100	8,0	8,2	7,4	7,0	7,6	15,3	14,6	13,3	13,8	14,3
	BAT-150	7,2	8,2	7,7	7,8	7,7	15,3	14,6	13,4	13,5	14,2
FC _{55%} -150	BAT-25	8,1	7,8	7,4	7,4	7,7	15,5	14,7	13,3	13,6	14,3
	BAT-50	7,8	7,7	7,3	7,2	7,5	15,4	14,7	13,2	13,6	14,2
	BAT-100	8,3	7,7	7,3	7,3	7,6	15,4	14,7	13,2	13,6	14,2
	BAT-150	7,4	7,1	6,7	6,7	7,0	15,4	14,7	13,1	13,6	14,2

FC _{65%} -60	BAT-25	7,5	7,3	7,0	6,9	7,2	15,5	14,8	13,7	13,9	14,5
	BAT-50	7,3	7,1	6,8	6,7	7,0	15,2	14,6	13,4	13,7	14,2
	BAT-100	7,3	7,1	6,8	6,8	7,0	15,2	14,6	13,4	13,7	14,2
	BAT-150	7,3	7,1	6,8	6,8	7,0	15,2	14,6	13,4	13,7	14,2
FC _{65%} -90	BAT-25	6,9	6,7	6,6	6,5	6,7	14,9	14,4	12,3	12,5	13,5
	BAT-50	7,0	6,7	6,5	6,4	6,6	13,9	13,3	12,1	12,4	12,9
	BAT-100	6,9	6,7	6,4	6,4	6,6	13,8	13,2	12,0	12,3	12,8
	BAT-150	6,9	6,7	6,4	6,4	6,6	13,8	13,2	12,0	12,3	12,8
FC _{65%} -120	BAT-25	7,0	6,7	6,5	6,4	6,6	13,5	12,9	11,6	12,0	12,5
	BAT-50	6,8	6,6	6,3	6,3	6,5	13,3	12,7	11,5	11,8	12,3
	BAT-100	6,8	6,6	6,3	6,2	6,5	13,3	12,7	11,5	11,9	12,4
	BAT-150	6,6	6,6	6,2	6,3	6,4	13,3	12,7	11,5	11,8	12,3
FC _{65%} -150	BAT-25	6,8	6,6	6,4	6,3	6,5	13,1	12,5	11,3	11,6	12,1
	BAT-50	6,7	6,5	6,2	6,2	6,4	12,9	12,4	11,2	11,5	12,0
	BAT-100	6,6	6,5	6,2	6,2	6,4	12,9	12,4	11,2	11,5	12,0
	BAT-150	6,6	6,4	6,1	6,1	6,3	12,9	12,4	11,2	11,5	12,0

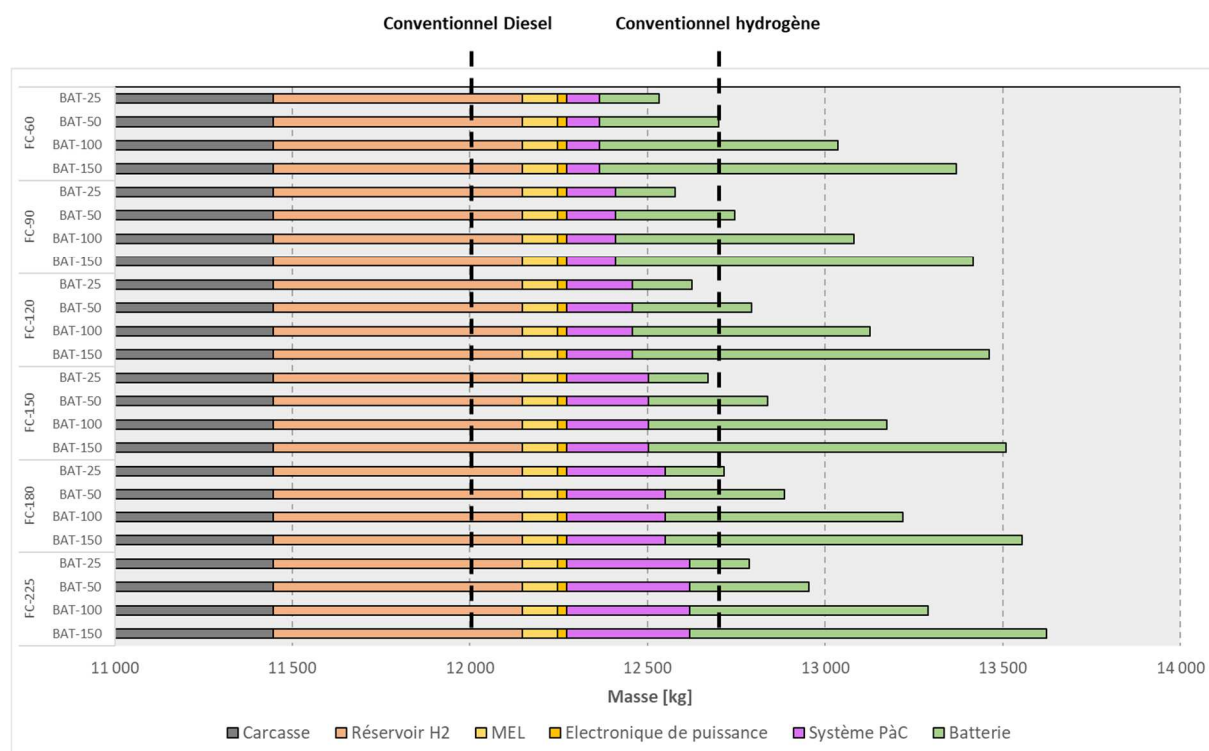
MTH _{44%} -250 H2	16,4	15,8	14,5	14,4	15,3					
MTH _{50%} -250 H2	14,5	13,9	12,8	12,7	13,5					
MTH-250 Diesel [L/100km]	55,2	53,1	48,4	48,1	51,2					

Tableau 41 : Consommation simulée sur les trajets réels des variantes à pile à combustible de bus articulé de 18 mètres (maintien de charge batterie, avec et sans prise en compte d'une consommation du système de chauffage/ventilation/climatisation CVC)

	moteur/FC (kW)	Taille batterie (kWh)	TCO (€)		
			H2 renouvelable local	H2 renouvelable central	H2 carboné
MTH Diesel	MTH	Diesel	714 801		
MTH H2 44%		H2-44%	1 189 025	1 105 916	708 671
MTH H2 50%		H2-50%	1 107 177	1 034 042	684 466
FCEV - 55%	FC-60	BAT-25	1 222 670	1 163 335	879 720
		BAT-50	1 210 394	1 155 093	890 765
		BAT-100	1 229 305	1 175 988	921 139
		BAT-150	1 252 110	1 200 286	952 575
	FC-90	BAT-25	1 222 995	1 168 130	905 886
		BAT-50	1 215 421	1 163 844	917 315
		BAT-100	1 234 039	1 184 453	947 441
		BAT-150	1 255 709	1 207 727	978 378
	FC-120	BAT-25	1 239 010	1 186 564	935 884
		BAT-50	1 236 177	1 186 433	948 664
		BAT-100	1 257 659	1 209 552	979 606
		BAT-150	1 281 694	1 234 900	1 011 229
	FC-150	BAT-25	1 266 843	1 215 387	969 436
		BAT-50	1 263 888	1 215 141	982 139
		BAT-100	1 288 249	1 240 789	1 013 941
		BAT-150	1 308 365	1 262 677	1 044 297
FCEV - 65%	FC-60	BAT-25	1 163 470	1 111 297	861 920
		BAT-50	1 155 386	1 106 694	873 957
		BAT-100	1 176 053	1 129 089	904 610
		BAT-150	1 201 886	1 156 013	936 748
	FC-90	BAT-25	1 161 945	1 114 467	887 530
		BAT-50	1 157 588	1 112 959	899 643
		BAT-100	1 180 763	1 137 534	930 906
		BAT-150	1 204 407	1 162 504	962 211
	FC-120	BAT-25	1 178 955	1 133 776	917 827
		BAT-50	1 178 564	1 135 742	931 060
		BAT-100	1 202 095	1 160 617	962 360
		BAT-150	1 227 070	1 186 748	994 016
	FC-150	BAT-25	1 207 213	1 162 972	951 506
		BAT-50	1 206 466	1 164 618	964 593
		BAT-100	1 233 034	1 192 163	996 803
		BAT-150	1 256 952	1 217 356	1 028 095

Tableau 42 : Bus 18m, résultats TCO complets (en €, sur 12 ans, 40 000 km/an)

ANNEXE 4 : Compléments sur les autocars régionaux



		Carcasse	Réservoir H2	MEL	Electronique de puissance	Système PàC	Batterie	Total	Nombre max de passagers de 70kg (pour un PTAC de 18t)
FC-60	BAT-25	11 445	702	100	25	92	168	12 532	78
	BAT-50	11 445	702	100	25	92	336	12 700	76
	BAT-100	11 445	702	100	25	92	671	13 035	71
	BAT-150	11 445	702	100	25	92	1 006	13 370	66
FC-90	BAT-25	11 445	702	100	25	138	168	12 578	77
	BAT-50	11 445	702	100	25	138	336	12 746	75
	BAT-100	11 445	702	100	25	138	671	13 081	70
	BAT-150	11 445	702	100	25	138	1 006	13 416	65
FC-120	BAT-25	11 445	702	100	25	185	168	12 624	77
	BAT-50	11 445	702	100	25	185	336	12 792	74
	BAT-100	11 445	702	100	25	185	671	13 127	70
	BAT-150	11 445	702	100	25	185	1 006	13 463	65
FC-150	BAT-25	11 445	702	100	25	231	168	12 670	76
	BAT-50	11 445	702	100	25	231	336	12 838	74
	BAT-100	11 445	702	100	25	231	671	13 173	69
	BAT-150	11 445	702	100	25	231	1 006	13 509	64
FC-180	BAT-25	11 445	702	100	25	277	168	12 716	75
	BAT-50	11 445	702	100	25	277	336	12 884	73
	BAT-100	11 445	702	100	25	277	671	13 219	68
	BAT-150	11 445	702	100	25	277	1 006	13 555	64
FC-225	BAT-25	11 445	702	100	25	346	168	12 786	74
	BAT-50	11 445	702	100	25	346	336	12 954	72
	BAT-100	11 445	702	100	25	346	671	13 289	67
	BAT-150	11 445	702	100	25	346	1 006	13 624	63

Figure 52 : Répartition de la masse (en kg) des variantes à pile à combustible d'autocar régional (masse d'hydrogène embarquée : 40kg)

Epuisement de charge (départ batterie pleine, arrivée batterie vide à la fin d'un cycle de 123,6km)							
Consommation [kgH2/100km]		VECTO Interurban (sans conso CVC)			VECTO Interurban (conso CVC 17kW)		
		0 pass	30 pass	60 pass	0 pass	30 pass	60 pass
FC _{55%} -60	BAT-25	5,5	6,4	7,3	9,6	10,7	11,7
	BAT-50	4,5	5,5	6,4	8,4	9,5	10,5
	BAT-100	2,8	3,7	4,7	6,4	7,4	8,5
	BAT-150	1,6	2,3	3,1	4,7	5,8	6,8
FC _{55%} -90	BAT-25	5,4	6,3	7,1	9,2	10,1	11,0
	BAT-50	4,3	5,1	6,0	7,9	8,8	9,8
	BAT-100	2,9	3,7	4,5	5,9	6,9	8,0
	BAT-150	1,6	2,3	3,0	4,4	5,5	6,4
FC _{55%} -120	BAT-25	5,3	6,2	6,9	8,8	9,4	10,3
	BAT-50	4,2	5,0	5,9	7,7	8,7	9,6
	BAT-100	3,0	3,7	4,4	5,9	6,8	7,8
	BAT-150	1,7	2,4	3,0	4,3	5,2	6,1
FC _{55%} -150	BAT-25	5,4	6,3	6,8	8,8	8,9	10,5
	BAT-50	4,2	4,9	5,7	7,4	8,3	9,3
	BAT-100	2,9	3,6	4,3	5,6	6,5	7,4
	BAT-150	1,7	2,3	3,0	4,2	5,2	6,1
FC _{55%} -180	BAT-25	5,4	6,2	6,7	8,7	8,7	9,6
	BAT-50	4,1	5,1	6,0	7,6	8,5	9,5
	BAT-100	2,9	3,6	4,2	5,9	6,6	7,6
	BAT-150	1,7	2,3	3,0	4,3	5,2	6,0
FC _{55%} -225	BAT-25	5,3	6,9	6,9	8,4	9,8	9,4
	BAT-50	4,3	5,9	6,8	7,6	8,9	10,0
	BAT-100	2,9	3,6	4,6	5,7	7,0	7,9
	BAT-150	1,7	2,3	3,0	4,3	5,2	5,8

FC _{65%} -60	BAT-25	5,0	5,9	6,7	8,5	9,5	10,8
	BAT-50	5,1	5,7	6,2	7,5	8,5	9,4
	BAT-100	5,1	5,6	6,0	5,5	6,5	7,4
	BAT-150	3,3	3,4	3,4	3,8	4,9	5,8
FC _{65%} -90	BAT-25	4,9	5,7	6,6	8,1	9,0	10,8
	BAT-50	4,7	4,9	5,7	7,0	7,8	8,7
	BAT-100	4,4	4,8	5,1	5,1	6,0	7,0
	BAT-150	3,5	3,1	3,6	3,5	4,6	5,4
FC _{65%} -120	BAT-25	4,8	5,6	6,6	7,8	8,4	9,3
	BAT-50	4,1	4,6	5,4	6,8	7,6	8,5
	BAT-100	4,0	4,3	4,7	5,0	5,8	6,7
	BAT-150	3,4	3,4	3,5	3,5	4,3	5,0
FC _{65%} -150	BAT-25	4,9	5,6	6,5	7,7	8,3	10,2
	BAT-50	4,2	4,6	5,3	6,4	7,3	8,2
	BAT-100	4,2	4,3	4,6	4,9	5,5	6,4
	BAT-150	3,2	3,2	3,3	3,3	4,3	5,1
FC _{65%} -180	BAT-25	4,8	5,5	6,5	7,6	8,1	8,9
	BAT-50	3,6	4,5	5,4	6,6	7,5	8,3
	BAT-100	3,5	3,9	3,9	4,9	5,7	6,6
	BAT-150	2,9	3,0	3,4	3,5	4,3	5,0
FC _{65%} -225	BAT-25	4,7	6,1	6,6	7,4	8,6	8,7
	BAT-50	3,8	5,2	6,0	6,6	7,8	8,8
	BAT-100	3,6	3,1	3,9	4,8	6,0	6,8
	BAT-150	2,8	2,9	3,6	3,5	4,3	4,8

Tableau 43 : Consommation sur le cycle VECTO Interurban en épuisement de charge batterie des variantes à pile à combustible de car régional (avec et sans prise en compte d'une consommation du système de chauffage/ventilation/climatisation CVC)

Maintenance de charge (sur un cycle de 123,6km)									
Consommation [kgH2/100km]		VECTO Interurban (sans conso CVC)			Score sans CVC	VECTO Interurban (conso CVC 17kW)			Score avec CVC
		0 pass	30 pass	60 pass		0 pass	30 pass	60 pass	
FC _{55%} -60	BAT-25	6.4	7.2	8.2	7.3	10.5	11.6	12.6	11.7
	BAT-50	6.2	7.2	8.0	7.3	10.5	11.8	12.8	11.8
	BAT-100	6.3	7.3	8.5	7.5	10.6	11.9	13.5	12.1
	BAT-150	6.3	7.3	8.4	7.5	10.6	11.9	13.3	12.0
FC _{55%} -90	BAT-25	6.2	7.2	8.3	7.3	9.7	10.7	12.1	10.9
	BAT-50	5.9	6.8	7.7	6.9	9.4	10.4	11.4	10.5
	BAT-100	5.8	6.8	7.7	6.9	9.3	10.4	11.4	10.5
	BAT-150	6.0	6.6	7.6	6.8	9.4	10.4	11.3	10.5
FC _{55%} -120	BAT-25	6.4	6.9	8.2	7.2	9.2	10.3	11.2	10.3
	BAT-50	5.7	6.7	7.5	6.7	8.9	10.0	10.9	10.0
	BAT-100	5.6	6.5	7.3	6.6	8.8	9.7	10.7	9.8
	BAT-150	5.7	6.4	7.3	6.5	8.8	9.8	10.7	9.9
FC _{55%} -150	BAT-25	5.9	7.1	7.5	7.0	9.1	10.2	10.8	10.2
	BAT-50	5.6	6.5	7.4	6.6	8.5	9.5	10.5	9.6
	BAT-100	5.5	6.3	7.1	6.4	8.6	9.4	10.3	9.5
	BAT-150	5.5	6.3	7.1	6.4	8.6	9.4	10.3	9.5
FC _{55%} -180	BAT-25	5.9	6.8	7.8	6.9	8.8	9.8	10.5	9.8
	BAT-50	5.5	6.4	7.3	6.5	8.5	9.4	10.3	9.5
	BAT-100	5.5	6.3	7.0	6.3	8.4	9.1	10.0	9.2
	BAT-150	5.6	6.2	7.0	6.3	8.4	9.2	10.0	9.3
FC _{55%} -225	BAT-25	5.9	6.9	7.8	7.0	8.8	9.8	10.3	9.8
	BAT-50	5.5	6.4	7.3	6.5	8.2	9.1	10.0	9.2
	BAT-100	5.4	6.2	6.9	6.2	8.2	9.0	9.8	9.1
	BAT-150	5.4	6.2	7.0	6.3	8.3	9.0	9.8	9.1

FC _{65%} -60	BAT-25	5.6	6.3	7.2	6.4	9.3	10.3	11.2	10.4
	BAT-50	5.4	6.3	7.1	6.4	9.3	10.4	11.4	10.5
	BAT-100	5.5	6.4	7.5	6.6	9.4	10.7	12.2	10.9
	BAT-150	5.5	6.4	7.4	6.5	9.4	10.6	12.0	10.8
FC _{65%} -90	BAT-25	5.4	6.3	7.2	6.4	8.5	9.4	10.5	9.6
	BAT-50	5.1	5.9	6.7	6.0	8.2	9.1	10.0	9.2
	BAT-100	5.0	5.8	6.6	5.9	8.1	9.0	10.0	9.1
	BAT-150	5.1	5.8	6.6	5.9	8.2	9.0	10.0	9.1
FC _{65%} -120	BAT-25	5.6	5.8	7.3	6.2	8.0	9.0	9.8	9.0
	BAT-50	4.9	5.8	6.6	5.8	7.7	8.7	9.5	8.7
	BAT-100	4.8	5.6	6.3	5.6	7.6	8.4	9.2	8.5
	BAT-150	4.9	5.6	6.3	5.6	7.6	8.4	9.2	8.5
FC _{65%} -150	BAT-25	5.1	6.2	6.4	6.0	7.9	8.9	9.3	8.8
	BAT-50	4.8	5.7	6.5	5.7	7.3	8.2	9.1	8.3
	BAT-100	4.7	5.4	6.1	5.5	7.3	8.1	8.8	8.2
	BAT-150	4.8	5.4	6.1	5.5	7.3	8.1	8.8	8.1
FC _{65%} -180	BAT-25	5.1	5.9	6.8	6.0	7.6	8.5	9.0	8.5
	BAT-50	4.7	5.5	6.3	5.6	7.3	8.1	8.9	8.2
	BAT-100	4.7	5.3	6.0	5.4	7.2	7.9	8.6	8.0
	BAT-150	4.7	5.3	6.0	5.4	7.2	7.9	8.6	8.0
FC _{65%} -225	BAT-25	5.1	6.0	6.9	6.1	7.6	8.6	8.8	8.4
	BAT-50	4.7	5.6	6.3	5.6	7.0	7.8	8.6	7.9
	BAT-100	4.6	5.2	5.9	5.3	7.0	7.7	8.4	7.8
	BAT-150	4.6	5.3	5.9	5.3	7.0	7.7	8.4	7.8

Tableau 44 : Consommation sur le cycle VECTO Interurban en maintien de charge des variantes à pile à combustible de car régional (avec et sans prise en compte d'une consommation du système de chauffage/ventilation/climatisation CVC)

Résultats (prenant en compte la phase d'épuisement de charge et le maintien de charge)									
Consommation [kgH2/100km]		VECTO Interurban (sans conso CVC)			Score sans CVC	VECTO Interurban (conso CVC 17kW)			Score avec CVC
		0 pass	30 pass	60 pass		0 pass	30 pass	60 pass	
FC _{55%} -60	BAT-25	6,2	7,0	8,0	7,1	10,2	11,3	12,3	11,4
	BAT-50	5,9	6,8	7,7	6,9	9,8	11,0	11,9	11,0
	BAT-100	5,7	6,6	7,6	6,7	9,4	10,5	11,7	10,6
	BAT-150	5,5	6,4	7,2	6,4	9,0	10,0	11,1	10,1
FC _{55%} -90	BAT-25	6,1	7,0	8,0	7,1	9,6	10,5	11,7	10,7
	BAT-50	5,6	6,5	7,3	6,6	9,0	9,9	10,9	10,0
	BAT-100	5,3	6,2	7,0	6,3	8,4	9,4	10,3	9,5
	BAT-150	5,3	5,8	6,7	6,0	8,1	9,0	9,8	9,1
FC _{55%} -120	BAT-25	6,2	6,7	7,9	7,0	9,1	10,0	10,9	10,1
	BAT-50	5,5	6,3	7,2	6,4	8,6	9,6	10,5	9,7
	BAT-100	5,2	5,9	6,7	6,0	8,1	8,9	9,8	9,0
	BAT-150	5,0	5,7	6,4	5,8	7,7	8,6	9,3	8,6
FC _{55%} -150	BAT-25	5,8	6,9	7,3	6,8	9,0	9,8	10,7	9,9
	BAT-50	5,4	6,2	7,1	6,3	8,2	9,2	10,1	9,3
	BAT-100	5,1	5,8	6,6	5,9	7,9	8,6	9,5	8,7
	BAT-150	4,9	5,6	6,3	5,7	7,5	8,3	9,1	8,4
FC _{55%} -180	BAT-25	5,8	6,6	7,5	6,7	8,8	9,5	10,2	9,5
	BAT-50	5,3	6,1	7,0	6,2	8,2	9,1	10,1	9,2
	BAT-100	5,1	5,8	6,4	5,8	7,8	8,5	9,3	8,6
	BAT-150	5,0	5,5	6,2	5,6	7,5	8,2	8,9	8,3
FC _{55%} -225	BAT-25	5,8	6,9	7,6	6,9	8,7	9,8	10,0	9,7
	BAT-50	5,3	6,3	7,2	6,4	8,0	9,0	10,0	9,1
	BAT-100	5,0	5,7	6,4	5,8	7,6	8,5	9,3	8,5
	BAT-150	4,8	5,5	6,2	5,6	7,4	8,0	8,7	8,1

FC _{65%} -60	BAT-25	5,5	6,3	7,1	6,4	9,1	10,0	11,1	10,2
	BAT-50	5,4	6,2	6,9	6,2	8,8	9,8	10,7	9,9
	BAT-100	5,4	6,3	7,1	6,4	8,4	9,5	10,6	9,6
	BAT-150	5,2	5,9	6,6	5,9	8,0	9,0	10,1	9,1
FC _{65%} -90	BAT-25	5,4	6,2	7,0	6,3	8,4	9,3	10,6	9,5
	BAT-50	5,0	5,7	6,5	5,8	7,9	8,7	9,6	8,8
	BAT-100	4,9	5,6	6,3	5,7	7,4	8,3	9,1	8,4
	BAT-150	4,8	5,3	6,0	5,4	7,1	7,9	8,7	8,0
FC _{65%} -120	BAT-25	5,5	5,8	7,1	6,1	7,9	8,8	9,6	8,9
	BAT-50	4,8	5,6	6,3	5,6	7,5	8,4	9,2	8,5
	BAT-100	4,7	5,3	6,0	5,4	7,0	7,8	8,6	7,9
	BAT-150	4,7	5,2	5,8	5,3	6,8	7,5	8,1	7,5
FC _{65%} -150	BAT-25	5,1	6,1	6,4	6,0	7,9	8,8	9,6	8,8
	BAT-50	4,7	5,5	6,2	5,5	7,1	8,0	8,9	8,1
	BAT-100	4,7	5,2	5,8	5,3	6,8	7,5	8,2	7,6
	BAT-150	4,5	5,1	5,6	5,1	6,5	7,2	7,9	7,3
FC _{65%} -180	BAT-25	5,0	5,8	6,7	5,9	7,6	8,4	8,9	8,4
	BAT-50	4,6	5,3	6,2	5,4	7,1	7,9	8,8	8,0
	BAT-100	4,5	5,1	5,6	5,1	6,7	7,4	8,1	7,5
	BAT-150	4,5	5,0	5,5	5,0	6,5	7,1	7,7	7,2
FC _{65%} -225	BAT-25	5,0	6,0	6,8	6,0	7,5	8,6	8,8	8,4
	BAT-50	4,6	5,5	6,2	5,5	6,9	7,8	8,6	7,9
	BAT-100	4,5	4,9	5,6	5,0	6,6	7,3	8,0	7,4
	BAT-150	4,4	4,9	5,5	5,0	6,4	7,0	7,5	7,0

MTH _{44%} -250 H2	9,4	10,4	11,4	10,5				
MTH _{50%} -250 H2	8,3	9,2	10,0	9,3				
MTH-250 Diesel [L/100km]	30,9	34,3	37,7	34,6				

Tableau 45 : Consommation d'hydrogène sur le cycle VECTO *Interurban* des variantes à pile à combustible de car régional (avec et sans prise en compte d'une consommation du système de chauffage/ventilation/climatisation CVC)

Résultats (prenant en compte la phase d'épuisement de charge et le maintien de charge)									
Consommation élec. [kWh/100km]		VECTO Interurban (sans conso CVC)			Score sans CVC	VECTO Interurban (conso CVC 17kW)			Score avec CVC
		0 pass	30 pass	60 pass		0 pass	30 pass	60 pass	
FC _{55%} -60	BAT-25	3,1	3,5	4,0	3,6	5,1	5,6	6,1	5,7
	BAT-50	5,9	6,8	7,7	6,9	9,8	11,0	11,9	11,0
	BAT-100	11,4	13,2	15,2	13,4	18,7	20,9	23,4	21,2
	BAT-150	16,5	19,1	21,7	19,3	26,9	30,0	33,3	30,3
FC _{55%} -90	BAT-25	3,0	3,5	4,0	3,6	4,8	5,3	5,8	5,3
	BAT-50	5,6	6,5	7,3	6,6	9,0	9,9	10,9	10,0
	BAT-100	10,7	12,4	14,0	12,5	16,9	18,8	20,6	19,0
	BAT-150	15,8	17,5	20,1	17,9	24,4	27,0	29,5	27,2
FC _{55%} -120	BAT-25	3,1	3,4	4,0	3,5	4,6	5,0	5,5	5,0
	BAT-50	5,5	6,3	7,2	6,4	8,6	9,6	10,5	9,7
	BAT-100	10,4	11,9	13,4	12,1	16,1	17,8	19,6	18,0
	BAT-150	15,1	17,0	19,3	17,3	23,1	25,7	28,0	25,9
FC _{55%} -150	BAT-25	2,9	3,5	3,7	3,4	4,5	4,9	5,4	5,0
	BAT-50	5,4	6,2	7,1	6,3	8,2	9,2	10,1	9,3
	BAT-100	10,2	11,7	13,1	11,8	15,7	17,2	18,9	17,4
	BAT-150	14,7	16,9	18,9	17,1	22,6	24,9	27,4	25,2
FC _{55%} -180	BAT-25	2,9	3,3	3,8	3,4	4,4	4,7	5,1	4,8
	BAT-50	5,3	6,1	7,0	6,2	8,2	9,1	10,1	9,2
	BAT-100	10,2	11,6	12,9	11,7	15,5	17,0	18,6	17,2
	BAT-150	14,9	16,6	18,7	16,9	22,4	24,5	26,8	24,8
FC _{55%} -225	BAT-25	2,9	3,4	3,8	3,4	4,3	4,9	5,0	4,8
	BAT-50	5,3	6,3	7,2	6,4	8,0	9,0	10,0	9,1
	BAT-100	10,0	11,4	12,9	11,6	15,3	17,0	18,5	17,1
	BAT-150	14,5	16,6	18,7	16,8	22,3	24,1	26,2	24,4

FC _{65%} -60	BAT-25	2,7	3,1	3,5	3,2	4,5	5,0	5,5	5,1
	BAT-50	5,4	6,2	6,9	6,2	8,8	9,8	10,7	9,9
	BAT-100	10,9	12,5	14,3	12,7	16,8	18,9	21,2	19,2
	BAT-150	15,5	17,6	19,7	17,8	24,1	27,1	30,2	27,4
FC _{65%} -90	BAT-25	2,7	3,1	3,5	3,1	4,2	4,6	5,3	4,8
	BAT-50	5,0	5,7	6,5	5,8	7,9	8,7	9,6	8,8
	BAT-100	9,8	11,3	12,6	11,4	14,8	16,5	18,3	16,7
	BAT-150	14,5	16,0	18,0	16,3	21,4	23,8	26,2	24,0
FC _{65%} -120	BAT-25	2,7	2,9	3,6	3,1	4,0	4,4	4,8	4,4
	BAT-50	4,8	5,6	6,3	5,6	7,5	8,4	9,2	8,5
	BAT-100	9,4	10,7	12,0	10,8	14,1	15,6	17,1	15,7
	BAT-150	14,0	15,6	17,3	15,8	20,3	22,4	24,4	22,6
FC _{65%} -150	BAT-25	2,5	3,0	3,2	3,0	3,9	4,4	4,8	4,4
	BAT-50	4,7	5,5	6,2	5,5	7,1	8,0	8,9	8,1
	BAT-100	9,3	10,4	11,7	10,6	13,6	15,0	16,4	15,1
	BAT-150	13,6	15,2	16,8	15,3	19,6	21,7	23,6	21,9
FC _{65%} -180	BAT-25	2,5	2,9	3,4	3,0	3,8	4,2	4,5	4,2
	BAT-50	4,6	5,3	6,2	5,4	7,1	7,9	8,8	8,0
	BAT-100	9,0	10,2	11,3	10,3	13,4	14,7	16,2	14,9
	BAT-150	13,4	14,9	16,6	15,1	19,4	21,3	23,2	21,5
FC _{65%} -225	BAT-25	2,5	3,0	3,4	3,0	3,8	4,3	4,4	4,2
	BAT-50	4,6	5,5	6,2	5,5	6,9	7,8	8,6	7,9
	BAT-100	9,0	9,8	11,1	10,0	13,2	14,6	16,0	14,7
	BAT-150	13,2	14,7	16,5	14,9	19,1	20,9	22,6	21,0

Tableau 46 : Consommation électrique sur le cycle VECTO *Interurban* des variantes à pile à combustible de car régional (avec et sans prise en compte d'une consommation du système de chauffage/ventilation/climatisation CVC)

Résultats (prenant en compte la phase d'épuisement de charge et le maintien de charge)									
Autonomie [km]		VECTO Interurban (sans conso CVC)			Autonomie sans CVC	VECTO Interurban (conso CVC 17kW)			Autonomie avec CVC
		0 pass	30 pass	60 pass		0 pass	30 pass	60 pass	
FC _{55%} -60	BAT-25	644	568	503	560	392	354	326	352
	BAT-50	676	584	523	579	406	364	335	362
	BAT-100	703	606	526	595	427	382	342	377
	BAT-150	727	630	552	620	446	400	361	395
FC _{55%} -90	BAT-25	657	572	500	562	418	381	342	375
	BAT-50	712	616	546	609	444	403	368	399
	BAT-100	750	647	571	639	474	426	388	422
	BAT-150	761	685	597	669	492	444	407	441
FC _{55%} -120	BAT-25	646	594	505	573	439	400	367	396
	BAT-50	734	631	557	624	465	418	381	414
	BAT-100	770	673	595	664	495	449	407	444
	BAT-150	794	705	620	692	520	466	428	463
FC _{55%} -150	BAT-25	686	578	545	586	444	408	373	403
	BAT-50	747	644	566	635	486	436	394	431
	BAT-100	784	686	610	678	508	465	423	459
	BAT-150	816	709	636	703	530	481	438	476
FC _{55%} -180	BAT-25	690	602	531	593	457	423	392	419
	BAT-50	753	654	568	642	485	437	397	433
	BAT-100	787	691	621	685	515	471	429	465
	BAT-150	805	722	642	710	535	490	448	485
FC _{55%} -225	BAT-25	691	582	525	581	461	407	399	414
	BAT-50	753	633	558	628	498	442	399	438
	BAT-100	799	700	622	691	524	472	431	468
	BAT-150	825	722	641	713	539	497	458	492

FC _{65%} -60	BAT-25	727	639	566	630	442	398	362	394
	BAT-50	746	646	582	642	455	406	372	404
	BAT-100	734	638	561	629	476	423	377	417
	BAT-150	774	682	609	674	498	443	398	438
FC _{65%} -90	BAT-25	747	647	570	638	475	431	377	421
	BAT-50	799	697	616	687	506	457	415	452
	BAT-100	812	708	633	701	540	484	438	479
	BAT-150	829	750	665	736	560	505	458	499
FC _{65%} -120	BAT-25	729	689	560	651	504	454	416	451
	BAT-50	839	719	633	710	533	476	432	472
	BAT-100	847	748	667	738	569	513	467	508
	BAT-150	859	769	694	760	591	537	491	532
FC _{65%} -150	BAT-25	791	657	624	669	509	456	417	453
	BAT-50	850	731	643	721	564	502	452	496
	BAT-100	858	767	685	756	586	534	487	528
	BAT-150	882	790	716	782	612	553	508	549
FC _{65%} -180	BAT-25	795	690	597	676	526	476	447	476
	BAT-50	871	753	650	738	562	504	457	499
	BAT-100	886	786	709	778	597	543	494	537
	BAT-150	896	803	722	793	620	564	517	559
FC _{65%} -225	BAT-25	797	669	589	663	532	466	454	474
	BAT-50	873	728	640	722	580	513	463	508
	BAT-100	892	813	720	796	608	549	501	544
	BAT-150	910	817	727	804	630	575	530	571

Tableau 47 : Autonomie sur le cycle VECTO Interurban des variantes à pile à combustible de car régional (avec et sans prise en compte d'une consommation du système de chauffage/ventilation/climatisation CVC)

	Taille moteur/FC (kW)	Taille batterie (kWh)	TCO (€)		
			H2 renouvelable local	H2 renouvelable central	H2 carboné
MTH Diesel	250	/	541 321	-	-
MTH H2 44%	250		866 931	810 609	551 945
MTH H2 50%	250		814 454	764 891	537 266
FCEV - 55%	60	25	906 815	868 529	692 694
		50	946 341	909 361	739 520
		100	974 422	938 419	773 069
		150	997 391	962 846	804 192
	90	25	972 731	934 619	759 584
		50	968 145	932 970	771 426
		100	989 280	955 742	801 712
		150	995 292	960 748	802 094
	120	25	973 107	935 718	763 999
		50	997 767	963 405	805 591
		100	1 017 845	985 552	837 241
		150	1 041 516	1 010 568	868 436
	150	25	1 032 675	996 110	828 178
		50	1 062 072	1 028 692	875 389
		100	1 046 087	1 014 471	869 269
		150	1 070 856	1 040 388	900 460
	180	25	1 035 244	999 119	833 210
		50	1 062 072	1 028 692	875 389
		100	1 082 721	1 051 427	907 702
		150	1 108 098	1 077 930	939 377
	225	25	1 124 936	1 088 086	918 843
		50	1 122 029	1 087 894	931 125
		100	1 131 278	1 100 273	957 880
		150	1 157 619	1 127 562	989 518
FCEV - 65%	60	25	873 496	839 474	683 220
		50	917 922	884 554	731 310
		100	959 182	925 104	768 597
		150	975 510	943 712	797 674
	90	25	937 212	903 645	749 485
		50	936 722	905 543	762 348
		100	965 621	935 072	794 770
		150	988 148	959 021	825 249
	120	25	938 040	905 138	754 028
		50	964 875	934 695	796 088
		100	991 916	962 899	829 633
		150	1 019 494	991 311	861 876
	150	25	997 245	965 213	818 104
		50	997 146	967 442	831 025
		100	1 020 217	991 869	861 678
		150	1 046 322	1 018 935	893 152
	180	25	1 000 605	968 913	823 361
		50	1 027 928	998 889	865 525
		100	1 052 880	1 025 355	898 945
		150	1 083 015	1 055 995	931 905
	225	25	1 089 444	1 057 135	908 751
		50	1 086 848	1 057 187	920 961
		100	1 098 869	1 071 959	948 370
		150	1 130 546	1 103 888	981 454

Tableau 48 : TCO autocar, résultats complets (en €, sur 8 ans, 60 000 km/an)

ANNEXE 5 : Compléments sur les pelles sur chenilles de 75 tonnes

Consommation [L/h et kgH2/h]					
	VTH	HYB		FCEV ($\eta_{pic} = 65\%$)	FCEV ($\eta_{pic} = 55\%$)
MTH-410 Diesel	42,0	42,5	FC-150	12,9	14,4
MTH _{44%} -410 H2	13,4	13,3	FC-225	10,8	12,4
MTH _{50%} -410 H2	11,8	11,7	FC-300	10,0	11,6
			FC-375	9,5	11,1
			FC-450	9,3	10,9

Tableau 49 : Consommation horaire sur le cycle « dig and dump » des différentes variantes de pelle sur chenilles de 75 tonnes

Temps de cycle [s]					
	VTH	HYB		FCEV ($\eta_{pic} = 65\%$)	FCEV ($\eta_{pic} = 55\%$)
MTH-410 Diesel	24,1	22,6	FC-150	22,8	22,6
MTH _{44%} -410 H2	24,1	22,6	FC-225	22,8	22,6
MTH _{50%} -410 H2	24,1	22,6	FC-300	22,8	22,6
			FC-375	22,8	22,6
			FC-450	22,8	22,6

Tableau 50 : Temps de cycle sur le cycle « dig and dump » des différentes variantes de pelle sur chenilles de 75 tonnes

Consommation à iso-production [L et kgH2]					
	VTH	HYB		FCEV ($\eta_{pic} = 65\%$)	FCEV ($\eta_{pic} = 55\%$)
MTH-410 Diesel	45,1	42,5	FC-150	13,1	14,7
MTH _{44%} -410 H2	14,4	13,3	FC-225	11,0	12,6
MTH _{50%} -410 H2	12,7	11,7	FC-300	10,1	11,8
			FC-375	9,7	11,3
			FC-450	9,5	11,1

Tableau 51 : Consommation à iso-production sur le cycle « dig and dump » des différentes variantes de pelle sur chenilles de 75 tonnes

Ecart de consommation horaire d'énergie					
	VTH	HYB		FCEV ($\eta_{pic} = 65\%$)	FCEV ($\eta_{pic} = 55\%$)
MTH-410 Diesel	0%	1%	FC-150	4%	17%
MTH _{44%} -410 H2	9%	8%	FC-225	-12%	1%
MTH _{50%} -410 H2	-4%	-5%	FC-300	-19%	-6%
			FC-375	-23%	-10%
			FC-450	-25%	-12%

Tableau 52 : Ecart de consommation horaire d'énergie sur le cycle « dig and dump » des différentes variantes de pelle sur chenilles de 75 tonnes

Ecart de consommation d'énergie à iso-production					
	VTH	HYB		FCEV ($\eta_{pic} = 65\%$)	FCEV ($\eta_{pic} = 55\%$)
MTH-410 Diesel	0%	-6%	FC-150	-1%	11%
MTH _{44%} -410 H2	9%	1%	FC-225	-17%	-5%
MTH _{50%} -410 H2	-4%	-12%	FC-300	-24%	-11%
			FC-375	-27%	-15%
			FC-450	-29%	-17%

Tableau 53 : Ecart de consommation d'énergie à iso-production sur le cycle « dig and dump » des différentes variantes de pelle sur chenilles de 75 tonnes

		H2 renouvelable local	H2 renouvelable central	H2 carboné
MTH	Diesel	0,0	0,0	0,0
	H2 - 44%	119,1	98,5	6,2
	H2 - 50%	100,7	82,5	1,3
HYB	Diesel	16,8	16,8	16,8
	H2 - 44%	127,4	108,6	24,8
	H2 - 50%	112,8	96,0	20,9
FC - 55%	FC-150-BAT-25	162,6	141,6	47,7
	FC-225-BAT-25	147,4	129,3	48,5
	FC-300-BAT-25	144,8	127,9	52,6
	FC-375-BAT-25	146,5	130,2	57,9
	FC-450-BAT-25	150,4	134,5	63,7
FC - 65%	FC-150-BAT-25	145,9	127,1	43,3
	FC-225-BAT-25	130,0	114,2	43,9
	FC-300-BAT-25	127,4	112,8	48,0
	FC-375-BAT-25	129,1	115,2	53,2
	FC-450-BAT-25	133,1	119,6	59,1

Tableau 54 : TCO comparatif : écart par rapport à la version à MTH – Diesel (en %)

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

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 équipées d'un moteur à combustion d'hydrogène.

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 école d'ingénieurs, prépare les générations futures à relever ces défis.

