



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

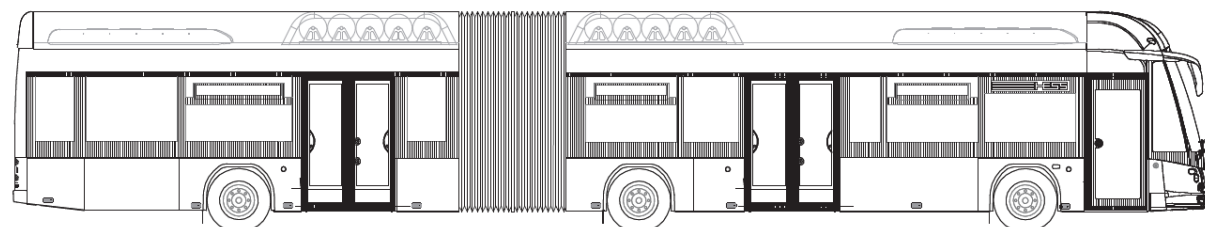
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et
de la communication (DETEC)

Office fédéral des transports OFT

Programme de mise en oeuvre de la stratégie énergétique 2050 des
transports publics (SETP 2050)

Motorisation à l'hydrogène des bus de transport public

Rapport final



Nils Monney **Haute Ecole d'Ingénierie et d'Architecture de Fribourg / Institut SeSi**

Boulevard de Pérolles 80, 1700 Fribourg, nils.monney@hefr.ch, www.heia-fr.ch

Laura Andres **Transports Publics Fribourgeois Trafic (TPF TRAFIC) SA**

Route du Vieux-Canal 6, 1762 Givisiez, Laura.Andres@tpf.ch, www.tpf.ch

Christian Nellen **Haute Ecole d'Ingénierie et d'Architecture de Fribourg / Institut SeSi**

Boulevard de Pérolles 80, 1700 Fribourg, christian.nellen@hefr.ch, www.heia-fr.ch

Groupe d'accompagnement

Simon Gillioz	HEIA-FR/Institut SeSi
Hervé Cotting	TPF Trafic SA
Gilles Biemann	TPF Trafic SA
Daniel Klein	FPT Motorenforschung AG
Gilles Hardy	FPT Motorenforschung AG
Laurent Pichon	ROSAS Center Fribourg
Jan Huber	ROSAS Center Fribourg
Gabriel Python	ROSAS Center Fribourg
Paria Amini	ROSAS Center Fribourg
Philippe Couty	Tecphy Sàrl
Antoine Maltey	Tecphy Sàrl
Jan Wunderlich	Carrosserie HESS AG
Alex Naef	Carrosserie HESS AG
Daniel Widmer	Carrosserie HESS AG

Mentions légales

Éditeur:
Office fédéral des transports OFT
Programme de mise en œuvre de la stratégie 2050 dans les transports publics (SETP 2050)
CH-3003 Berne

Responsable du programme
Tristan Chevroulet, (OFT)

Numéro de projet: P-155
Source
Accessible gratuitement par Internet
www.bav.admin.ch/energie2050

Seul l'auteur ou les auteurs sont responsables du contenu et des conclusions de ce rapport.

Berne, le 25.02.2022

Contenu

1	Situation de départ.....	15
2	Objectifs du travail.....	16
2.1	Partenaires du projet.....	16
3	Approche adoptée et état des connaissances actuelles.....	17
3.1	Connaissances actuelles sur les bus à hydrogène.....	17
3.2	Compréhension du système actuel.....	17
3.3	Motorisation à l'hydrogène.....	17
3.4	Respect des normes antipollution et post-traitement des gaz d'échappement.....	19
3.5	Stockage de l'hydrogène.....	20
4	Résultats.....	21
4.1	Réalisabilité du véhicule.....	21
4.2	Stockage de l'hydrogène.....	21
4.3	Potentiel de l'hybridation.....	22
4.4	Prévisions de consommation.....	22
4.5	Analyse sécuritaire.....	23
4.5.1	Vue d'ensemble.....	23
4.5.2	Moteur.....	24
4.5.3	Système hydrogène.....	25
4.5.4	Résultats.....	27
4.6	Homologation du véhicule.....	29
4.6.1	Analyse du DTC.....	29
4.7	Potentiel de la solution <i>H2BICE</i>	29
4.8	Analyse des coûts.....	30
4.8.1	TCO.....	30
4.8.2	Coûts de développement du moteur.....	32
4.8.3	Coûts de développement du véhicule.....	33
4.9	Production d'hydrogène (analyse Tecphy).....	34
4.9.1	Objectifs de l'étude et donnée attendues.....	34
4.9.2	Données d'entrée du dimensionnement.....	34
4.9.3	Plage des principales caractéristiques optimales de l'installation associée et impact.....	35
4.9.4	Résultats des simulations horaires.....	35
4.9.5	Répartition du coût et projections.....	36
4.9.6	Demande cumulée en énergie et taux de retour énergétique.....	38
4.9.7	Variation des coûts avec les facteurs externes.....	38
4.9.8	Motorisations alternatives au moteur à combustion interne H2 et impact sur la production PV.....	39
4.9.9	Productions alternatives d'hydrogène bas carbone.....	39
4.9.10	Technologies d'électrolyseurs.....	39
4.9.11	Pureté, ICE et compresseur.....	40
4.9.12	Glossaire.....	40
4.9.13	Commentaire sur l'étude Tecphy.....	40
4.10	Planning du projet.....	42

4.10.1	Développement du moteur	42
4.10.2	Développement du véhicule et construction du prototype.....	43
5	Discussion	44
6	Conclusions et recommandations.....	45

A. Executive Summary auf Deutsch

Die zukünftigen Erneuerungen von Busflotten bei konzessionierten Transportunternehmungen (KTU) werden durch die Energiestrategie 2050 und das zukünftige CO₂-Gesetz erheblich verändert. Es wird nicht mehr ausreichen, das neueste Modell eines Dieselmotors beim üblichen Lieferanten zu bestellen und ein Fahrzeug in Betrieb zu nehmen, das mit den vorherigen Fahrzeugen vollkommen übereinstimmt. Sowohl die Energiequelle, der Betrieb, die Wartung als auch die Kosten (Total Cost of Ownership) werden in Zukunft völlig unterschiedlich sein.

Diese Studie, die in enger Zusammenarbeit mit den Freiburger Verkehrsbetrieben (TPF) durchgeführt wurde, bewertet sowohl die technische als auch die wirtschaftliche Realisierbarkeit eines Ersatzes der Dieselmotore der TPF-Flotte durch Busse, die mit einem wasserstoffbetriebenen Verbrennungsmotor (H₂ICE) ausgestattet sind.

Eine umfangreiche Messkampagne auf städtischen und regionalen "Referenz"-Buslinien des TPF-Netzes wurde durchgeführt und diente als Grundlage für die Berechnungen und Simulationen, die zur Bestimmung der Gesamtbetriebskosten des zukünftigen Wasserstoffbusses *H₂BICE* herangezogen wurden. Parallel dazu wurde bei Fiat Powertrain Technologies (FPT/IVECO) eine Motorbasis identifiziert, die auf Wasserstoffverbrennung umgestellt werden sollte, und beim Bushersteller HESS wurde eine Fahrzeugbasis ausgewählt.

Die Bedingungen für die Integration der verschiedenen Komponenten, die für einen Bus mit H₂ICE erforderlich sind (Motor, Wasserstofftanks usw.), wurden in Betracht gezogen, um die Realisierbarkeit des Fahrzeugs zu überprüfen. Eine Sicherheitsanalyse sowie die für die Zulassung eines solchen Fahrzeugs erforderlichen Bedingungen vervollständigen die Analyse der Machbarkeit des Fahrzeugs.

Schließlich wurde eine umfassendere Betrachtung angestellt, die die Produktion von grünem Wasserstoff, der für den täglichen Betrieb einer Flotte von H₂BICE-Fahrzeugen benötigt wird, einbezieht und einen Überblick über diese neue Technologie verschafft.

Die durchgeführte Arbeit ermöglicht den Nachweis, dass die Realisierung eines solchen Fahrzeugs sowohl in technischer als auch in sicherheitstechnischer Hinsicht möglich ist und dass es im Vergleich zu den heute bekannten CO₂-neutralen Technologien wirtschaftlich sehr wettbewerbsfähig ist (26% niedrigere Gesamtbetriebskosten im Vergleich zu Brennstoffzellenfahrzeugen und 34% niedrigere Gesamtbetriebskosten im Vergleich zu Batteriefahrzeugen für außerstädtische Fahrten bis 2050).

B. Executive Summary en Français

Les futurs renouvellements de flottes de bus auprès des entreprises de transport concessionnaires (ETC) seront significativement bouleversés par la stratégie énergétique 2050 et la future loi sur le CO₂. En effet, il ne suffira plus de commander le dernier modèle de bus Diesel auprès du fournisseur habituel et pouvoir mettre en service un véhicule dans la parfaite continuité des précédents. Tant la source d'énergie, l'opération, la maintenance que les coûts (Total Cost of Ownership) seront à l'avenir totalement différents.

Cette étude, réalisée en étroite collaboration avec les Transports Publics Fribourgeois (TPF), évalue la réalisabilité tant technique qu'économique d'un remplacement des bus Diesel de la flotte des TPF avec des bus équipés d'un moteur à combustion alimenté par de l'hydrogène (H₂ICE).

Une campagne de mesures extensive sur des lignes de bus « référence » urbaines et régionales du réseau des TPF a été faite et a servi de base aux calculs et simulations utilisés pour définir le coût total de possession du futur bus à hydrogène *H₂BICE*. En parallèle, une base moteur a été identifiée chez Fiat Powertrain Technologies (FPT/IVECO) pour être convertie à la combustion d'hydrogène et une base véhicule a été sélectionnée chez le constructeur de bus HESS.

Les conditions nécessaires à l'intégration des divers composants requis à la réalisation d'un bus équipé d'un H₂ICE (moteur, réservoirs d'hydrogène, etc.) ont été considérées pour vérifier la réalisabilité du véhicule. Une analyse sécuritaire ainsi que des conditions requises pour l'homologation d'un tel véhicule complètent l'analyse de faisabilité du véhicule.

Finalement, une réflexion plus globale, intégrant la production de l'hydrogène vert requis pour l'exploitation journalière d'une flotte de véhicules H₂BICE a été réalisée, apportant une vue d'ensemble sur cette nouvelle technologie.

Le travail effectué permet de prouver que la réalisation d'un tel véhicule est possible tant sur le plan technique que sécuritaire et qu'il est économiquement très concurrentiel par rapport aux technologies neutres en CO₂ connues à ce jour (TCO inférieur de 26% par rapport aux véhicules à pile à combustible et inférieur de 34% par rapport aux véhicules à batterie pour des trajets extra-urbains à l'horizon 2050).

C. Executive Summary in English

The future renewal of bus fleets with the licensed public transport companies (ETC) will be significantly affected by the 2050 energy strategy and the future CO2 law. It will no longer be sufficient to order the latest Diesel bus model from the usual supplier and to put a vehicle that is a perfect continuation of the previous ones into service. The energy source, operation, maintenance and costs (Total Cost of Ownership) will be completely different in the future.

This study, carried out in close collaboration with the Transports Publics Fribourgeois (TPF), evaluates the technical and economic feasibility of replacing the Diesel buses in the TPF fleet with buses equipped with a hydrogen-powered combustion engine (H2ICE).

An extensive measurement campaign on urban and regional "reference" bus lines of the TPF network was carried out and served as a basis for the calculations and simulations used to define the total cost of ownership of the future *H2BICE* hydrogen bus. In parallel, an engine base was identified at Fiat Powertrain Technologies (FPT/IVECO) to be converted to hydrogen combustion and a vehicle base was selected at the bus manufacturer HESS.

The conditions necessary for the integration of the various components required for the realisation of a bus equipped with an H2ICE (engine, hydrogen tanks, etc.) were considered to verify the feasibility of the vehicle. A safety analysis as well as the conditions required for the approval of such a vehicle complete the feasibility analysis of the vehicle.

Finally, a more global reflection, integrating the production of the green hydrogen required for the daily operation of a fleet of H2BICE vehicles was carried out, providing an overview of this new technology.

The work carried out has shown that the realisation of such a vehicle is possible both technically and in terms of safety, and that it is economically very competitive compared to the CO2-neutral technologies known to date (TCO 26% lower than fuel cell vehicles and 34% lower than battery-powered vehicles for extra-urban journeys by 2050).

D. Zusammenfassung

Die anstehenden Erneuerungen von Busflotten bei den konzessionierten Transportunternehmen (KTU) werden durch die Energiestrategie 2050, das künftige CO₂-Gesetz und die künftige Emissionsnorm Euro 7 erheblich verändert. Es wird nicht mehr ausreichen, das neueste Dieselmotormodell beim üblichen Lieferanten zu bestellen und ein Fahrzeug in Betrieb nehmen zu können, das nahtlos an die vorherigen anschließt. Sowohl die Energiequelle, der Betrieb, die Wartung als auch die Kosten (Total Cost of Ownership) werden in Zukunft völlig anders sein, als wir es heute kennen.

Diese Studie, die in enger Zusammenarbeit mit den Freiburgischen Verkehrsbetrieben (TPF) durchgeführt wurde, bewertet die technische und wirtschaftliche Realisierbarkeit eines Ersatzes der Dieselmotoren in der Flotte und auf den Linien der TPF durch Busse, die mit einem wasserstoffbetriebenen Verbrennungsmotor (H₂ICE) ausgestattet sind. Dabei wurde klar zwischen städtischen und außerstädtischen (oder regionalen) Linien unterschieden, da sich die Betriebsanforderungen zwischen den beiden stark unterscheiden.

Die erste Phase der Studie bestand aus einer umfassenden Messkampagne auf sorgfältig ausgewählten Linien der TPF (hohes Fahrgastaufkommen, hoher Verbrauch, große Höhenunterschiede, aber auch Linien, die eher im mittleren Bereich dieser Linienmerkmale liegen), um die Betriebssituationen, in denen sich die Fahrzeuge befinden können, möglichst weitgehend abzudecken. Die Studie konzentrierte sich auf Fahrzeuge des Typs Mercedes-Benz Citaro Gelenkbus (18m). Dank der hohen Stichprobenrate der Messungen konnten die Fahrten detailliert analysiert werden. Informationen wie die Motorlast, der momentane Kraftstoffverbrauch und die Fahrzeuggeschwindigkeit waren entscheidend für das Verständnis der Funktionsweise der Fahrzeuge im Einsatz. Auf dieser Grundlage konnten dann realistische Simulationen eines zukünftigen Fahrzeugs mit H₂ICE erstellt werden.

Da die Entwicklung des Wasserstoffmotors einen wichtigen Teil der Entwicklung dieses neuen Fahrzeugs ausmacht, wurde schnell eine umzusetzende Motorbasis gewählt, um konkrete Berechnungen und Annahmen durchführen zu können, anstatt den Antrieb während der gesamten Machbarkeitsstudie als Blackbox zu betrachten. Der Basismotor, der aus der aktuellen Produktionsreihe von Fiat Powertrain Technologies (FPT) stammt, ist der C13 CNG, ein mit Erdgas betriebener Motor mit 13 Litern Hubraum. Wenn er auf Wasserstoff umgestellt wird, kann er problemlos das Leistungsniveau der Motoren erreichen, die derzeit in den Citaro 18m der TPF eingebaut sind. Anhand der Betriebsdaten dieses Motors konnte ein prädiktives Mapping für die H₂ICE-Version erstellt werden, das einen weiteren Schlüsselparаметer für die Durchführung von Verbrauchssimulationen in realen Situationen liefert. Ein konservativer Ansatz mit einem maximalen Wirkungsgrad von 40% wurde bevorzugt. Neben diesem Ansatz wurden auch zwei höhere Wirkungsgrade und eine leichte Hybridisierung in Betracht gezogen:

- Wirkungsgrad von 43% (Zielwert für den Motor mit indirekter Einspritzung).
- Wirkungsgrad von 46% (höherer Wert als bei aktuellen Dieselmotoren, der mit Direkteinspritzung erreicht werden kann).

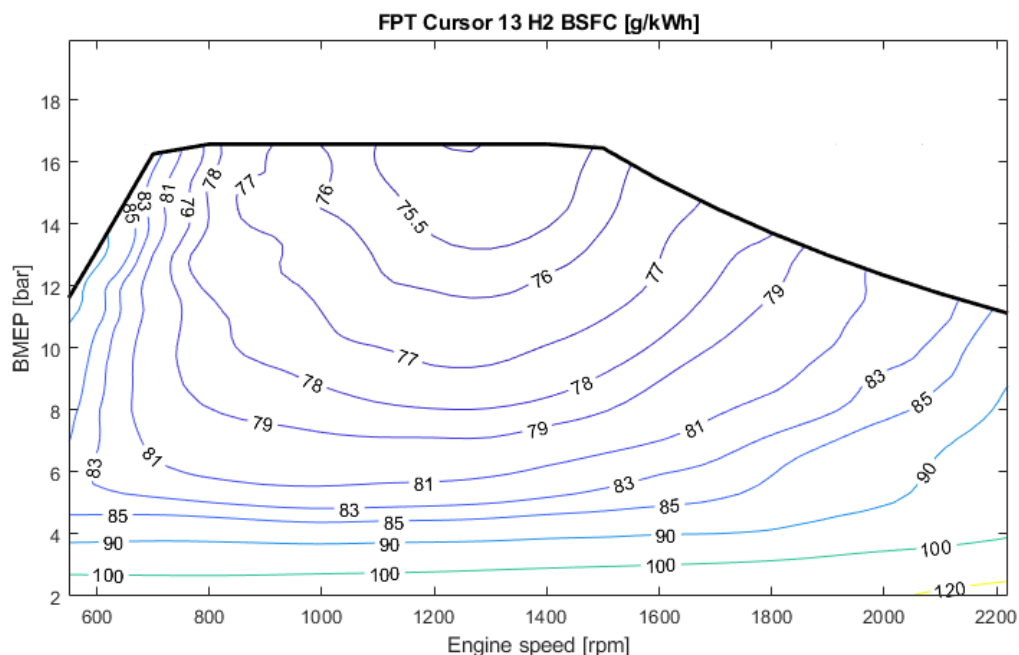


Abbildung 1 : Vorausschauendes Mapping des H₂ICE-Motors (maximaler Wirkungsgrad auf 40% festgelegt)

Mithilfe der Verbrauchssimulationen konnte die Menge an Wasserstoff definiert werden, die benötigt wird, um die geforderte Reichweite der TPF zu erfüllen. Konsultationen mit einem der Hauptakteure im Bereich der Wasserstoffspeicherung führten zu einer ersten Gesamtdimensionierung des Speichersystems, die eine unabdingbare Voraussetzung für die Validierung einer Dachintegration der Tanks ist. Eines der Ziele des Fahrzeugs *H2BICE* (Hydrogen Bus with Internal Combustion Engine) ist es nämlich, sich so wenig wie möglich von den Eigenschaften des heutigen Fahrzeugs zu entfernen (Reichweite, Passagierkapazität usw.). Die Positionierung der Tanks auf dem Dach trägt dazu bei, dass die Passagierkapazität erhalten bleibt.

Mit Hilfe des Schweizer Busherstellers HESS konnte eine Fahrzeugbasis ausgewählt werden, die mit einem H2ICE angetrieben werden kann. Die Validierung (Abmessungen, Belastung) wurde an einem bestehenden Fahrzeug durchgeführt.

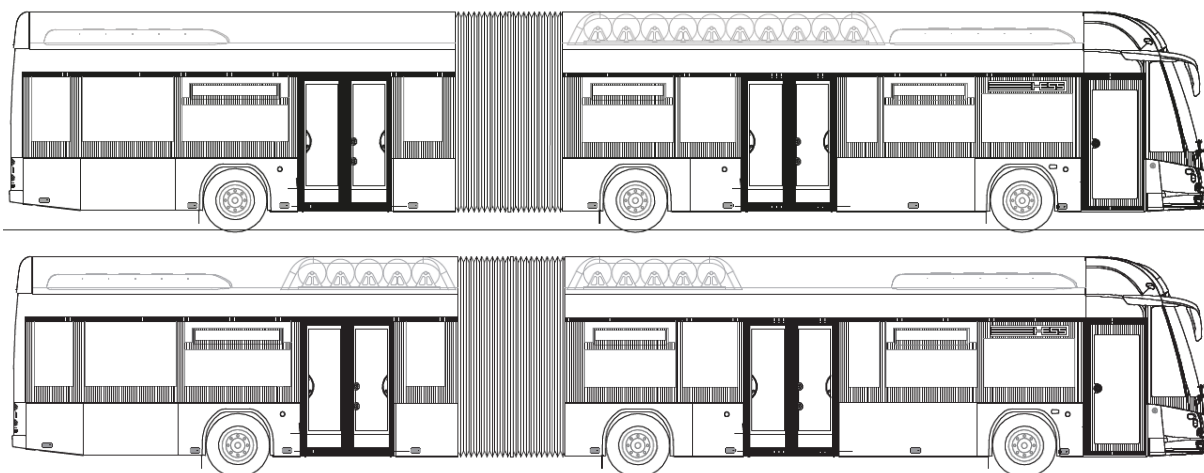


Abbildung 2 : Zwei verschiedene Konfigurationen für die Integration des Wasserstoffspeichers in das Dach des HESS-Fahrzeugs

Da die reguläre Inbetriebnahme eines solchen Fahrzeugs nicht möglich ist, ohne zuvor alle notwendigen Systeme zur Gewährleistung der Sicherheit der Passagiere zu integrieren, wurde dieser Aspekt von Anfang an durch eine Zusammenarbeit mit den Spezialisten für Fahrzeugsicherheit des ROSAS (Robust and Safe Systems) Center Fribourg Center in Freiburg berücksichtigt. Es wurde ein standardisierter Ansatz nach ISO 26262 angewandt, um die gleichen Anforderungen wie bei Großserienfahrzeugen zu erfüllen. Darüber hinaus wurde eine Analyse der verschiedenen Anforderungen für die Zulassung dieses Fahrzeugs im Kanton Freiburg, in der Schweiz im Allgemeinen und in Europa mit Hilfe des DTC (Dynamic Test Center, die zertifizierte Schweizer Organisation für die Zulassung dieses Fahrzeugtyps) durchgeführt. Die auf diesen funktionalen Studien basierenden angepassten Konstruktionsmethoden ermöglichen es, die Sicherheitsaspekte zu verwalten und ein Sicherheitsniveau aufrechtzuerhalten, das dem eines herkömmlichen Busses entspricht. Allerdings müssen die Garagen angepasst werden, um dem Risiko eines Wasserstoffaustritts bei Wartungsarbeiten Rechnung zu tragen.

Eine der Anforderungen des Projekts bestand darin, den Antrieb eines öffentlichen Verkehrsbusses mit einem H2ICE ganzheitlich zu analysieren, d. h. auch die Produktion und die Kosten des Wasserstoffs zu berücksichtigen. Eine Vielzahl von Szenarien, die eine Produktion vor Ort berücksichtigten, die größtenteils von einer Adhoc-Photovoltaikanlage gespeist wird, wurden vom Partner Tecphy vorgeschlagen. Die aktuellen und zukünftigen Wasserstoffkosten wurden berechnet, um die Nutzung eines H2BICE-Fahrzeugs auf lange Sicht (bis 2050) zu prognostizieren.

Wie bereits beschrieben, unterscheidet sich der Betrieb eines Busses auf städtischen Strecken stark von dem auf regionalen Strecken (Durchschnittsgeschwindigkeit, Anzahl der Haltestellen pro Kilometer, Motorlast usw.). Durch die Berücksichtigung dieses Unterschieds kann gezeigt werden, in welcher Situation der H2BICE aus rein energetischer Sicht am effizientesten ist. Auch der finanzielle Aspekt folgt demselben Muster. In den beiden folgenden Tabellen werden die Gesamtbetriebskosten (TCO) (die den Kauf und die Abschreibung des Fahrzeugs, seine Wartung, die Lade-/Tankstellen und den Kraftstoff umfassen, um nur die wichtigsten Parameter zu nennen) des H2BICE-Fahrzeugs mit den in den Studien üblicherweise betrachteten "emissionsfreien" Technologien verglichen.

	Wasserstoffkosten	Batterie	Fuel Cell	H2BICE
Kaufpreis (CHF)		935 000	1 300 000	700 000
TCO (10 Jahren) Aktuelle Situation	10.60 CHF/kg	3 050 000	3 290 000	2 670 000
TCO (10 Jahren) Projektion 2025	8.25 CHF/kg	3 050 000	3 055 000	2 395 000
TCO (10 Jahren) Projektion 2030	6.30 CHF/kg	3 050 000	2 855 000	2 165 000
TCO (10 Jahren) Projektion 2050	5.00 CHF/kg	3 050 000	2 720 000	2 010 000

*Tabelle 1 : TCO-Vergleich, **Regionalfahrzeuge** (die Spalte für batteriebetriebene Busse ist durchgestrichen, da die Option aufgrund der unzureichenden Reichweite dieses Fahrzeugtyps nicht wirklich mit anderen verglichen werden kann)*

	Wasserstoffkosten	Batterie	Fuel Cell	H2BICE (Hybrid)
Kaufpreis (CHF)		850 000	1 300 000	800 000
TCO (10 Jahren) Aktuelle Situation	10.60 CHF/kg	2 100 000	2 960 000	2 765 000
TCO (10 Jahren) Projektion 2025	8.25 CHF/kg	2 100 000	2 760 000	2 490 000
TCO (10 Jahren) Projektion 2030	6.30 CHF/kg	2 100 000	2 600 000	2 255 000
TCO (10 Jahren) Projektion 2050	5.00 CHF/kg	2 100 000	2 490 000	2 100 000

*Tabelle 2 : TCO-Vergleich, **Stadtfahrzeuge***

Es zeigt sich, dass der H2BICE-Bus bei regionalen Fahrten durchaus wettbewerbsfähig und sogar vorteilhaft ist (26% niedrigere TCO im Vergleich zu Brennstoffzellenfahrzeugen und 34% niedrigere TCO im Vergleich zu batteriebetriebenen Fahrzeugen für 2050). Darüber hinaus kann er die erforderliche Tagesreichweite problemlos abdecken, was beim Elektrobus (der oft als die Lösung bezeichnet wird, die alle Anforderungen der "emissionsfreien" Mobilität von morgen abdecken kann) aufgrund seiner unzureichenden Reichweite und der exorbitanten (logistischen und finanziellen) Kosten einer Schnellladeinfrastruktur an den Endhaltestellen absolut nicht der Fall ist. Aufgrund der sehr hohen Anschaffungskosten für diese Art von Fahrzeugen ist er auch günstiger als ein Bus mit Brennstoffzelle. Es muss jedoch betont werden, dass der Elektrobus für Stadtfahrten, bei denen es viel einfacher ist, eine Ladeinfrastruktur zu installieren (an den Endhaltestellen, durch Flaschenpost usw.), nach wie vor eine hervorragende Lösung darstellt.

Am Ende dieser Studie konnte gezeigt werden, dass ein Bus, der mit einem Wasserstoff-Verbrennungsmotor angetrieben wird, sowohl technisch als auch finanziell machbar ist und gleichzeitig die Sicherheitsaspekte gewährleistet. Auch sein bevorzugtes Einsatzgebiet konnte definiert werden. Es ist hervorzuheben, dass es sich um eine realistische Lösung handelt, um den Bedarf des öffentlichen Verkehrs für regionale Linien in naher Zukunft zu decken, für die die Betriebskosten unter den drei betrachteten "emissionsfreien" Technologien am günstigsten wären. Darüber hinaus ist der Verbrennungsmotor eine bestehende, bewährte und gut industrialisierte Technologie. Die für die Umrüstung bestehender Motoren auf Wasserstoff erforderlichen Änderungen können von der einheimischen Maschinenbauindustrie vorgenommen werden, und der Industrialisierungsaufwand ist im Vergleich zu den anderen Technologien gering.

E. Résumé

Les prochains renouvellements de flottes de bus auprès des entreprises de transport concessionnaires (ETC) seront significativement bouleversés par la stratégie énergétique 2050, la future loi sur le CO2 et la future norme d'émissions Euro 7. En effet, il ne suffira plus de commander le dernier modèle de bus Diesel auprès du fournisseur habituel et pouvoir mettre en service un véhicule dans la parfaite continuité des précédents. Tant la source d'énergie, l'opération, la maintenance que les coûts (Total Cost of Ownership) seront à l'avenir totalement différents de ce que l'on connaît actuellement.

Cette étude, réalisée en étroite collaboration avec les Transports Publics Fribourgeois (TPF), évalue la réalisabilité tant technique qu'économique d'un remplacement des bus Diesel de la flotte et sur les lignes des TPF avec des bus équipés d'un moteur à combustion alimenté par de l'hydrogène (H2ICE). Une distinction claire entre lignes urbaines et lignes extra-urbaines (ou régionales) est faite, car les contraintes d'exploitation diffèrent fortement entre les deux.

La première phase de l'étude a consisté en une campagne de mesures exhaustive sur des lignes des TPF choisies attentivement (forte charge de passagers, forte consommation, fort dénivelé mais aussi des lignes plutôt situées dans des plages moyennes de ces caractéristiques de ligne) afin de couvrir le plus largement possible les situations d'exploitation dans lesquelles les véhicules pourront se trouver. L'étude s'est concentrée sur des véhicules de type Mercedes-Benz Citaro articulés (18m). Grâce au taux d'échantillonnage élevé des mesures, les trajets ont pu être analysés en détail. Des informations telles la charge du moteur, la consommation instantanée de carburant et la vitesse du véhicule pour ne citer qu'elles ont été cruciales dans la compréhension du fonctionnement des véhicules en service. On a ensuite pu construire sur cette base des simulations réalistes d'un futur véhicule équipé d'un H2ICE.

Le développement du moteur à hydrogène représentant une part importante du développement de ce nouveau véhicule, une base moteur à convertir a rapidement été choisie afin de pouvoir effectuer des calculs et hypothèses concrets, plutôt que de considérer la motorisation comme une boîte noire tout au long de l'étude de faisabilité. La base moteur en question, provenant de la gamme actuellement en production chez Fiat Powertrain Technologies (FPT), est le C13 CNG, moteur de 13 litres de cylindrée fonctionnant au gaz naturel. Il permettra, une fois converti à l'hydrogène, d'atteindre aisément le niveau de performances des moteurs équipant actuellement les Citaro 18m des TPF. Grâce aux données de fonctionnement de ce moteur, une cartographie prédictive de sa version H2ICE a pu être générée, apportant ainsi un paramètre clé en plus pour effectuer des simulations de consommation en situation réelle. Une approche conservatrice avec un rendement maximal plafonné à 40% a été plébiscitée. Deux niveaux de rendements améliorés ainsi qu'une hybridation légère ont également été considérés en parallèle de cette approche :

- Rendement de 43% (objectif pour le moteur à injection indirecte)
- Rendement de 46% (valeur supérieure à celle des moteurs Diesel actuels pouvant être atteinte grâce à l'injection directe)

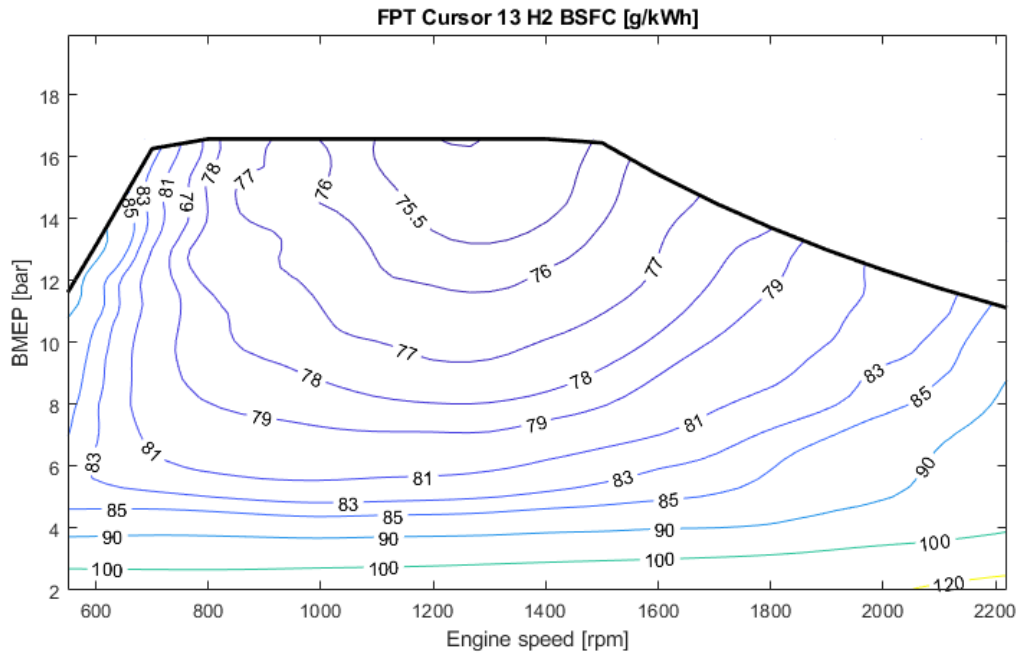


Figure 1 : Cartographie prévisionnelle du moteur H2ICE (rendement maximal fixé à 40%)

A l'aide des simulations de consommation, la quantité d'hydrogène requise pour répondre à l'exigence d'autonomie des TPF a pu être définie. Des consultations auprès d'un des acteurs principaux du stockage d'hydrogène ont mené à un premier dimensionnement global du système de stockage, condition indispensable à la validation d'une intégration en toiture des réservoirs. En effet, un des objectifs du véhicules H2BICE (Hydrogen Bus with Internal Combustion Engine) est de s'éloigner le moins possible des caractéristiques du véhicule actuel (autonomie, capacité passagers, etc.). Le positionnement des réservoirs en toiture contribue au maintien de la capacité passagers.

Avec l'aide du fabricant Suisse de bus HESS, une base véhicule pouvant être motorisée par un H2ICE a pu être sélectionnée. C'est donc sur un véhicule existant que les validations (dimensionnelle, charge) ont été effectuées.

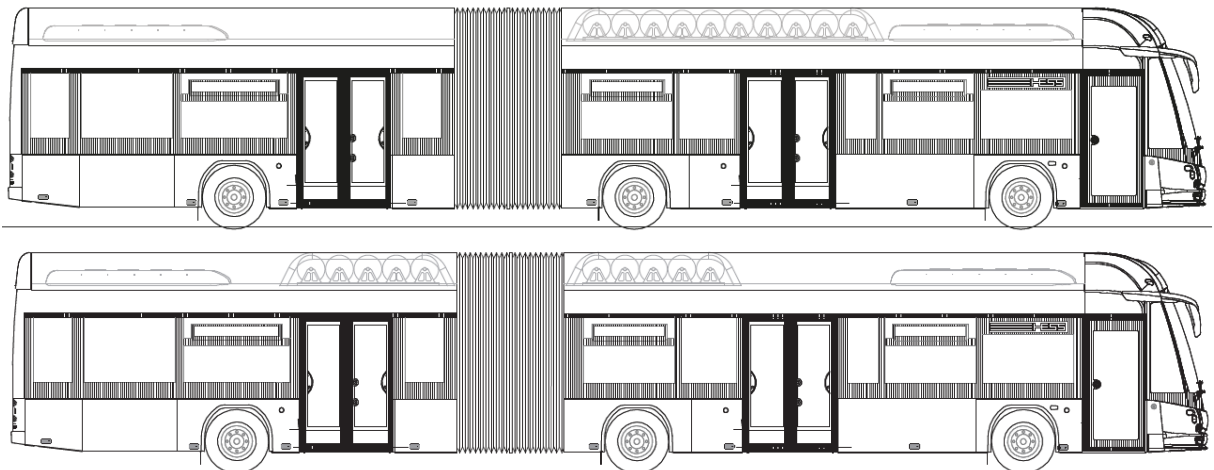


Figure 2 : Deux configurations différentes d'intégration du stockage d'hydrogène en toiture sur le véhicule HESS

La mise en service régulier d'un tel véhicule est impossible sans avoir intégré au préalable tous les systèmes nécessaires pour garantir la sécurité des passagers, cet aspect a été considéré dès le début, au travers d'une collaboration avec les spécialistes en sécurité automobile du ROSAS (Robust and Safe Systems) Center Fribourg Center de Fribourg. Une approche standardisée selon la norme ISO 26262 a été appliquée afin de répondre aux mêmes exigences que les véhicules de grande série. De plus, une analyse des différentes exigences relatives à l'homologation de ce véhicule dans le canton de Fribourg, en Suisse de manière générale ainsi qu'en Europe a été effectuée avec l'aide du DTC (Dynamic Test

Center, l'organisme Suisse certifié pour l'homologation de ce type de véhicules). Des méthodes d'ingénierie adaptées sur base de ces études fonctionnelles permettent de gérer les aspects de sécurité et maintenir un niveau de sécurité équivalent à celui d'un bus traditionnel. Cependant, les garages devront être adaptés pour tenir compte du risque de fuite d'hydrogène pendant des opérations de maintenance.

Une des exigences du projet était d'analyser la motorisation d'un bus de transport public avec un H2ICE de manière globale, c'est-à-dire en considérant également la production et les coûts de l'hydrogène. Une multitude de scénarios considérant la production sur site en grande partie alimentée par une installation photovoltaïque Adhoc ont été proposés par le partenaire Tecphy. Des projections de coûts de l'hydrogène actuelles ainsi que futures ont permis d'également de se projeter par rapport à l'utilisation d'un véhicule H2BICE sur le plus long terme (horizon 2050).

Ainsi que décrit précédemment, le fonctionnement d'un bus sur des lignes urbaines est très différent des lignes régionales (vitesse moyenne, nombre d'arrêts au kilomètre, charge du moteur, etc.). La prise en compte de cette différence permet de montrer dans quelle situation le H2BICE est le plus efficace d'un point de vue purement énergétique. L'aspect financier suit également la même tendance. Dans les deux tableaux suivants, on compare le coût total de possession (TCO) (qui inclut l'achat et l'amortissement du véhicule, son entretien, les stations de recharge/remplissage et le carburant pour ne citer que les principaux paramètres) du véhicule H2BICE avec les technologies « zéro-émissions » généralement considérées dans les études.

	Coût de l'hydrogène	Batterie	Bus PàC	H2BICE
Prix d'achat (CHF)		935 000	1 300 000	700 000
TCO (10 ans) situation actuelle	<i>10.60 CHF/kg</i>	3 050 000	3 290 000	2 670 000
TCO (10 ans) projection 2025	<i>8.25 CHF/kg</i>	3 050 000	3 055 000	2 395 000
TCO (10 ans) projection 2030	<i>6.30 CHF/kg</i>	3 050 000	2 855 000	2 165 000
TCO (10 ans) projection 2050	<i>5.00 CHF/kg</i>	3 050 000	2 720 000	2 010 000

Tableau 1 : Comparaison des TCO, véhicules régionaux (la colonne des bus à batterie est barrée car l'option ne peut être réellement comparée aux autres en raison de l'autonomie insuffisante de ce type de véhicule)

	Coût de l'hydrogène	Batterie	Bus PàC	H2BICE (Hybrid)
Prix d'achat (CHF)		850 000	1 300 000	800 000
TCO (10 ans) situation actuelle	<i>10.60 CHF/kg</i>	2 100 000	2 960 000	2 765 000
TCO (10 ans) projection 2025	<i>8.25 CHF/kg</i>	2 100 000	2 760 000	2 490 000
TCO (10 ans) projection 2030	<i>6.30 CHF/kg</i>	2 100 000	2 600 000	2 255 000
TCO (10 ans) projection 2050	<i>5.00 CHF/kg</i>	2 100 000	2 490 000	2 100 000

Tableau 2 : Comparaison des TCO, véhicules urbains

On observe que le bus H2BICE est tout à fait concurrentiel et même avantageux pour ce qui est des trajets régionaux (TCO inférieur de 26% par rapport aux véhicules à pile à combustible et inférieur de 34% par rapport aux véhicules à batterie pour des à l'horizon 2050). De plus, il permet de couvrir l'autonomie journalière requise sans problèmes, ce qui n'est absolument pas le cas du bus électrique (souvent décrit comme la solution qui pourra couvrir tous les besoins de la mobilité « zéro-émissions » de demain) en raison de son autonomie insuffisante et du coût (logistique et financier) exorbitant d'une infrastructure de recharge rapide aux terminus. Il est également plus avantageux que le bus équipé d'une pile à combustible, en raison du coût d'acquisition très élevé de ce type de véhicules. Il faut néanmoins souligner que pour des trajets urbains où il est beaucoup plus aisé d'installer une infrastructure de recharge (aux terminus, par biberonnage, etc.), le bus électrique reste une excellente solution.

Au terme de cette étude, il a pu être montré que le bus entraîné grâce à un moteur à combustion à hydrogène est réalisable, tant sur le plan technique que financier, tout en garantissant les aspects sécuritaires. Son domaine d'exploitation de prédilection a également pu être défini. On soulignera que c'est une solution réaliste pour couvrir les besoins des transports publics pour des lignes régionales dans un futur proche, lignes pour lesquelles le coût d'exploitation serait le plus avantageux parmi les 3 technologies « zéro-émissions » considérées. De plus, le moteur à combustion est une technologie existante, éprouvée et bien industrialisée. Les modifications requises pour convertir les moteurs actuels à l'hydrogène peuvent être effectuées par l'industrie mécanique indigène et l'effort d'industrialisation est faible comparativement aux autres technologies.

1 Situation de départ

Les technologies de propulsion développées actuellement (motorisation électrique alimentée par une pile à combustible et/ou des batteries) pour l'utilisation d'énergies renouvelables en remplacement des énergies fossiles comportent un certain nombre de limitations :

- Elles restent très coûteuses, même avec une industrialisation à large échelle
- Elles ne s'imposent pas en raison de leur masse élevée et de leur autonomie limitée
- Elles requièrent l'utilisation de matières premières rares ou qui le deviendront (terres rares, lithium, cuivre, ...)
- Elles nécessitent la production et l'utilisation de nombreux composants et matières difficilement recyclables (du moins à l'heure actuelle).
- Les batteries de stockage ont une durée de vie limitée et perdent en capacité avec le temps.

Une alternative intéressante est l'utilisation de dihydrogène (H_2 , appelé simplement « hydrogène » dans ce document pour plus de clarté) dans un moteur à combustion car elle présente de nombreux atouts :

- Jusqu'à zéro émission de CO_2 « du puits à la roue » (well-to-wheel) selon la provenance de l'énergie pour la production d'hydrogène
- Repose sur une technologie de base, le moteur à combustion, déjà bien éprouvée et dont la connaissance approfondie l'appareil de production optimisé la rendent peu coûteuse
- Pourrait permettre de transformer avec des investissements faibles, un énorme parc de véhicules dans un temps très court
- En comparaison avec la technologie actuellement développée utilisant de l'hydrogène, la pile à combustible, le moteur à hydrogène permet d'atteindre un meilleur rendement à forte charge. Lors d'un projet d'analyse de mesures de consommation, il a été constaté que pour un trajet hors-ville d'un bus de TP, le temps de pleine charge est supérieur à 50% du temps de fonctionnement. Pour des parcours avec des montées ou des régions montagneuses, le temps de pleine charge sera encore plus conséquent.
- Contrairement à la pile à combustible, le moteur à combustion n'est pas sensible aux impuretés du carburant et ne requiert donc pas un hydrogène fortement purifié. Selon les normes SAE J-2719 et ISO 14687-2 appliquées pour les piles à combustible courantes (p.ex. Ballard sur les gammes FCmove-HD et FCveloCity-HD), la pureté minimum de l'hydrogène fourni à une pile à combustible doit être 4.0 (voir 0). Néanmoins, selon Linde, les stations-service sont généralement alimentées en pureté 4.5 aux USA et 5.0 en Europe [1] afin de garantir que les membranes de la pile à combustible ne soient pas abîmées par le gaz. Ce processus de purification nécessite un module supplémentaire sur l'unité de production de gaz (en particulier un dessiccateur pour déshumidifier l' H_2 produit à partir d'électrolyseurs PEM par exemple) consommant du courant et pouvant générer plus de 10% de pertes en fonction du module utilisé [2]. Le moteur à combustion, quant à lui, fonctionne extrêmement bien avec de l'hydrogène non purifié, c'est-à-dire avec une pureté de 2.5 par exemple. A ce jour, la différence de prix à l'achat entre une pureté 2.5 et une pureté 5.0 chez un fournisseur de gaz en bouteilles Suisse est proche d'un facteur 4, on peut donc en déduire que les coûts de production évoluent d'une manière similaire. Cette capacité de fonctionner sans diminuer la performance avec un hydrogène de pureté moindre pourrait également permettre à l'exploitant du véhicule de produire dans le futur son hydrogène avec des électrolyseurs à bas coûts actuellement en développement. On peut citer entre autres les électrolyseurs sans membrane sur lesquels planchent entre autres un laboratoire de l'EPFL [3]. Ces technologies produisent de l'hydrogène à coûts moindres qu'un électrolyseur PEM pour l'instant au prix d'une pureté plus faible (typiquement de l'ordre de 2.5).
- Une chaîne de transmission basée sur un moteur à combustion à hydrogène plutôt qu'une pile à combustible par exemple, permet de facilement imaginer des programmes de « retrofit » de véhicules existants. Deux options pourraient principalement être envisagées : soit le remplacement de l'assemblage moteur-boîte par des composants neufs dont un moteur à hydrogène, soit l'utilisation d'un kit de conversion du moteur existant pour passer du Diesel à l'hydrogène. Dans les deux cas, il faudrait également intégrer les réservoirs sur le toit du véhicule, ce qui n'est a priori pas un problème, vu que les véhicules Diesel sont souvent déclinés en version gaz naturel, version pour laquelle ils sont déjà équipés de réservoirs sur leur toit (ex : Mercedes-Benz Citaro NGT, Volvo 7900 CNG, IVECO Urbanway CNG, etc.). On peut donc considérer que la structure du toit d'un bus initialement équipé d'un moteur Diesel pourra a priori supporter les réservoirs d'hydrogène sans grosse modification.

2 Objectifs du travail

Le problème à résoudre par cette étude de faisabilité est de montrer l'intérêt économique et les pistes de mise en œuvre industrielle d'une solution H2ICE dans les bus de transport publics pour remplir l'objectif de réduction drastique des émissions de CO₂ visé par la stratégie énergétique 2050. Les TPF (Transports Publics Fribourgeois) consomment aujourd'hui 4.8 millions de litres de diesel, dont 1.2 millions de litres sur les lignes urbaines, et cherchent activement des solutions pour réduire leurs émissions. L'aspect financier est également une motivation à fortement réduire la dépendance du réseau de transports publics aux énergies fossiles. En effet, la confédération supprimera le remboursement de l'impôt sur les huiles minérales aux entreprises de transport concessionnaires à compter du 1^{er} janvier 2026 pour les lignes urbaines, respectivement du 1^{er} janvier 2030 pour les lignes régionales [4]. En fonction du prix d'achat du carburant, la suppression du remboursement de l'impôt pourrait représenter une augmentation des frais de carburant dépassant allègrement les 50% [5]. On notera que selon l'administration fédérale des douanes, les TPF se sont vus rembourser pour 2.57 millions de CHF d'impôts sur les huiles minérales au cours de l'année 2018 [6, p. 33]. On comprend donc l'ampleur de l'impact qu'aura cette augmentation de prix du carburant sur les dépenses des entreprises. Il est à préciser que la suppression de l'impôt sur les huiles minérales fait partie de la loi révisée sur le CO₂ qui est actuellement en consultation. Si la mise en œuvre de cette loi devait être refusée, deux scénarios peuvent être envisagés : soit les entreprises de transport public continuent à exploiter des véhicules Diesel comme aujourd'hui jusqu'à ce que le prix de ce carburant devienne grevant, soit elles suivent la voie des CFF et décident de leur plein gré de viser la neutralité climatique pour une certaine date [7]. Les constructeurs de bus risquant de fortement diminuer leur offre de bus à carburants fossiles (à l'instar de Mercedes, qui s'attend à une part de 70% de véhicules sans émissions de CO₂ pour 2030 [8]), cela rend la seconde option très vraisemblable.

Une recommandation positive à l'issue de l'étude de faisabilité sera l'élément déclencheur pour la suite du projet, dont le but sera de concrétiser le véhicule H2BICE (Hydrogen Bus with Internal Combustion Engine) au travers d'une première phase de simulation, conception et développement du « kit » pour convertir le moteur thermique d'un fonctionnement au gaz naturel (voir chapitre 3.3 pour plus de détails sur la raison de ce choix) à un fonctionnement à l'hydrogène en collaboration étroite avec FPT Motorenforschung. La totalité des essais au banc seront effectués sur les installations de la HEIA-FR qui sont entièrement équipées et prêtes à fonctionner à l'hydrogène. Dans une seconde phase, le développement et la construction (ou la conversion) du premier véhicule prototype qui sera testé en conditions réelles auprès des TPF aura lieu.

2.1 Partenaires du projet

Les différents partenaires du projet sont les suivants :

- Transports Publics Fribourgeois Trafic (**TPF TRAFIC**) SA. Les Transports publics fribourgeois (TPF) sont les principaux exploitants des lignes de transports publics dans le Canton de Fribourg. Ils possèdent une flotte de bus urbains pour les réseaux des agglomérations de Fribourg et Bulle ainsi qu'une flotte de bus régionaux sillonnant l'entier du canton. Soucieux des questions environnementales, les TPF sont à la recherche de solutions permettant la décarbonisation de leurs flottes de véhicules routiers. Ils s'intéressent de près à l'hydrogène et souhaitent approfondir leurs connaissances sur les différentes technologies existantes. Ils se sont donc associés à la HEIA-FR pour réaliser une étude de faisabilité pour des moteurs à combustion hydrogène, solution pour laquelle la littérature est peu nombreuse et très lacunaire.
- Haute école d'Ingénierie et d'Architecture de Fribourg (**HEIA-FR**) : les instituts **SeSi** (Sustainable Engineering Systems Institute) et **ROSAS** (Robust and Safe Systems Center) sont impliqués dans ce projet.
- **FPT Motorenforschung** AG est une entreprise qui conçoit des moteurs diesel et à gaz de haute performance. Son siège est à Arbon (TG).
- **HESS** AG est une entreprise qui conçoit et fabrique notamment des bus pour les transports publics. Son siège est à Bellach (SO).
- **Tecphy** Sàrl est une entreprise qui conçoit et met en œuvre des systèmes énergétiques, particulièrement en lien avec l'hydrogène. Son siège est à Renens (VD).

3 Approche adoptée et état des connaissances actuelles

3.1 Connaissances actuelles sur les bus à hydrogène

Les bus « à hydrogène » doivent être séparés en deux sous-catégories : les bus avec un moteur à combustion à hydrogène et les bus électriques avec une pile à combustible à hydrogène. Ces derniers sont en réalité très proches d'un véhicule 100% électrique, avec comme différence une batterie plus compacte et une pile à combustible qui génère du courant à partir d'hydrogène stocké à bord, à la manière d'un range extender. Des études en conditions réelles d'ampleur européenne ont déjà été effectuées tant avec des bus à moteur à hydrogène qu'avec des piles à combustible, cette dernière catégorie représentant la grande majorité des véhicules testés. Les bus à moteur à combustion à hydrogène (MAN Lion's City H2, 12m) ont été testés à Berlin dans le cadre des projets HyFLEET:CUTE [9] entre 2006 et 2009 et CHIC [10] (Clean Hydrogen in European Cities) entre 2010 et 2016. Ces bus, bien qu'affichant une consommation plus élevée que les bus à PAC en partie en raison d'une technologie de moteur archaïque et peu optimisée (entre autres l'absence de suralimentation sur certains d'entre eux), ont affiché un taux de disponibilité clairement supérieur aux bus à PAC et similaire au taux de disponibilité des bus Diesel conventionnels. L'entretien de ces véhicules était aussi très proche des véhicules Diesel déjà en service dans la flotte. De récents travaux sur des moteurs industriels [11] ainsi que les travaux de recherche en cours à la HEIA montrent un potentiel d'optimisation important (pour le détail des prévisions de rendement, voir l'annexe H.3).

3.2 Compréhension du système actuel

Afin de comprendre de quelle manière les véhicules sont utilisés sur les diverses lignes ainsi que pour avoir des valeurs précises relatives aux consommations des véhicules actuels, des mesures ont été faites sur plusieurs lignes (tant urbaines qu'extra-urbaines). Pour ce faire, le système d'acquisition de données développé par l'HEPIA dans le cadre du projet OFT P-084 (*Développement d'un système embarqué dans les bus pour favoriser une conduite écologique*) a été utilisé. Ce système équipant actuellement 30 véhicules dans la flotte des TPF, il a été possible d'obtenir des valeurs pour les véhicules désirés sur les lignes « représentatives » choisies. Le taux d'échantillonnage élevé disponible en optant pour cette interface (1-50 Hz, variant d'un paramètre à l'autre selon les valeurs prédéfinies dans le protocole de communication FMS [12], qui récupère lui-même des informations sur le CAN-bus) permet d'analyser précisément le fonctionnement des véhicules et ainsi quantifier les différences entre les différents types de trajets. Grâce à un programme MATLAB développé dans le cadre du présent projet (et dont on trouvera une explication succincte dans l'annexe H.1), on peut convertir les données brutes enregistrées et ainsi reconstituer le trajet seconde après seconde, en analysant les données telles que la consommation de carburant instantanée pour un niveau de performances donné, le couple nécessaire pour une certaine accélération à une vitesse donnée, etc. Les données permettent de comprendre de quelle manière le véhicule est utilisé sur une ligne urbaine ou régionale ou encore sur un parcours à dénivelé faible ou élevé.

Les lignes sélectionnées en accord avec les TPF (la sélection couvre tous les types de cas d'utilisation) sont les suivantes :

- Ligne urbaine (ville de Fribourg) : 5 (Villars-sur-Glâne – Torry)
- Ligne urbaine (ville de Bulle) : 201 (La Tour-de-Trême – Riaz)
- Lignes extra-urbaines : 234 (Fribourg – La Roche – Bulle), 260 (Bulle – Charmey – Jaun)

Ces lignes de bus sont toutes exploitées avec des véhicules de Type Mercedes-Benz Citaro articulé (18m).

3.3 Motorisation à l'hydrogène

Au cours des dernières années, bon nombre d'instituts de recherche spécialisés et de fabricants de moteurs ont commencé à concevoir ou convertir des moteurs à combustion pour fonctionner à l'hydrogène. Bien qu'il y ait une variété de différentes puissances et de différents concepts développés en parallèle, beaucoup de questions restent ouvertes, tant sur les composants spécifiques que sur les différentes stratégies à adopter comme la stratégie de combustion.

Le moteur choisi pour motoriser le véhicule doit encore être développé. Néanmoins, il sera basé sur un moteur existant qui est déjà produit en série : le moteur à gaz naturel FPT Cursor 13 NG. Le choix d'un moteur à gaz naturel et non d'un moteur Diesel comme base repose sur quelques critères qui permettront de simplifier la conversion. Les principaux sont :

- Dans les deux cas, des modifications devront être apportées à des composants internes comme par exemple les pistons. Néanmoins, les soupapes et sièges de soupapes peuvent être identiques à ceux du moteur à gaz. Ceci est dû au fait que dans un moteur à gaz, ces deux composants sont déjà prévus pour fonctionner sans être lubrifiés par le carburant, contrairement au

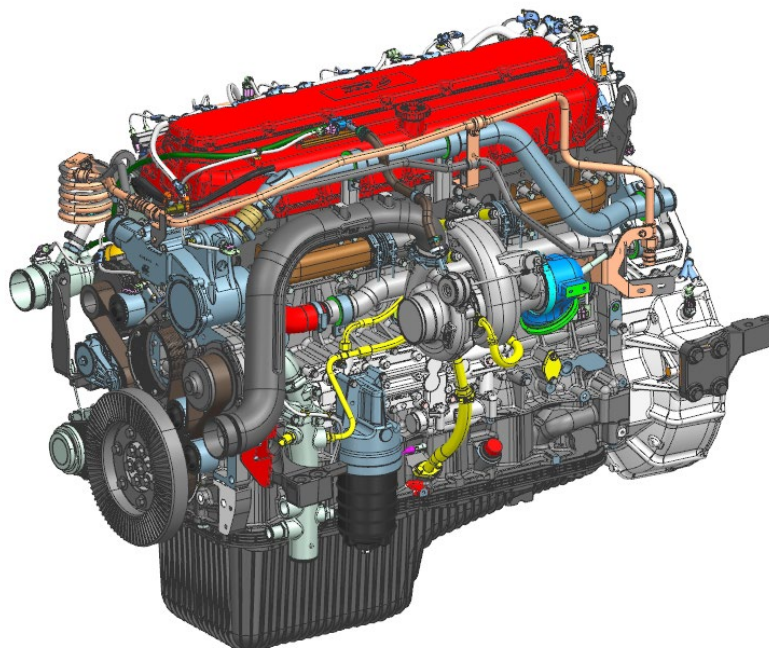


Figure 3 : Vue 3D du moteur à gaz naturel FPT C13

moteur Diesel dont les soupapes profitent des propriétés lubrifiantes du carburant. Cela mène dans la pratique à une utilisation de matériaux différents en fonction du carburant utilisé.

- En raison de son principe de fonctionnement induit par son cycle thermodynamique, le moteur Diesel ne requiert et ne dispose donc pas de système d'allumage (communément présent sous la forme d'une bougie et d'une bobine dans un moteur à essence). Ceci n'est pas le cas pour le moteur à gaz, qui est dit à « allumage commandé » (comme le moteur à essence) et dispose donc d'un système d'allumage. La combustion d'hydrogène nécessite également un tel système qui pourra donc en grande partie être repris du moteur à gaz.
- Le système d'injection est différent sur les deux moteurs : injection directe pour le Diesel et indirecte pour le gaz. Dans un premier temps, le moteur à hydrogène sera développé avec un système d'injection indirecte, ce qui sera très proche de la configuration actuelle du moteur à gaz.

Ce moteur Euro 6, conçu tant pour des applications routières que non-routières, est un excellent candidat pour une conversion à l'hydrogène. Il permettra d'atteindre un niveau de performances équivalent à celui que l'on trouve actuellement sur les véhicules Diesel de la flotte des TPF en restant à des niveaux de PME (voir équation 1 dans l'annexe H.3) relativement faibles (de l'ordre de 16 bars). Le but est de disposer d'un moteur fiable fonctionnant à l'hydrogène le plus rapidement possible afin de démarrer les essais en conditions réelles (c'est-à-dire sur des lignes existantes du réseau exploité par les TPF). Ensuite seulement, des technologies plus avancées mais également plus complexes à réaliser et gérer, telles l'injection directe ou encore la préchambre pourront être investiguées et implémentées.

En partant du moteur de base pour lequel on dispose de données d'essai, et en considérant des valeurs de rendement thermique du moteur qui pourront être atteintes, une première cartographie prévisionnelle du moteur à hydrogène (tant au niveau des performances que de la consommation) a pu être construite (Figure 4) à partir de celle, existante, du moteur Diesel actuellement produit par FPT. C'est grâce à cette cartographie H2 que des premières simulations (voir l'annexe H.3 pour de plus amples détails sur la méthode de simulation) ont pu être effectuées sur les trajets de référence (voir 3.2) afin de dimensionner

les réservoirs de carburant. Ces simulations ont également servi à construire le calcul du TCO du véhicule afin de comparer cette technologie avec ses concurrentes non seulement sur le plan technique mais également sur le plan économique. Il a été décidé de favoriser une approche conservatrice pour générer cette première cartographie. Un rendement maximum de 40% a été imposé aux points de rendement maximum et le reste de la cartographie a été dégradée en conséquence.

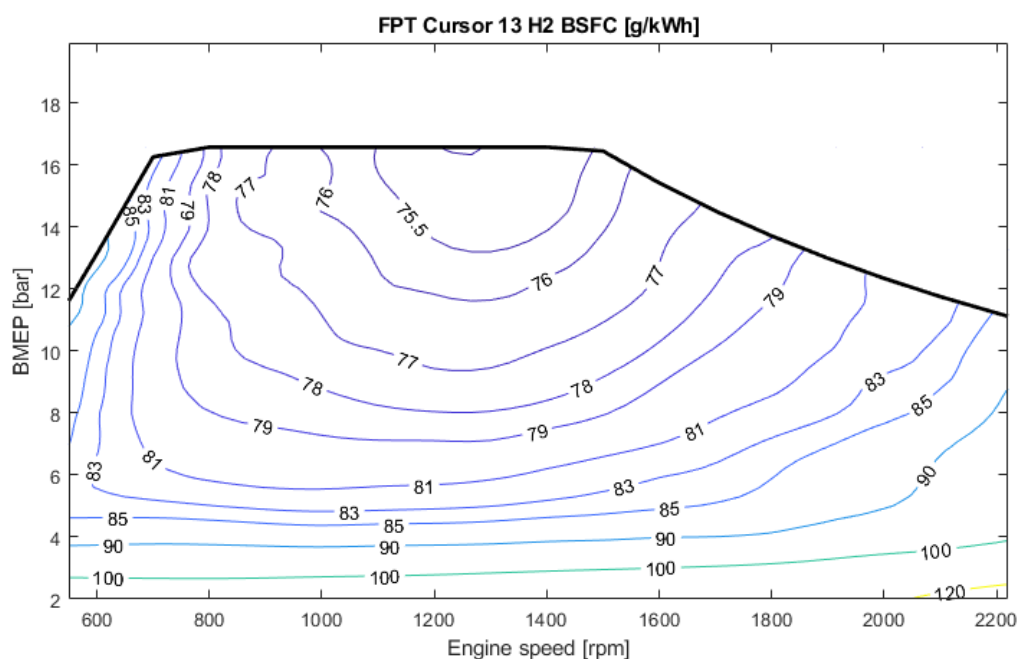


Figure 4 : Cartographie prévisionnelle FPT C13 H2 (consommation spécifique)

3.4 Respect des normes antipollution et post-traitement des gaz d'échappement

Les émissions d'un moteur à combustion à hydrogène sont bien moins nombreuses que celles d'un moteur à carburant fossile. En effet, le moteur à hydrogène n'émet que de la vapeur d'eau et une quantité plus ou moins grande de NOx – valeur dépendant de bon nombre de paramètres, entre autres les températures atteintes lors de la combustion. L'objectif est d'atteindre la limite d'émissions imposée par la norme Euro 6 [13] sans qu'un post-traitement des gaz d'échappement ne soit nécessaire. Il se pourrait néanmoins qu'il soit nécessaire d'en implémenter un pour atteindre les exigences d'émissions de la future norme Euro 7. Cette norme n'ayant pas encore été publiée (deux scénarios ont été mis en consultation et la norme définitive est prévue pour être adoptée par la commission européenne au cours du premier trimestre 2022 [14]).

Dans le cas d'un moteur fonctionnant avec une combustion « lean-burn » (mélange très pauvre), il faudra opter pour un système SCR ou NOx-trap si une réduction des émissions est nécessaire en sortie du moteur. Le système SCR avec injection d'AdBlue (solution d'urée) pourrait dans un premier temps être repris des moteurs Diesel et être optimisé.

Au cours du développement moteur, plusieurs autres solutions pourront être explorées si nécessaire :

- Le H2-SCR, technologie SCR remplaçant l'AdBlue par de l'hydrogène
- Un catalyseur 3-voies optimisé pour la réduction des oxydes d'azote, applicable conjointement avec le développement d'une stratégie alternative de combustion (mélange stœchiométrique et recirculation des gaz d'échappement). L'avantage de cette solution serait de disposer d'un système de post-traitement des gaz passif, ne nécessitant aucun consommable tel que l'AdBlue.

On peut tout à fait s'imaginer équiper les véhicules d'un système SCR dans un premier temps puis de remplacer celui-ci par un système passif lorsqu'il aura été mis au point. A titre indicatif, on trouvera les volumes et coûts (situation février 2022) des systèmes de post-traitement des gaz pour un moteur Diesel (DOC, SCR, ASC, CSF) et CNG Euro 6 ainsi que celui, estimé, pour le moteur à hydrogène (version de base SCR issu du moteur Diesel) dans le Tableau 3. Cette analyse des volumes requis permet de conclure que l'intégration d'un éventuel système de post-traitement en cas de besoin serait facilement réalisable grâce à la compacité du système.

	Diesel Euro 6	CNG Euro 6	H2ICE
Volume [litres]	406	109	108
Coût d'achat [kEUR]	3.5	7.7	
Coût de vente au client final [kCHF]	9.4	16.1	4.7

Tableau 3 : Comparaison des coûts (situation février 2022) et volumes des systèmes de post-traitement des gaz d'échappement pour plusieurs moteurs à combustion.

3.5 Stockage de l'hydrogène

Plusieurs méthodes de stockage de l'hydrogène existent. Parmi les plus courantes, on citera les stockages sous forme gazeuse ou liquide et le stockage dans des hydrures métalliques. Bien que très intéressante en raison du stockage à basse pression, cette dernière solution a le désavantage d'être beaucoup plus lourde que les deux autres, dû au fait que le réservoir est rempli d'hydrures métalliques sous forme de poudre (le ratio masse d'H₂/masse du système de stockage est inférieur à 2% pour les modèles commercialisés qui seraient utilisables sur un véhicule [15], [16]). Le stockage liquide de l'hydrogène, nécessite en contrepartie d'être refroidi en dessous de -253 °C et requiert des précautions très peu pratiques lors de sa manipulation et du remplissage des réservoirs. De plus, le refroidissement à des températures aussi basses est très énergivore (on parle de pertes énergétiques pouvant dépasser les 35% [17]).

Pour les raisons évoquées ci-dessus, le stockage gazeux a été choisi pour l'application bus. Il est important de préciser que ce choix n'est pas « exotique ». En effet, les véhicules propulsés à l'hydrogène actuellement disponibles sur le marché sont en très forte majorité équipés de ce type de stockage (Hyundai XCIENT Fuel Cell, Toyota Mirai, etc.). Le choix du type de cylindre [18] est primordial d'un point de vue de la masse totale du stockage, vu que cette dernière est dépendante de la masse à vide des réservoirs. En effet, des réservoirs métalliques (Type I, 1.26 kg/l) [19] seraient beaucoup plus lourds que des réservoirs composites de dernière génération (Type IV, 0.54 kg/l). Le stockage gazeux s'effectue principalement à deux pressions différentes : 350 et 700 bars, les réservoirs à 700 bars étant généralement privilégiés pour des véhicules plus compacts tels des voitures. Bien que pour un volume interne donné, le réservoir à 350 bars contienne environ 40.5% en masse de moins que le réservoir à 700 bars à 20°C (densités calculées avec le code CoolProp [20]), le choix d'un stockage à 350 bars pour un bus comporte plusieurs avantages :

- Les réservoirs 350 bars ont l'avantage d'être déjà homologués pour la route sur des modèles à forte contenance (exemple : les réservoirs de 350 bars équipant la flotte de camions à hydrogène Hyundai XCIENT Fuel Cell à 4.5 kg/réservoir)
- La compression à 350 bars engendre moins de pertes que pour 700 bars (environ 8.7% au lieu de 11.2% du PCI avec une compression multi-étage [17])

Le réservoir de Type IV étant actuellement l'état de l'art, c'est logiquement cette technologie qui a été retenue. Néanmoins, plusieurs entreprises et start-ups travaillent activement sur la génération suivante de réservoirs, officieusement dénommée « Type V ». En effet, bien que performants, les réservoirs Type IV ont encore un fort potentiel d'amélioration, tant sur le ratio masse du réservoir/masse d'hydrogène que sur la recyclabilité du produit (PFRC à matrice époxyde). La matrice de ce nouveau type de réservoirs sera un thermoplastique, ce qui permettra de séparer le polymère des fibres et de les recycler individuellement en fin de vie.

4 Résultats

4.1 Réalisabilité du véhicule

L'intégration d'une motorisation à l'hydrogène dans un bus ne nécessite pas de révolutionner le concept du véhicule. En effet, l'architecture requise est très proche d'un véhicule Diesel et encore plus de celle d'un bus à gaz naturel comprimé (CNG). Ces derniers disposent également d'un stockage de carburant dans des réservoirs sous pression disposés sur la toiture du véhicule. HESS s'est basé sur un véhicule existant, le SwissDiesel4, afin d'effectuer l'étude d'intégration du moteur et du système de stockage. Le véhicule de base est équipé du même moteur OM470 que les Mercedes Citaro en exploitation chez les TPF qui ont été utilisés pour faire les mesures. Le moteur à hydrogène FPT C13 est un peu plus imposant que le moteur Mercedes (+8% en longueur et +29% en masse avec une largeur et hauteur quasi-identiques) et ne peut donc pas faire l'objet d'un « échange standard ». Il faudra procéder à un certain nombre de modifications au niveau du châssis et de la cellule passagers afin pouvoir notamment absorber l'augmentation de longueur. Néanmoins, le reste de la chaîne de transmission, à savoir la boîte à vitesses et l'essieu (tous deux de chez ZF) peuvent être repris. On définira l'effort d'ingénierie pour la modification du véhicule sous le chapitre 0.

Le système de carrosserie modulaire breveté et utilisé par HESS sur tous ses bus peut accepter une charge conséquente sur son toit, en témoigne la masse des composants du trolleybus électrique Swiss-Trolley/LighTram dont la batterie seule pèse déjà 1.2 tonnes [21]. Les diverses solutions de stockage envisagées pesant toutes entre 954 et 1580 kg, il n'y a pas de limitation du côté structurel (information validée par HESS).

4.2 Stockage de l'hydrogène

Ainsi que décrit sous le point 4.1, la masse totale du dispositif de stockage n'est structurellement pas un facteur limitant. Néanmoins, la place disponible en toiture peut être limitante en raison des composants déjà présents (deux modules de climatisation, un pour chaque moitié du véhicule) si l'on doit opter pour une des variantes avec le plus de réservoirs. Il a donc été demandé au potentiel partenaire stockage d'analyser la faisabilité d'un système de stockage fractionné entre l'avant et l'arrière avec une conduite basse pression flexible pour la partie se trouvant sur la moitié avant du véhicule. Un fournisseur est prêt à fournir des flexibles répondant aux exigences de l'environnement (écarts de température) ainsi qu'aux cycles de flexion que subira le flexible en raison de l'articulation du véhicule et répondant aux exigences du règlement UE 406/2010 relatif aux moteurs à hydrogène [22], cette solution est donc techniquement réalisable.

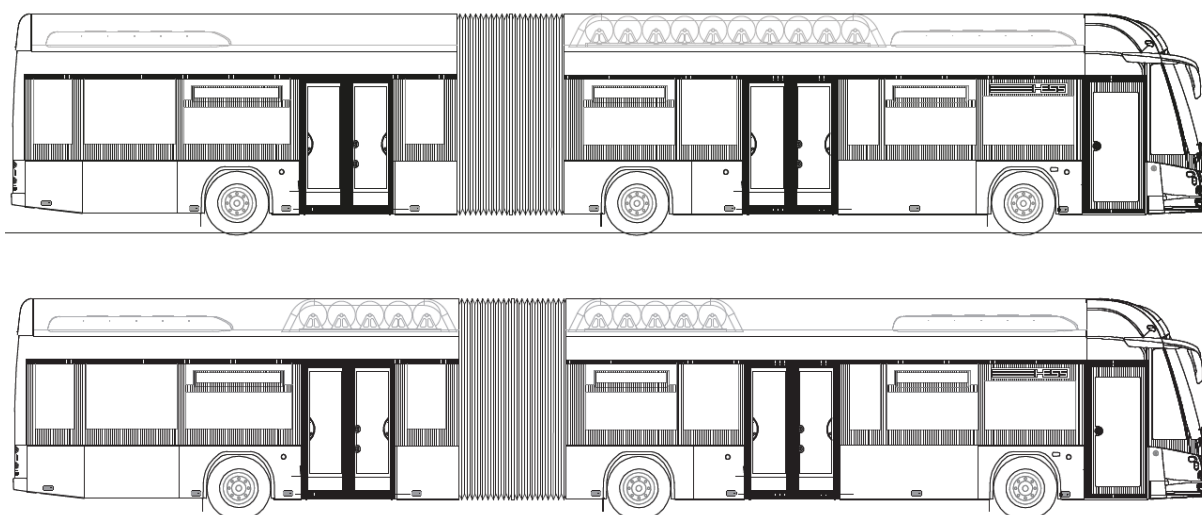


Figure 5 : Exemple de deux configurations de stockage d'hydrogène possibles sur le bus HESS (en haut un stockage en une seule partie exclusivement sur l'avant du véhicule et en bas un stockage fractionné entre l'avant et l'arrière du véhicule)

En plus de permettre l'installation d'un plus grand nombre de réservoirs, cette solution à l'avantage de permettre une plus grande flexibilité dans la répartition de la masse du stockage d'hydrogène entre les essieux.

Le partenaire de stockage identifié a proposé trois quantités « cibles » d'hydrogène (50, 60 et 70 kg) à chaque fois en 350 et 700 bars. Cela permet de se représenter la place nécessaire et la masse à considérer en fonction de la consommation moyenne des véhicules. On s'aperçoit que les consommations issues des simulations (voir 4.4) permettent, dans le cas d'un bus régional, de remplir l'objectif d'autonomie de 330 km avec une réserve de carburant de l'ordre de 50 kg. Pour la même autonomie, un bus urbain nécessiterait d'embarquer 60 à 70 kg de carburant en fonction du niveau d'optimisation du moteur (voire plus avec une motorisation non optimisée et sans hybridation), ce qui peut devenir limitant d'un point de vue de l'encombrement et de la charge si l'on tient à rester sur un système à 350 bars. A moins d'apporter des modifications significatives à l'équipement en toiture (principalement les unités de climatisation), 70 kg serait à priori la limite au niveau de l'encombrement. Le problème lié à la charge ne se trouve pas tant du côté de la charge maximale admissible en toiture mais plutôt du côté de la réduction de la capacité passagers (la charge maximale par essieu étant fixe, toute augmentation du poids du véhicule se fait au détriment du nombre maximal de passagers).

4.3 Potentiel de l'hybridation

Grâce aux mesures précises effectuées sur les divers trajets, il a pu être possible d'évaluer la diminution de consommation qui pourrait être atteinte en introduisant une hybridation légère du véhicule. Par hybridation légère, on entend l'utilisation d'un alerno-démarrateur ou « système start-stop », qui se chargera de couper le moteur dès que le véhicule est à l'arrêt et de le redémarrer au moment où le chauffeur désire repartir. Ces systèmes sont relativement compacts et légers et permettent, selon certains constructeurs comme Mercedes-Benz, une économie de carburant allant jusqu'à 8.5% [23]. En retranchant la consommation du véhicule lorsque celui-ci est à l'arrêt, on peut se faire une bonne idée du potentiel d'économies. Pour les lignes urbaines, la diminution de consommation pourrait représenter de 5.0 à 9.6% et de 2.0 à 2.4% pour les lignes régionales. Ces valeurs corroborent donc bien le potentiel d'économies vanté par les constructeurs. Elles confirment également l'intérêt de prévoir un tel système dès le début sur le H2BICE, tout particulièrement si l'on considère une version urbaine. L'impact massif d'un tel système est très faible (celui de MAN est annoncé à 170 kg et celui de Mercedes-Benz à 156 kg pour l'intégralité des composants), ce qui facilite son intégration dans le véhicule.

Une architecture « full-hybrid » ou « hybride-parallèle » est également une solution à considérer, néanmoins elle est plus complexe d'un point de vue technique mais aussi du point de vue de l'intégration. En effet, la masse des composants nécessaires à l'hybridation est plutôt de l'ordre de la tonne (masse additionnelle du Mercedes-Benz Citaro Hybrid 18m de 2010 qui reposait une chaîne de transmission Diesel-électrique avec des moteurs intégrés dans les moyeux de roues). Cette prise de poids pourra certes en partie être compensée par un downsizing du moteur thermique et une réduction de la taille du stockage d'hydrogène, mais il y aura à priori une surcharge d'au moins 400-500 kg, en fonction du nombre de réservoirs qui pourront être supprimés par rapport à la version non-hybride. En se basant sur les données de sociétés de transports publics ayant exploité des bus Diesel hybrides avec le moteur électrique monté entre le moteur et la boîte à vitesses (Volvo 7900 Hybrid pour les VBL à Lucerne [24] et Postauto à Frauenfeld [25]), on peut tabler sur une économie de carburant de l'ordre de 20-30% en optant pour une chaîne cinématique de ce type. L'économie de carburant pour la chaîne cinématique Diesel-électrique de hybrides Mercedes-Benz exploités entre autres par les SSB était aussi du même ordre de grandeur [26].

Il faut encore préciser que du point de vue du confort passagers, la technologie « Diesel-électrique » (sans aucune liaison mécanique entre le moteur et les essieux, à l'instar des trolleybus équipés d'un range-extend Diesel) a été qualifiée de moins agréable. En effet, le moteur étant relié à une génératrice, le point de fonctionnement choisi se trouve dans la zone de rendement maximal, point qui implique généralement un régime moteur assez soutenu. Pour cette raison, le niveau sonore, constant pendant les périodes de recharge de la batterie peut s'avérer désagréable pour les passagers [27]. C'est néanmoins également le cas pour les véhicules hybride-parallèle (dans une moindre mesure) en raison de leurs moteurs thermiques de taille inférieure aux bus Diesel conventionnels.

4.4 Prévisions de consommation

Pour des raisons de complexité du système, il a été décidé de considérer le développement initialement pour un véhicule qui aurait tout au plus une hybridation légère. Cela permettra entre autres d'aboutir le plus rapidement possible à un prototype fonctionnel et exploitable sur des lignes réelles et ainsi de commencer à éprouver la technologie le plus rapidement possible.

A l'aide de la cartographie moteur prévisionnelle (qui pour rappel aura les mêmes couple et puissance maximaux que le moteur actuel) présentée au chapitre 3.3, les points de fonctionnement relevés tout au long des parcours sur les diverses lignes avec les bus actuels ont pu être exploités. Une fonction

d'interpolation bidimensionnelle a été utilisée afin d'obtenir une consommation spécifique pour chaque point à partir de la cartographie contenant un nombre de points fini. Le détail de la méthodologie de simulation peut être consulté dans l'annexe H.3.

En considérant une approche conservatrice et sans aucune hybridation (même légère), les consommations moyennes attendues sont les suivantes :

- Sur des lignes régionales ou « extra-urbaines », une consommation de l'ordre de 14.9 à 15.7 kg/100 km
- Sur les lignes urbaines, une consommation de l'ordre de 24 kg/100 km

En maintenant cette approche conservatrice mais en ajoutant le potentiel de réduction de consommation lié à une hybridation légère, on peut s'attendre aux consommations suivantes :

- 14.5 à 15.3 kg/100 km pour les lignes régionales
- 22 kg/100 km pour les lignes urbaines

Si l'on prend en compte les rendements plus élevés qui sont attendus pour un moteur qui aura été optimisé et qui sera doté de certaines améliorations technologiques comme l'injection directe, les consommations attendues pourraient baisser jusqu'aux valeurs suivantes :

- 12.4 à 13.0 kg/100 km pour les lignes régionales
- 18.7 kg/100 km pour les lignes urbaines

Selon des premières estimations, la consommation sur les lignes urbaines pourrait être réduite à environ 17 kg/100 km en appliquant une chaîne de transmission « full hybrid » sur le véhicule. Cela implique un downsizing du moteur thermique et l'ajout d'un moteur électrique ainsi qu'un pack de batteries.

4.5 Analyse sécuritaire

Le centre de compétences ROSAS, lié à la HEIA-FR, a effectué une analyse sécuritaire portant tant sur le véhicule que sur l'infrastructure nécessaire à l'exploitation du véhicule. Le bus a été décomposé en différents sous-systèmes et tous les cas d'utilisation et de potentielles défaillances ont été analysés en vue d'une future homologation.

Diverses instances stratégiques pour l'autorisation de circuler sur les routes Suisses ont été contactées. Que ce soit l'Office Fédéral des Routes (OFROU) ou le Dynamic Test Center (DTC) chargés respectivement de délivrer l'autorisation de circuler et de faire les tests permettant d'obtenir l'homologation, le projet a été mené en considérant les prérequis qui seront nécessaires pour permettre au prototype de circuler en service réel le plus rapidement possible. Le processus et la méthodologie pour concevoir et construire un véhicule sûr ainsi que pour en garantir un fonctionnement sûr ont été définis.

4.5.1 Vue d'ensemble

Cette analyse fait partie de l'étude de faisabilité pour un bus à hydrogène, et se concentre sur la définition d'un concept de sécurité fonctionnelle pour le moteur et le système lié à l'hydrogène dans le bus. La norme ISO 26262 est la référence pour cette étude. Pour réaliser cette étude, une petite partie du cycle en V de la norme ISO 26262 a été appliquée. Plus précisément, la partie prise en compte est la partie 3 nommée "Concept phase", comme le montre l'image ci-dessous, qui montre le champ d'application complet de la norme ISO 26262.

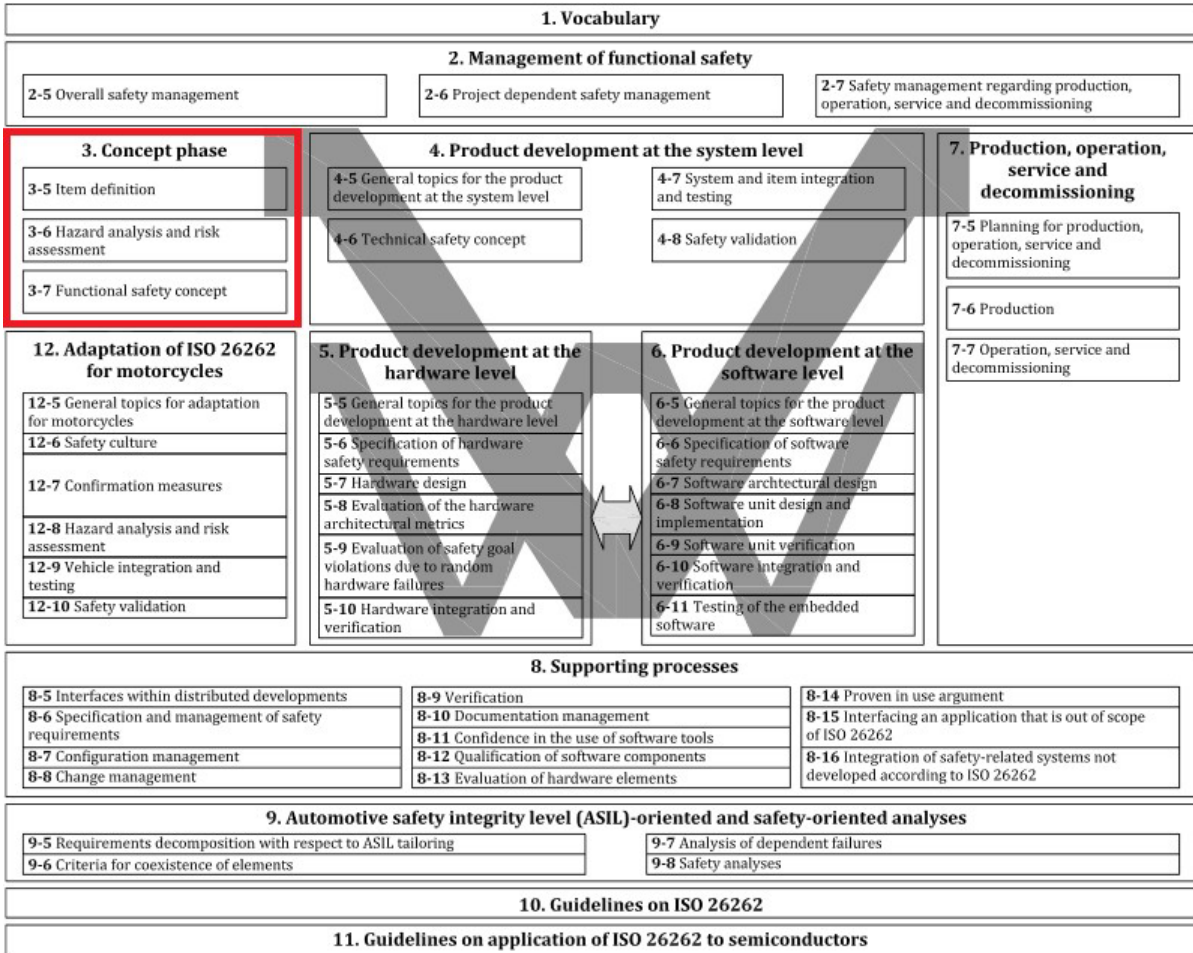


Figure 6 : Cycle en V de la norme ISO 26262

4.5.2 Moteur

Le moteur est un moteur CNG qui sera converti de manière à pouvoir fonctionner à l'hydrogène. L'image ci-dessous montre un schéma du moteur.

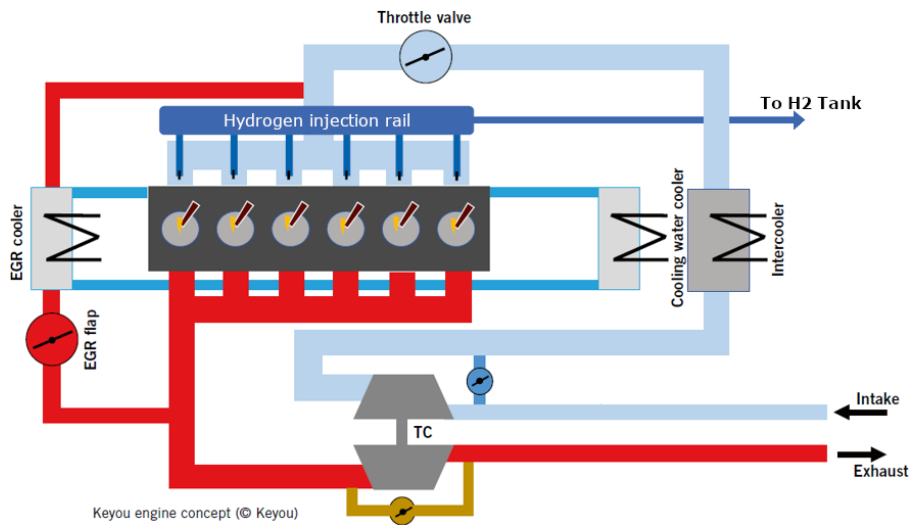


Figure 7 : Représentation schématique d'un moteur à hydrogène (source : Keyou)

À partir du schéma ci-dessus, le schéma fonctionnel du moteur, illustré ci-dessous, a été créé pour faciliter les tâches liées à la sécurité qui ont été effectuées au cours de ce projet. Au cours de ce projet, l'abréviation "ICE", a été choisie pour désigner le moteur.

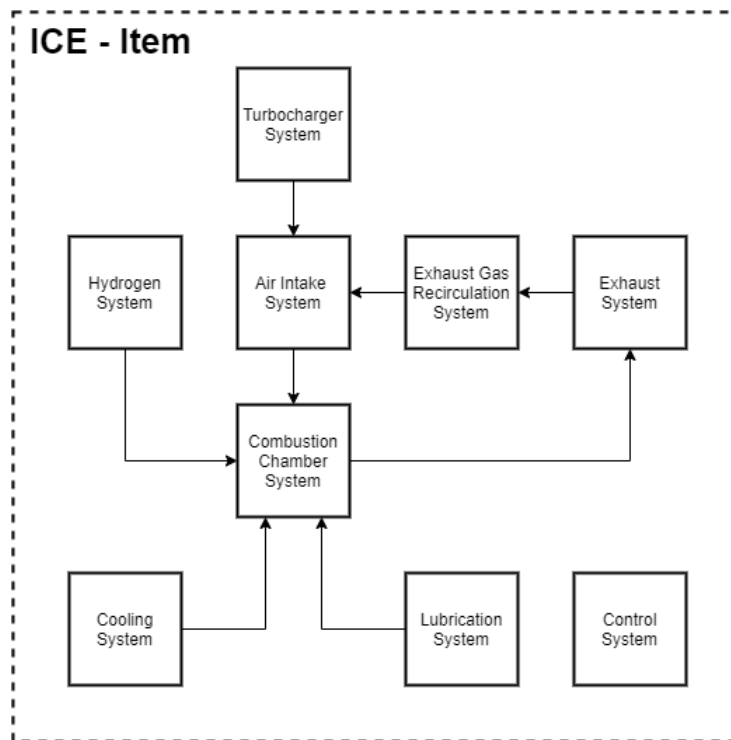


Figure 8 : Elément/Item "ICE"

Pour simplifier davantage la création de certains documents liés à la sécurité, différents états de l'ICE ont été identifiés et, sur la base de ces états, un diagramme a été créé, comme indiqué ci-dessous. Ce même diagramme montre également les transitions possibles entre ces différents états.

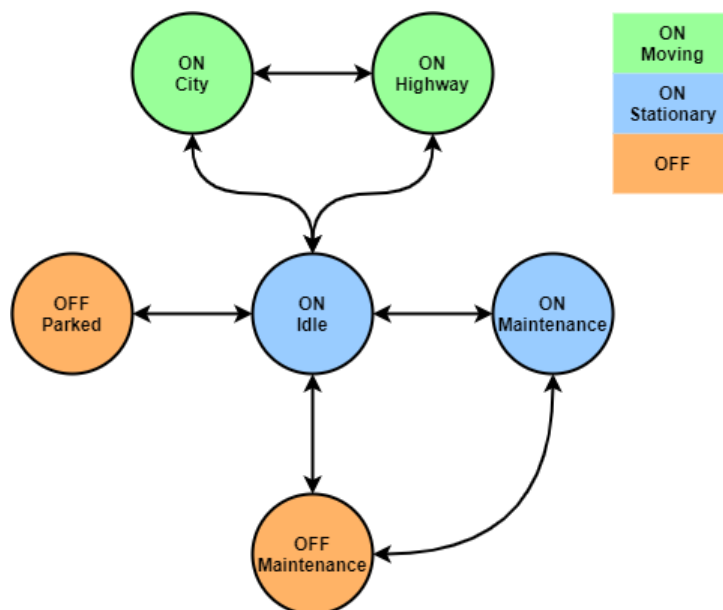


Figure 9 : Diagramme d'état de l'élément ICE

4.5.3 Système hydrogène

Comme pour le moteur à combustion interne, un schéma fonctionnel pour le système hydrogène a été créé. Comme on peut le voir, le système hydrogène contient le moteur à combustion interne et fait lui-même partie de l'ensemble du véhicule, qui est un bus transportant des passagers dans ce cas d'utilisation. Ceci est illustré dans les images ci-dessous.

REMARQUE : Tous les diagrammes et schémas représentant l'architecture du système hydrogène sont préliminaires et ont été créés sur la base des informations disponibles à ce moment-là. Cette architecture évoluera en fonction des caractéristiques et du design du bus.

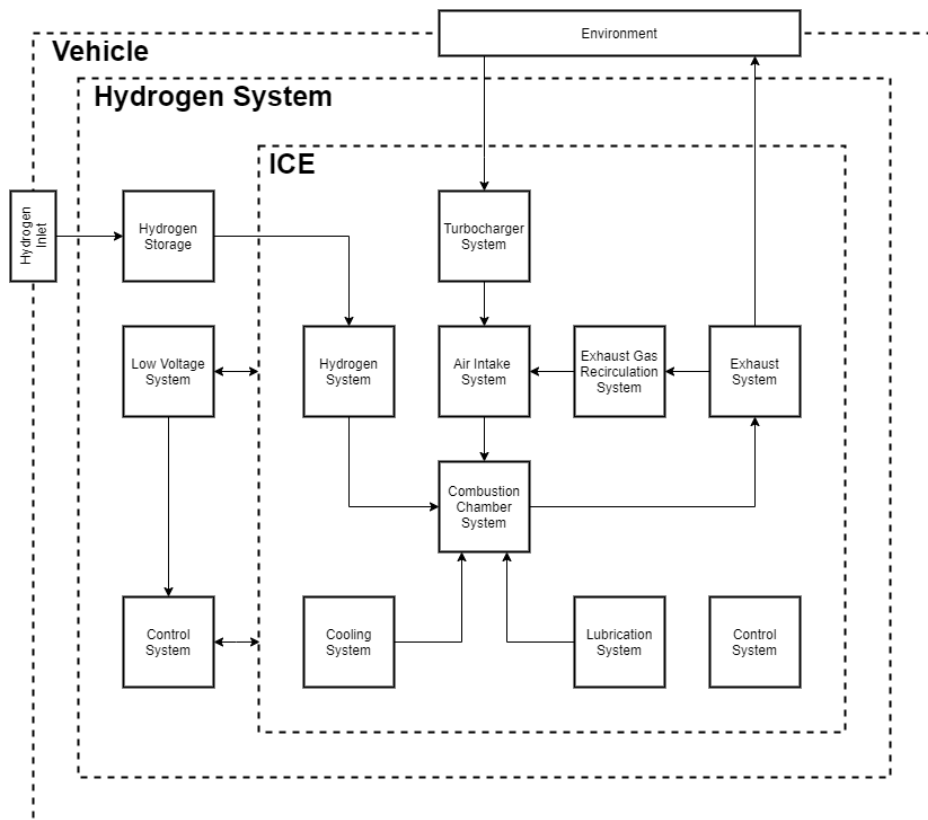


Figure 11 : Schéma fonctionnel du système

Un schéma plus détaillé a également été créé, montrant les différents composants et leurs connexions. Il est important de noter que ce schéma montre également les capteurs chargés de mesurer la pression et la concentration d'hydrogène à différents endroits.

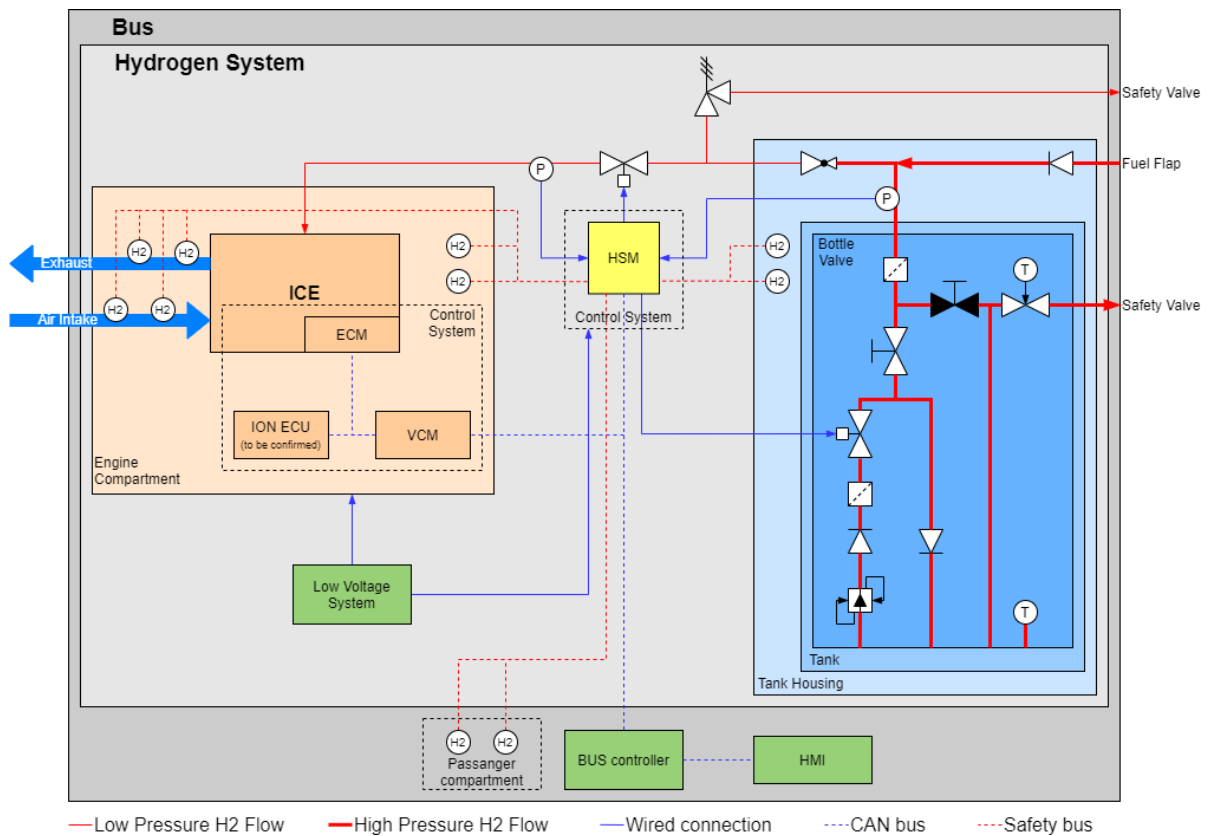


Figure 10 : Architecture système

Là encore, comme pour le moteur à combustion interne, le système hydrogène peut se trouver dans différents états au cours de son fonctionnement.

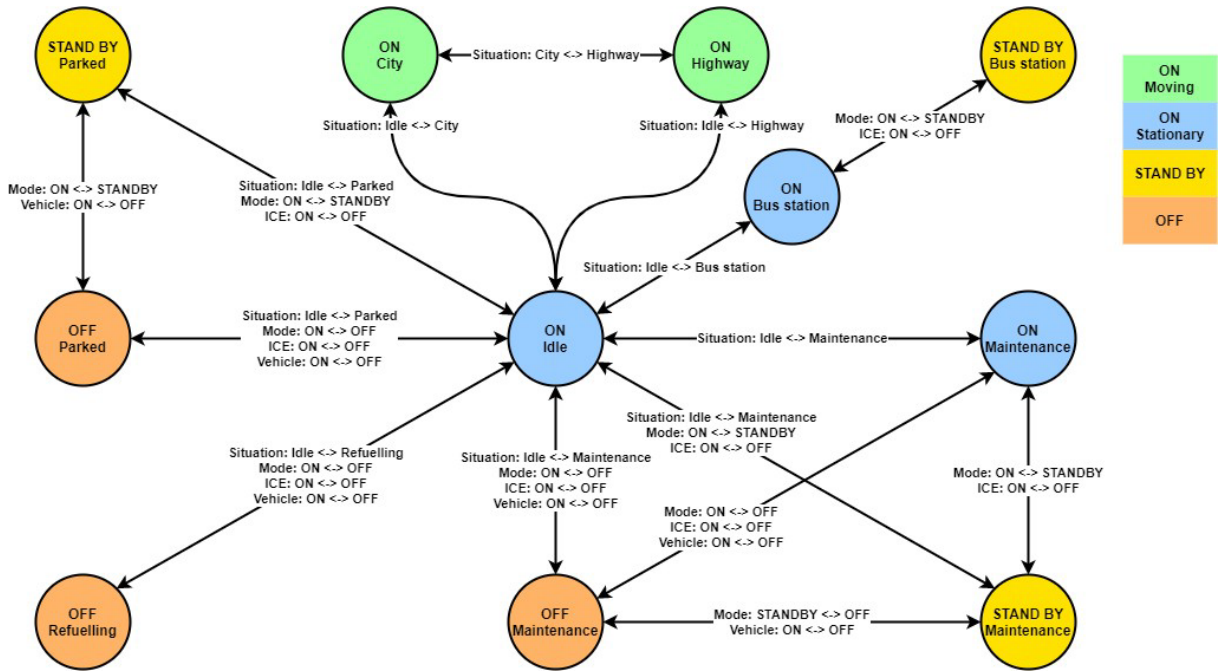


Figure 12 : Diagramme d'état du système H2

En outre, un schéma a été créé pour montrer quels éléments (ICE, système hydrogène, véhicule) sont actifs ou inactifs pendant les différents états (ON, OFF, STAND BY) du système hydrogène.

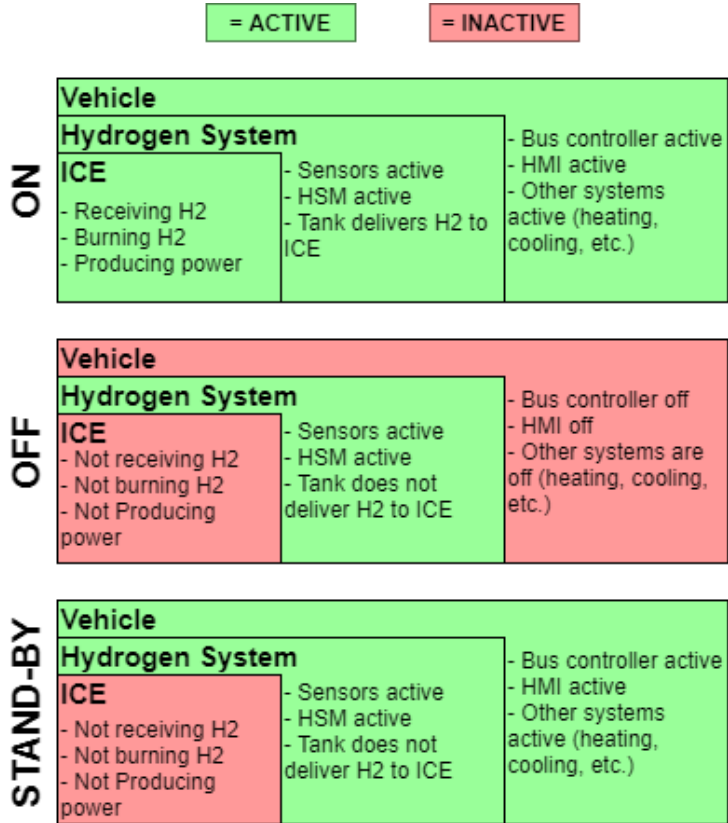


Figure 13 : Modes opératoires du système H2

4.5.4 Résultats

Les documents résultant de cette étude, qui ont été créés à la fois pour le système ICE et le système hydrogène, sont les suivants :

- Item definition

- Contient, entre autres, l'élément mentionné dans les sections Moteur et Système à hydrogène
- Les objectifs de l'Item definition sont [28] :
 - a) Définir et décrire l'élément, sa fonctionnalité, ses dépendances et son interaction avec le conducteur, l'environnement et d'autres éléments au niveau du véhicule
 - b) Favoriser une compréhension adéquate de l'élément afin que les activités des phases suivantes puissent être réalisées.
- Analyse des dangers et des risques (HARA)
 - Les objectifs de l'HARA sont les suivants [28] :
 - a) Identifier et classer les événements dangereux causés par un comportement défectueux de l'article ; et
 - b) Formuler les objectifs de sécurité avec leurs ASIL correspondantes liées à la prévention ou à l'atténuation des événements dangereux, afin d'éviter tout risque déraisonnable.
- Concept de sécurité fonctionnelle (FSC)
 - Les objectifs du FSC sont les suivants [28] :
 - a) Spécifier le comportement fonctionnel ou fonctionnel dégradé de l'article conformément à ses objectifs de sécurité ;
 - b) Spécifier les contraintes relatives à la détection et au contrôle appropriés et opportuns des défaillances pertinentes conformément à ses objectifs de sécurité ;
 - c) Spécifier les stratégies ou mesures au niveau de l'élément pour atteindre la tolérance aux pannes requise ou atténuer de manière adéquate les effets des pannes pertinentes par l'élément lui-même, par le conducteur ou par des mesures externes ;
 - d) Attribuer les exigences de sécurité fonctionnelle à la conception architecturale du système ou à des mesures externes ; et
 - e) Vérifier le concept de sécurité fonctionnelle et spécifier les critères de validation de la sécurité.

Dans le cadre de cette étude, les objectifs de sécurité (SG ; exigences de sécurité pour ramener les risques à un niveau acceptable ; résultant de l'HARA) et les états sûrs (SS ; mode de fonctionnement sûr en cas de défaillance) ont été définis. Ils sont énumérés ci-dessous avec les niveaux ASIL associés à chaque objectif de sécurité.

- ICE
 - Objectifs de sécurité
 - a) Le système doit éviter une surpression d'hydrogène dans le rail d'injection d'H2 (ASIL D).
 - b) Le système doit éviter la présence d'H2 dans l'échappement (ASIL D).
 - c) Le système doit éviter la présence d'H2 à l'extérieur du système d'injection en mode OFF (ASIL D).
 - État sûr
 - a) Le moteur est coupé ; L'entrée d'air est fermée ; L'injection d'hydrogène est arrêtée ; L'alimentation en hydrogène est arrêtée.
- Système d'hydrogène
 - Objectifs de sécurité
 - a) Le système doit éviter les surpressions d'hydrogène (ASIL D).
 - b) Le système doit éviter la surchauffe de l'hydrogène (ASIL D)
 - c) Le système doit éviter la présence d'hydrogène en dehors du circuit H2 (ASIL D).
 - d) Le système doit être protégé contre la perte de communication et la corruption de la communication avec l'élément ICE et le véhicule (ASIL A).
 - État sûr
 - a) L'élément ICE est arrêté ; La vanne d'arrêt de l'hydrogène est fermée ; Le conducteur est averti que le Système Hydrogène est en état de sécurité.

A la suite de cette analyse, on peut conclure que le véhicule est réalisable d'un point de vue technique mais également d'un point de vue sécuritaire. La stratégie globale ainsi que la méthodologie à adopter au cours de la conception du véhicule afin de garantir la sécurité des passagers ainsi que de l'environnement du véhicule ont pu être définies selon le standard ISO 26262. Le développement du véhicule pourra donc se fonder sur cette base, ce qui est conforme à la pratique habituelle dans le domaine automobile.

4.6 Homologation du véhicule

4.6.1 Analyse du DTC

Dans le cadre d'une réunion avec le DTC, il a été proposé qu'ils effectuent une pré-étude du projet en ce qui concerne la sécurité et l'homologation, ceci afin de voir si la direction suivie et le niveau de détail actuel correspondent aux exigences qu'il faudra remplir afin d'homologuer pleinement le premier prototype sur les routes du canton de Fribourg afin de le tester dans un premier temps à vide et dans un second temps en situation d'exploitation réelle et sans restrictions (contrairement à une exploitation sur une seule ligne prédéfinie et sans passagers par exemple). Cette pré-étude permet également d'évaluer l'ordre de grandeur des coûts qui seront à prévoir pour l'homologation du/des véhicules pour les cas d'utilisation respectifs :

- Véhicule prototype unique : à définir en collaboration avec l'OCN (pour le canton de Fribourg)
- Véhicule de série pour exploitation uniquement en Suisse (CH-TA) : > 27.8 kCHF
- Véhicule de série pour exploitation en Europe (WVTA) : > 35 kCHF

n.b. : Les coûts de chaque homologation sont à ajouter à ceux de la précédente dans la hiérarchie. Le détail des tests à effectuer et des normes à respecter (ainsi que des éventuels coûts relatifs) peut être trouvé dans le rapport du DTC, fourni en annexe confidentielle.

4.7 Potentiel de la solution H2BICE

Selon les dernières statistiques disponibles de l'OFS, le nombre d'autobus en circulation en Suisse au 31.12.2015 était de 5410 unités, dont environ 28% de bus articulés. Il y avait en plus de cela 6'779 autocars. Bien que la Suisse soit le marché primaire sur lequel le véhicule prototype sera testé (flotte des TPF), il y a un très fort potentiel, ne serait-ce que dans les pays limitrophes. Selon les statistiques des pays respectifs, le nombre d'autobus en circulation en Allemagne était de 74'251 au 31.12.2014 (Statistisches Bundesamt), en France de 26'545 au 01.01.2016 (Ministère de la transition écologique), 100'149 en Italie au 31.12.2019 (Associazione Nazionale Filiera Industria Automobilistica) [29] et 9'200 en Autriche au 14.11.2019 (Wirtschaftskammer Österreich).

On peut bien entendu se douter que le renouvellement de ces véhicules ne se fera ni avec un seul modèle, ni avec une seule technologie. Dans chacun de ces pays, on trouvera une proportion de lignes pour lesquelles le bus électrique à batterie, électrique avec pile à combustible ou encore le trolleybus ne sera pas adéquat mais qui pourront être assurées avec un bus avec moteur à combustion à hydrogène.

En se basant sur une statistique supplémentaire de l'OFEN ([30], p.10), on peut affiner le potentiel de bus motorisés par un moteur H2ICE en Suisse. Les véhicules sont divisés en trois sous-catégories :

- Les véhicules pour le trafic régional de voyageurs (bus régio) : 53% de la flotte nationale
- Les véhicules pour le trafic local (bus urbain) : 10% de la flotte nationale
- Les véhicules « mixtes » trafic régional de voyageurs et trafic local : 36% de la flotte nationale. On peut déduire que cette catégorie représente des véhicules typés « régionaux » utilisés à la fois sur des lignes régionales et des lignes urbaines ou encore sur des lignes sortant du périmètre de la « ville » tout en gardant une densité élevée d'arrêts comme sur n'importe quelle ligne urbaine. A noter que l'exploitation de lignes régionales avec des bus urbains n'est pas possible pour des raisons d'homologation.

A l'instar de la majorité des hypothèses faites au cours de cette étude, une approche conservatrice est de rigueur dans ce cas : même si les véhicules dits « mixtes » sont généralement de type « régio », seuls les véhicules à affectation exclusivement régionale sont considérés pour le calcul de potentiel au niveau national.

En considérant un déploiement de la technologie H2BICE sur 70% de la flotte de bus des TPF (portion « régionale » de la flotte), et la consommation actuelle annuelle de diesel de 4.8 millions de litres :

- Le potentiel de réduction de consommation de diesel est de 3.36 millions de litres (70% de 4.8 millions).
- Le potentiel de réduction des émissions de CO2 est ainsi de 8 770 tonnes par année (facteur de conversion de l'OFEV [31])

Au niveau Suisse, il est possible de faire une première projection en se servant des chiffres liés au remboursement de l'impôt sur les huiles minérales. Si l'on se fie à la réponse du conseil fédéral donnée à l'interpellation parlementaire 19.3375 [6], les remboursements annuels se situent dans la fourchette de 65 à 70 millions de francs par année pour le trafic routier (on parle bien ici des ETC). Considérant

un remboursement de 58.59 ct./litre pour 2020 [5], cela représente annuellement un volume de 111 à 119 millions de litres de carburant fossile liquide (il n'y a pas de différence dans ces chiffres entre le Diesel et l'essence, même si l'utilisation de l'essence est marginale pour ce type de véhicules) si l'on estime que tous les véhicules répondent à la norme de dépollution Euro 4, 5 ou 6 (détails : [5]). En considérant un déploiement de modes de propulsion à hydrogène qui permettraient de couvrir 50% de cette consommation en remplaçant le 53% des véhicules :

- Le potentiel annuel de réduction de consommation de Diesel est de 55 à 60 millions de litres
- Le potentiel annuel de réduction des émissions de CO2 est de l'ordre de 150 000 tonnes
- Le potentiel du marché est de plus de 2800 véhicules.

4.8 Analyse des coûts

4.8.1 TCO

Les données relatives de base qui ont été prises en considération pour le calcul du TCO est le suivant :

- Le prix du Diesel n'inclut pas le remboursement de l'impôt sur les huiles minérales pour des véhicules Euro 6, il s'agit donc du prix qui serait réellement payé par l'exploitant en 2021 s'il n'y avait pas de remboursement dudit impôt.
- Le haut de la fourchette pour le prix de l'hydrogène « situation actuelle » est très conservateur à 12.18 CHF/kg. C'est le prix qui correspond à l'option « Scénario Investissement minimum (A) » de l'analyse Tecphy mais également au prix annoncé par un fournisseur d'hydrogène externe qui pourrait alimenter les véhicules TPF dans le cas où une station de production ne serait pas immédiatement construite. Le bas de la fourchette correspond à l'option « Scénario PV maximum, deux électrolyseurs (N) » de l'analyse Tecphy, avec un prix à 9.03 CHF/kg. On table bien entendu sur une diminution de cette fourchette de prix avec le temps, notamment auprès des fournisseurs externes. Les calculs de Tecphy prennent en compte la maintenance et l'amortissement des installations de production.
- Les coûts de l'hydrogène pour la perspective à 5, 10 et 30 ans proviennent également des analyses effectuées par Tecphy. Voici un résumé des coûts utilisés (la fourchette de prix dans les tableaux suivants correspond à chaque fois à un calcul effectué respectivement avec la partie basse et la partie haute de la fourchette).

Situation actuelle	9.03 – 12.18 CHF/kg H2
Horizon 2025	6.50 – 10.00 CHF/kg H2
Horizon 2030	5.00 – 7.60 CHF/kg H2
Horizon 2050	5.00 CHF/kg H2

Tableau 4 : Résumé des coûts d'hydrogène utilisés dans les calculs de TCO

- Le prix de l'électricité est de 16 ct./kWh, ce qui correspond au prix communiqué aux TPF par Groupe E pour cette application.
- Chaque véhicule parcourt 70'000 km/année
- L'investissement pour une station de recharge d'H2 est de 2 MCHF pour 30-40 véhicules (amortis sur 20 ans dans les calculs, bien qu'un amortissement sur une période plus courte pourrait permettre d'adapter plus facilement la station de recharge aux évolutions technologiques). Néanmoins, une valeur de 5 MCHF a été considérée ici afin de pouvoir alimenter tous les véhicules et inclure des coûts accessoires (ex. le génie civil). Pour une station de recharge électrique pour bus à recharge rapide (amortis sur 10 ans), un coût de 750 kCHF (par station, une par terminus) a été considéré. Les coûts d'entretien et l'amortissement des stations de recharge/remplissage sont pris en compte dans le calcul du TCO.
- Les coûts d'acquisition des véhicules (Diesel, Electrique à recharge au dépôt, PAC) sont repris du rapport de l'OFEN pour le conseil fédéral portant sur le passage des véhicules de transports publics aux énergies propres [30].
- Le coût d'entretien au kilomètre pour les véhicules Diesel, hybride et 100% électrique sont des coûts réels communiqués par les fournisseurs et/ou exploitants de bus. Les coûts d'entretien pour les véhicules H2 ont été extrapolés du véhicule 100% électrique pour le bus PAC et du véhicule Diesel pour le bus H2ICE (détail des valeurs utilisées dans l'annexe H.5)
- Les durées d'exploitation des véhicules sont basées sur les pratiques des TPF, à savoir 10 ans pour les véhicules urbains et 12 ans pour les véhicules régionaux/extra-urbains.
- Les valeurs de consommation pour les différents modes de propulsion proviennent sont issues pour une partie de valeurs mesurées et pour l'autre de valeurs simulées ou extrapolées. Le détail peut être consulté dans l'annexe H.4

On notera que si l'on ne considère qu'une seule station de recharge d'hydrogène, la variation du TCO en fonction du nombre de véhicules (sous-entendu l'impact de l'investissement pour les stations) ne varie quasiment plus au-delà de 40 véhicules dans la flotte (inférieur à 1% d'influence entre 40 et 100 véhicules). Une exception est à noter pour les véhicules électriques, dont le nombre de stations de recharge (et donc l'investissement y relatif) varie en fonction du nombre de lignes exploitées et/ou du nombre de véhicules en exploitation.

Afin d'obtenir un chiffre réaliste correspondant à une petite flotte, le TCO a été calculé pour 80 véhicules dans le cas des véhicules régionaux et pour 77 véhicules dans le cas des véhicules urbains. Ce dernier chiffre correspond au nombre de véhicules qui seraient nécessaires si la totalité de véhicules de l'Agglo de Fribourg (trolleybus compris) à l'horizon 2030 étaient remplacés par des bus d'un même type. En raison de la dépendance du nombre de stations de recharge (pour l'option électrique) par rapport au nombre de lignes, il n'était pas possible de procéder différemment.

Enfin, les consommations retenues pour le H2BICE ont été sélectionnées de la manière suivante (l'objectif est de présenter une perspective à moyen terme et non à court terme) :

- Pour les véhicules régionaux, qui seraient les premiers à pouvoir être mis en service (c'est cette motorisation-là qui sera développée en premier), la consommation de 14 kg/100km correspond à l'objectif de rendement optimisé du moteur à hydrogène sans injection directe qui sera atteint à la fin du développement moteur (43%, détails dans l'annexe H.3) avec un alterno-démarrreur pour une hybridation légère. La consommation dite « conservative » (rendement de 40%) correspondra à la première itération du moteur et non pas de celle dont seront équipés les véhicules qui eux, bénéficieront des éléments d'optimisation du moteur et auront pour objectif d'atteindre la prévision de 14 kg/100 km en moyenne.
- Pour les véhicules urbains, il a été décidé de faire les calculs avec une version hybride, car la consommation trop élevée de la chaîne cinématique non-hybride rendait cette dernière totalement dénuée de sens. Vu que ce type de véhicule arriverait dans un second temps (en raison du temps de développement supplémentaire pour le développement d'un moteur moins puissant ainsi que la chaîne hybride), il a été considéré qu'il pourrait bénéficier des optimisations liées à l'injection directe. C'est donc le rendement optimisé de 46% qui prévaut pour cette catégorie (plus de détails dans le Tableau 18).

	Diesel (ref)	Batterie	Bus PàC	H2BICE
Prix d'achat (CHF)	500 000	935 000	1 300 000	700 000
Durée d'exploitation (années)	12	12 (véhicule) 6 (batterie)	12 (véhicule) 6 (batt.+PàC)	12
Conso. (/100 km)	43.5 l	340 kWh	12 kg	14 kg
TCO (10 ans) situation actuelle	1 820 000	3 050 000	3 130 000 – 3 450 000	2 480 000 - 2 860 000
TCO (10 ans) projection 2025	1 820 000	3 050 000	2 880 000 - 3 230 000	2 190 000 - 2 600 000
TCO (10 ans) projection 2030	1 820 000	3 050 000	2 720 000 - 2 990 000	2 010 000 - 2 320 000
TCO (10 ans) projection 2050	1 820 000	3 050 000	2 720 000	2 010 000

Tableau 5 : Comparaison des TCO, véhicules régionaux

	Diesel (ref)	Batterie	Bus PaC	H2BICE (Hybrid)
Prix d'achat (CHF)	500 000	850 000	1 300 000	800 000
Durée d'exploitation (années)	10	10 (véhicule) 6 (batterie)	10 (véhicule) 6 (batt.+PaC)	10
Conso. (/100 km)	57.4 l	250 kWh	12 kg	17 kg
TCO (10 ans) situation actuelle	1 560 000	2 100 000	2 830 000 - 3 090 000	2 580 000 - 2 950 000
TCO (10 ans) projection 2025	1 560 000	2 100 000	2 610 000 - 2 910 000	2 280 000 - 2 700 000
TCO (10 ans) projection 2030	1 560 000	2 100 000	2 490 000 - 2 710 000	2 100 000 - 2 410 000
TCO (10 ans) projection 2050	1 560 000	2 100 000	2 490 000	2 100 000

Tableau 6 : Comparaison des TCO, véhicules urbains

Pour les véhicules électriques, il faut encore considérer des éléments qui ne sont pas à proprement parler liés aux coûts du véhicule lui-même. Il s'agit entre autres (points 1 et 2 considérés dans le TCO, points 3 et 4 non considérés car difficiles à quantifier à ce stade) :

1. Le TCO du bus à batterie régional inclut un nombre de véhicules majoré (30%) afin de compenser l'autonomie insuffisante des véhicules.
2. Le TCO du bus à batterie urbain inclut un nombre de véhicules majoré (environ 7.8%) afin de compenser la « désoptimisation » de certaines lignes à forte cadence. Cette valeur est basée sur une analyse des TPF.
3. Du coût induit par les chauffeurs supplémentaires qu'il faudra afin de conduire les bus supplémentaires qui seront exploités sur la ligne (compensation de l'autonomie trop faible).
4. La présence simultanée de deux véhicules sur un même terminus pourrait nécessiter le dédoublement de l'installation de recharge.

L'impact du renouvellement des batteries, respectivement la révision complète des piles à combustible après 5-6 ans n'a pas été inclus dans ce calcul.

On notera encore une différence du prix d'achat entre un bus à batterie urbain et régional. N'ayant pu obtenir des chiffres « du marché » uniquement pour les véhicules urbains, le prix d'achat du véhicule régional a été calqué sur les chiffres d'un rapport du conseil fédéral de 2020 [30].

Un tableau récapitulatif de toutes les valeurs utilisées pour le calcul du TCO est fourni en annexe (H.6).

4.8.2 Coûts de développement du moteur

Les coûts liés au moteur seront fortement influencés par la quantité d'hydrogène nécessaire aux essais de développement de celui-ci. En effet, il n'est pas prévu d'installer une installation de production sur site, l'hydrogène sera donc acheté. Le prix de revient de l'hydrogène acheté et livré dans des palettes de 600 litres se situe actuellement entre 50 et 70 CHF/kg. Ci-après, le tableau des divers coûts liés au développement du moteur, de l'adaptation du banc d'essais aux heures personnel en passant par toutes les fournitures requises pour la conversion du moteur. Le développement complet du moteur aura selon le budget un coût de l'ordre de 1.2 MCHF.

	Montant (CHF)
Ingénierie HEIA-FR	400 323
Ingénierie FPT	245 136
Contribution HEIA-FR (amortissement installations et matériel de mesure spécifique)	128 350
Logiciel de simulation	15 000
Moteur et composants spécifiques, adaptation du banc moteur	264 330
H2 (carburant)	150 000
Coût total du projet (CHF)	1 203 139

Tableau 7 : Prévion des coûts de développement du moteur à hydrogène pour le bus

4.8.3 Coûts de développement du véhicule

Les coûts de développement du véhicule peuvent très fortement varier en fonction de l'option choisie afin de valider le concept du bus à hydrogène. Les deux possibilités sont les suivantes :

- Développement d'un nouveau véhicule (basé sur un véhicule Diesel ou CNG existant) intégrant dès le début la motorisation à hydrogène. On disposerait ainsi pour les essais d'un véhicule neuf qui a été spécifiquement développé pour la technologie H2ICE.
- Modification « retrofit » d'un bus existant et d'occasion dans lequel on remplacerait le moteur Diesel ou CNG par le moteur en cours de développement. Cette solution a l'avantage d'être la moins onéreuse des deux, dans le sens où l'investissement au niveau du véhicule pourrait être nettement inférieur au coût d'un véhicule neuf. Cette solution pourrait permettre de faire les adaptations plus facilement et d'arriver plus rapidement à un véhicule fonctionnel. Il y aurait dans tous les cas le travail de développement du véhicule neuf à faire dans un second temps mais celui-ci pourrait être plus aisé grâce aux enseignements tirés du premier prototype.

	Montant (CHF)
Ingénierie	1 450 000
Assemblage et équipement du véhicule (sauf stockage H2 et moteur)	1 000 000
Stockage H2 et moteur	200 000
Certification du véhicule (DTC)	27 800
Développement et certification du système de sécurité	200 000
Coût total du prototype (CHF)	2 877 800

Tableau 8 : Prévision des coûts de développement du bus

4.9 Production d'hydrogène (analyse Tecphy)

En préambule, il faut savoir que les deux principaux fournisseurs d'énergie du Canton de Fribourg ont des projets de production d'hydrogène vert [32], [33]. Les TPF sont en discussions avec eux pour de futurs approvisionnements d'hydrogène pour leurs véhicules.

Les TPF vont également augmenter la surface de panneaux photovoltaïques sur les toits de leur dépôt de Givisiez. Des réflexions sont en cours concernant une potentielle production d'hydrogène à moyen-long terme dont il est question dans les sous-chapitres suivants.

4.9.1 Objectifs de l'étude et donnée attendues

L'objectif stratégique des TPF est de réaliser un projet pilote de conversion de bus à moteur à combustion interne (ICE) fonctionnant à l'hydrogène au lieu du diesel. L'objectif court terme est d'équiper cinq bus, en commençant par un premier bus solo, suivi selon les résultats de quatre autres bus.

Tecphy dimensionne l'équipement optimal et fourni les indicateurs environnementaux et économiques¹ associés :

- GES : émissions de gaz à effet de serre, rapportées en kg CO_{2e} / km
- TCO : coût total de possession « converti » en CHF / kg H₂
- CAPEX : investissement initial

Le livrable complet est un rapport détaillé où sont précisées ces données, les étapes de calculs, les hypothèses et d'autres points majeurs ainsi que l'état de l'art. Ce document-ci en présente une synthèse.

4.9.2 Données d'entrée du dimensionnement

5 bus parcourant chacun annuellement en lignes extra-urbaines	70 000 km
<i>Donnée de consommation consolidée</i>	43,5 L Diesel / 100 km
	481 t CO_{2e} / an
	1,38 kg CO_{2e} / km
Besoin en hydrogène	45,4 t H₂ / an
	2,83 GWh él / an
<i>Si bus à batterie et moteur électrique</i>	0.49 à 0.79 GWh él / an
<i>GES si la production H₂ est assurée par le réseau</i>	476 t CO_{2e} / an
Installation photovoltaïque « minimale »	2,4 MWc
	1,3 ha
GES² si la production H₂ est assurée par PV	132 t CO_{2e} / an
	0,38 kg CO_{2e} / km

¹ Données issues de la revue du marché actuel et d'échanges avec les industriels de la chaîne de valeur ; complétées par les données de projets réalisés trouvées lors de l'étude bibliographique et rectifiées par les projections.

² Moreno **hourly GHG emission factors of the Swiss mix during a one-year period** ;

Base Carbone : <https://www.bilans-ges.ademe.fr/fr/basecarbone>

4.9.3 Plage des principales caractéristiques optimales de l'installation associée et impact

PV	Electrolyseur	Stock H2
2,42 à 3,81 MWc	520 à 630 kW él.	21 à 50 MWh PCI

Tableau 9 : Plage de variation des caractéristiques principales

Le Tableau 10 chiffre les variations des performances (GES, TCO et CAPEX) en fonction des valeurs du Tableau 9 (puissance PV, puissance électrolyse et Dimension du stock d'hydrogène).

Augmenter l'installation PV réduit le TCO (et donc le coût kg H₂) et le bilan carbone (et donc les émissions CO₂e / km). Le surinvestissement initial associé présente donc une rentabilité économique et environnementale d'où l'intérêt de maximiser si possible l'installation PV.

Augmenter la puissance d'électrolyse et la taille du stock d'hydrogène réduit les émissions de GES mais augmente le CAPEX et le TCO.

Un arbitrage est donc à effectuer par les décideurs du projet entre ces paramétrages et leurs influences selon les objectifs et possibilités.


Scénario	μ -a	μ -b	μ -c	μ -d	ν -a	ν -b	ν -c	ν -d
 PV	2,42 MWc				3,81 MWc			
Electrol.	520 kWé				630 kWé			
Stock H2	21 MWh PCI				50 MWh PCI			
gCO ₂ e / km	500	491	477	469	-25,7	-34,3	-45,7	-57,1
CHF / kg H ₂	6,42	6,45	6,70	6,83	6,24	6,25	6,49	6,61
CAPEX (kCHF)	4 617	4 698	4 927	5 047	6 687	6 768	6 997	7 117

Tableau 10 : Variation des performances GES, TCO et CAPEX selon les paramètres de l'installation

4.9.4 Résultats des simulations horaires

Les résultats synthétisés ci-dessus (Figure 14) sont issus des simulations horaires qui intègrent l'intermittence de la production photovoltaïque. En été la production photovoltaïque est suffisamment significative pour centrer la production d'hydrogène sur la journée. La balance moyenne avec le réseau apparaît largement excédentaire à cette période et l'excédent d'hydrogène est stocké selon la capacité de l'installation. L'excédent d'électricité est injecté dans le réseau. La production photovoltaïque hivernale reste non négligeable mais elle doit être complétée en soutirant de l'électricité au réseau. L'optimisation du dimensionnement de l'électrolyseur passe par sa capacité à gérer cette variabilité. Il est utilisé selon les simulations entre 48 et 58 % du temps en moyenne sur l'année.

1) **Résultat annuel** (1 an) Courbes : moyennes glissantes (24 h), données brutes.

2) **Journée « type »** (24 h) Sauf mention contraire, les ordonnées sont exprimées en kWh el.

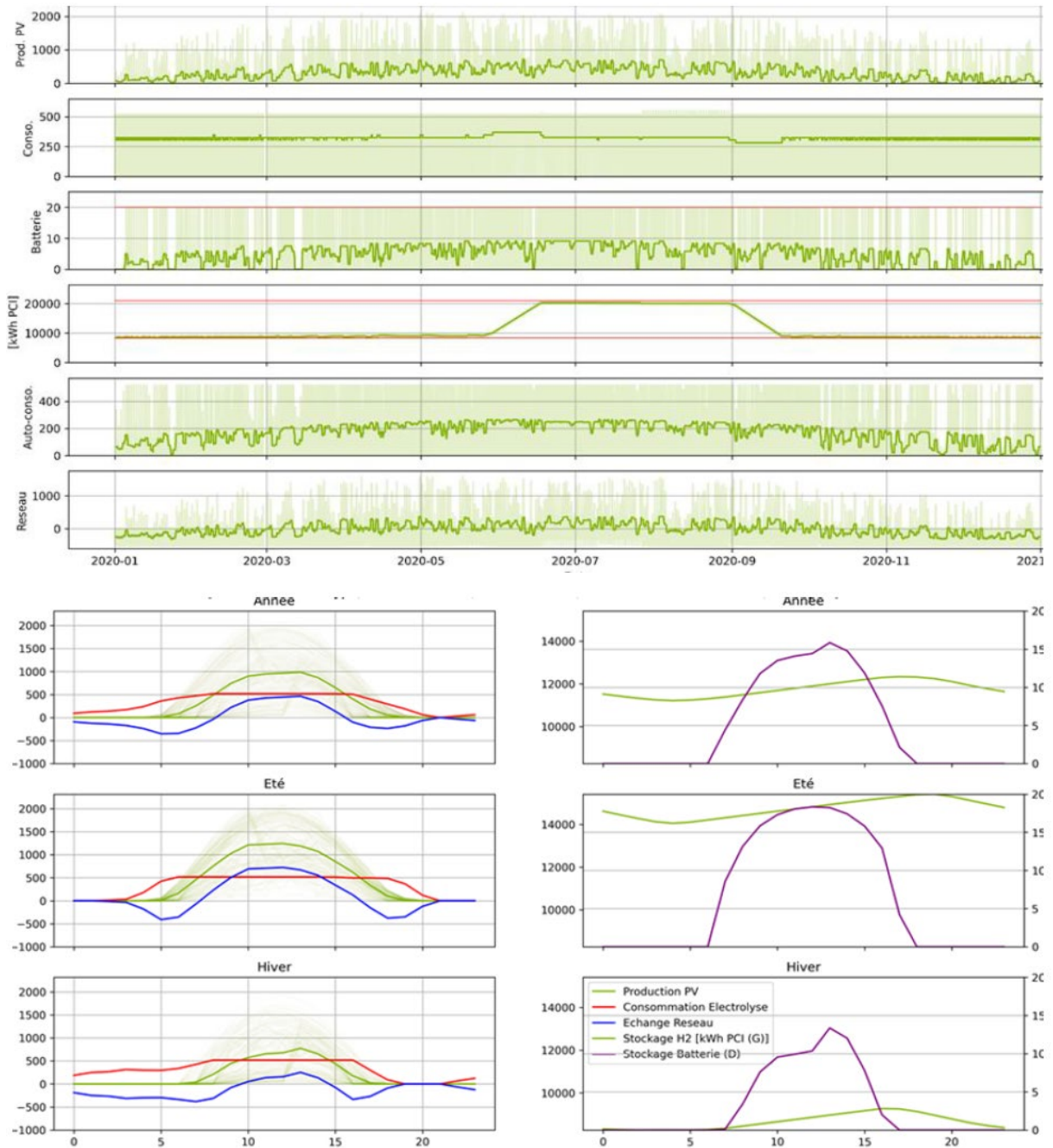


Figure 14 : Exemple de résultats annuels et journaliers pour une simulation avec les caractéristiques : 2,4 MWc PV, 1 électrolyseur 520 kW, stock 21 MWh PCI H2 et 20 kWh de batterie

4.9.5 Répartition du coût et projections

La répartition du coût souligne la prédominance de la part d’approvisionnement en énergie photovoltaïque sur la part de l’infrastructure de production, stockage et distribution d’hydrogène (Figure 15). Dans cette plage de variations le dimensionnement photovoltaïque représente le plus grand écart de CAPEX. Le tableau ci-dessous indique l’investissement estimé et utilisé dans les simulations suivant une approche macro-économique. Il prend en compte pour le système photovoltaïque : panneaux, système de montage, câblage, électronique de puissance, sécurité et raccordement réseau. L’augmentation de la puissance PV est économiquement rentable car elle permet de tirer des revenus annuels en plus de l’intérêt environnemental. Avec la vente de la chaleur produite par cogénération, elles participent à réduire le coût de ~8 à ~6,2 CHF / kg H2.

Scenarii Mu		Scenarii Nu		
2.4		3.8		MWc
3 642		5 712		kCHF de CAPEX PV
0.082		0.084		CHF / kWh PV (TCO 20 ans)

Tableau 11 : Investissement PV utilisé dans les simulations

Remarque : le TCO moyen de la production photovoltaïque ramené au kWh produit sur 20 années se situe entre 0,082 et 0,084 CHF / kWh selon les scénarii ce qui est compétitif face au prix d'achat de l'électricité de 0,16 CHF / kWh pour les TPF. Les simulations qui sont faites avec un pas horaire sur plusieurs années intègrent l'intermittence quotidienne et saisonnière de l'énergie photovoltaïque.

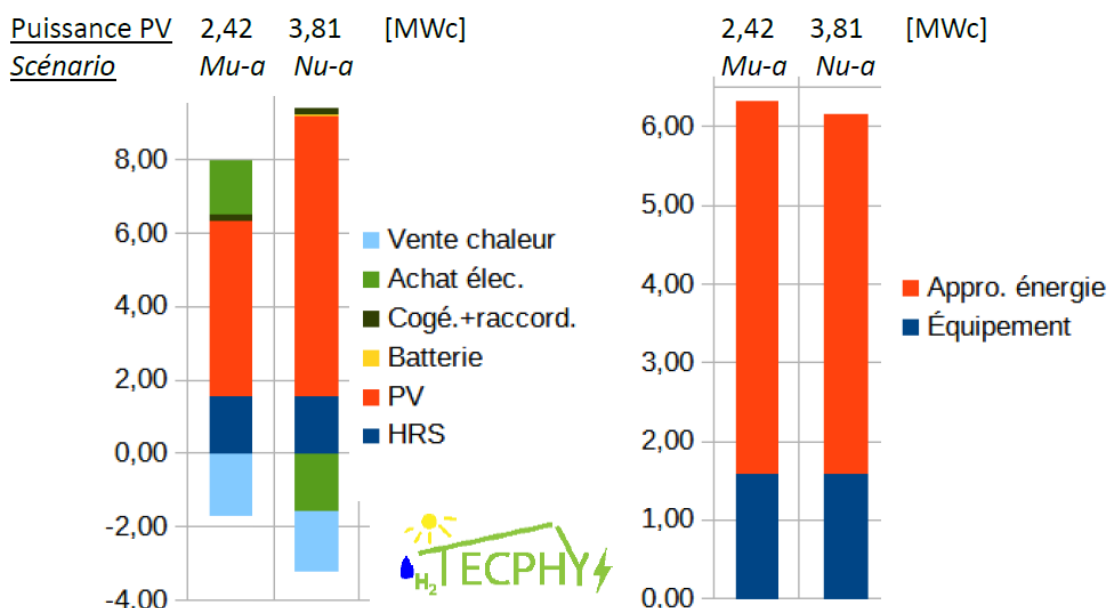


Figure 15 : Répartition détaillé et macroscopique du coût kg H2

Cette répartition du coût ainsi que la projection des paramètres économiques sur les prochaines décennies permettent d'éclairer sur les coûts futurs du projet.

La demande en énergie sera proportionnelle à l'augmentation du nombre de bus à hydrogène et le coût du PV peut bénéficier d'économie d'échelle selon les types de surfaces exploitables. Les PV et le stockage haute pression pourront progressivement être mis à l'échelle. Les compresseurs (redondance requise), le transformateur et le stockage tampon basse pression devraient être directement dimensionnés pour accueillir la flotte de 5 bus. L'électrolyseur et les systèmes liés peuvent selon les fournisseurs être mis à l'échelle ou a contrario être exploités à un taux d'utilisation réduit ce qui baisse alors l'OPEX (comme pour les compresseurs).

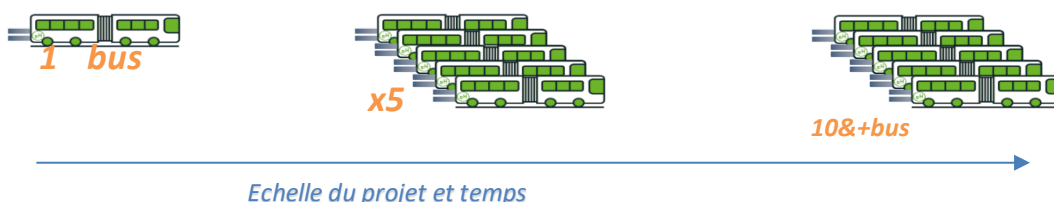


Figure 16 : Représentation de la taille de la flotte au cours du projet

De par la structure du coût, on peut conclure que le passage de 5 bus pilotes à la généralisation pour une large flotte H2 permettra par une économie d'échelle de réduire légèrement le coût kg H2. Une approche raisonnablement simplifiée autorise cependant à considérer une règle de proportionnalité

entre le nombre de bus et le TCO d'autant que l'évolution temporelle des prix et le passage d'un site pilote à une installation « rodée » est le facteur principal d'évolution économique.

4.9.6 Demande cumulée en énergie et taux de retour énergétique

Pour étudier l'efficacité de la chaîne du captage de l'énergie primaire jusqu'à son utilisation finale, l'emploi du **taux de retour énergétique** (en anglais **EROI**) est efficace. C'est une grandeur sans unité. Elle est à utiliser avec précaution car elle dépend fortement du périmètre étudié.

Note : le taux 10:1 retenu pour l'énergie solaire indique que 1 kWh d'énergie primaire investi permettra de produire 10 kWh d'électricité photovoltaïque. Cette moyenne dépend bien entendu de l'origine géographique du panneau et de son emplacement en fonctionnement.

A partir de l'EROI moyen, on calcule la demande cumulée en énergie (**CED**) rapportée à l'énergie primaire nécessaire **par km parcouru**.

	PV			Diesel
EROI moyen	6	10	12	18
η associé à la transformation en carburant	53%			
EROI du carburant du bus	3,2	5,3	6,4	18
Consommation moteur (kWh PCI / km)	4,3			
kWh énergie primaire / km	1,4	0,82	0,68	0,24
Rappel des GES (kg CO ₂ e / km)	0,38			1,38

Tableau 12 : EROI of different fuels and the implications for society, Hall et al. (2013)

*Bien que possédant un **TRE réduit** l'énergie photovoltaïque présente de réels avantages sur le bilan environnemental du fait de ses **faibles émissions de gaz à effet de serre**.*

4.9.7 Variation des coûts avec les facteurs externes

	2017	2018	2019	2021	2023	2025	2030	2040	2050	
électrolyseur		840 - 860		770			540	435	370	USD / kW él
stack				700 - 1400					200	
				400					100	
HRS	10 180	< Baisse de 10 % >			6 108					CHF/kg H2/j
				5 730 - 7 670		3 400 - 4 100				
				< Baisse 28 - 44 % voire 47 % >						
batterie				650		220				CHF / kWh
stock LH2	167			400 - 700						
stock CGH2	865 - 1 620		380 - 700	400						CHF / kg
H2 vert porté			10			6,5 - 10				CHF / kg
				< Baisse de 30 % >						
électricité				0,08						CHF / kWh
Injection				0,128						
Soutirage										

Tableau 13 : variation des paramètres économiques jusqu'en 2050

Source : variation du coût des électrolyseurs : Junginger, 2018; Louwen et al., 2018 et IRENA 2020, Documentation Tecphy et entreprises du secteur, revue industrielle.

**Données utilisées comme référence dans l'étude, au besoin converties ou projetées.*

Ces valeurs permettent d'établir un coût d'investissement et un coût de maintenance détaillés selon les caractéristiques retenues. Il s'agit d'ordres de grandeurs pour des dimensions d'équipements semblables à celles du projet. Le chiffrage du coût réel avec les partenaires du projet représente une étape clé dans la validation ou la mise à jour de ce budget. Tecphy souligne la présence possible d'une économie d'échelle mais surtout la grande variation des coûts selon les fournisseurs.

4.9.8 Motorisations alternatives au moteur à combustion interne H2 et impact sur la production PV

Des moteurs électriques peuvent équiper les bus. La chaîne d'énergie sera alors constituée notamment d'un réservoir d'hydrogène, d'une pile à combustible et d'une batterie. Dans le cas d'un bus totalement électrique, le stockage de l'énergie se fera uniquement avec une batterie conséquente en amont du moteur. Avec cette situation et pour ce projet, le besoin annuel en électricité sera de 0,49 à 0,79 GWh selon les composants et leurs caractéristiques. Le besoin annuel en électricité pour produire l'hydrogène est quant à lui de 2,83 GWh.

Ce besoin plus élevé « d'énergie primaire » pour le bus à hydrogène est à mettre en regard de l'élément suivant. L'installation photovoltaïque permet la production de l'hydrogène qui sera stocké indépendamment du bus. **La production PV requise est plus importante mais grâce au vecteur hydrogène, production et usage (recharge du bus) peuvent être largement différés grâce à un stockage tampon, ce qui est un grand avantage. A contrario, un bus électrique à batterie ne pourra pas être chargé pendant que les PV produisent de l'électricité, car cela correspond à leur période d'exploitation durant laquelle ils ne se trouvent pas au dépôt.**

4.9.9 Productions alternatives d'hydrogène bas carbone

Actuellement la grande majorité de l'hydrogène provient des combustibles fossiles et les plus gros utilisateurs sont les industries des engrais, du pétrole et de la métallurgie.³

La production d'hydrogène bas carbone représente une part minime et est actuellement principalement assurée par l'électrolyse de l'eau à partir d'électricité renouvelable.

Des **panneaux** solaires qui produisent directement de l'hydrogène (par **photolyse**) se développent (ex: KU Leuven avec Fluxys puis Toyota ; EPFL). Avec un rendement de conversion 15 % à 17 % cette solution présenterait un meilleur TRE que la chaîne PV + électrolyse.

Le **vaporeformage** et le craquage du **gaz naturel** sont également testés à de larges échelles (Monolith Materials avec OC1 et OC2 et BASF) avec CCS.

Certains organismes peuvent décomposer une molécule d'eau en hydrogène (photolyse). D'autres peuvent convertir des composés organiques en hydrogène (fermentation). La combinaison de procédés permet de traiter les déchets et constitue l'approche la plus intéressante pour augmenter la production de **bio-hydrogène** d'ici quelques années.

Les **bio-carburants** (Bio-LNG issu de la méthanisation et Biodiesel) produits par la biomasse ainsi que les **carburants de synthèse** (syn-diesel, syn-méthane) produits à partir d'énergies renouvelables sont d'autres vecteurs d'énergie. À l'exception du gaz naturel associé à une CSS, ces autres carburants ont un **faible TRE**. La combustion de ces carburants rejette des gaz à effet de serre mais le bilan entre l'amont et à la combustion (WtW) est **bas carbone**.

4.9.10 Technologies d'électrolyseurs

Les principales technologies actuelles sont l'électrolyse Alcaline, à membrane échangeuse de proton (**PEM**), à membrane échangeuse d'anion (**AEM**) et l'électrolyse à haute température (**SOEC**). Dans les sites majeurs de production on trouve principale la technologie alcaline (plus ancienne) puis PEM (plus adaptée à l'intermittence des EnR).

	<i>Alcalin</i>	<i>PEM*</i>	<i>AEM</i>	<i>SOEC</i>		
2020	Voltage efficiency (LHV)	50-68	50-68 {57%}	52-67	75-85 %	
	Lifetime (stack)	60	50-80	>5	<20	10 ³ h
	(system)		{90}			
	Cold start (to nominal load)	<50	<20 {<5}	<20	>600	minute
	Capex (stack) minim. 1 MW	270	400	NC	>2000	\$/kW el
Capex (system)		{770}			CHF/kW el	

Tableau 14 : Comparatif des technologies d'électrolyseurs

Le modèle d'électrolyseur utilisé dans les simulations horaires de cette étude est le M100 développé par Proton Onsite. Il utilise la technologie PEM. Les caractéristiques utilisées pour l'étude sont signalées par {} dans le tableau ci-dessus.

³ IFPEN 2019 et IEA 2020

4.9.11 Pureté, ICE et compresseur

La **pureté** minimale constatée en sortie des **principaux systèmes d'électrolyseurs** est de **99,90 %** mais cela varie selon les technologies. Le reste du mélange étant principalement une fraction de H₂O et de O₂. Les puretés couramment rencontrées dans le domaine de la mobilité du fait notamment des besoins de la pile à combustible vont de 99,995 vol% à 99,999 vol% ou plus. La filière de la mobilité à hydrogène semble actuellement structurée dans ce sens. Bien qu'un moteur à combustion interne puisse accepter un gaz moins pur, les **compresseurs mécaniques nécessitent d'utiliser un gaz "sec"** (99,995 vol%).

Un compresseur **thermochimique** (TRL plus bas et peu d'acteurs actuellement) permettra de compresser des mélanges de gaz (par exemple méthane + hydrogène) ou de l'hydrogène avec une pureté réduite.

Deux compresseurs sont nécessaires pour garantir la continuité du fonctionnement de l'installation durant les phases de maintenances. Il est envisageable d'utiliser un compresseur thermochimique (contact Tecphy) acceptant une qualité moindre de H₂ et un compresseur mécanique standard.

4.9.12 Glossaire

Unités

Nm³ (ou Nm³) : Normo mètre cube, unité de mesure de quantité de gaz, pour un gaz se trouvant dans les conditions normales de température et de pression (0 ou 15 ou plus rarement 20 °C selon les référentiels et 1 atm, soit 101 325 Pa).

kWc (ou kWp) : kilowatt crête de l'installation photovoltaïque (PV), unité de puissance

kW(é) (ou el) : kilowatt (électrique), unité de puissance

GWh : gigawatt-heure (= 1 000 MWh = 1 000 000 kWh), unité d'énergie

PCI (ou LHV) : Pouvoir calorifique inférieur, quantité de chaleur dégagée par la combustion complète d'une unité de combustible, la vapeur d'eau étant supposée non condensée et la chaleur de vaporisation non récupérée.

Indicateurs

GES : Gaz à effet de serre : H₂O, CO₂, CH₄, N₂O... Ils sont quantifiés par leur pouvoir réchauffant global (PRG ou GWP en anglais) et par l'équivalent en dioxyde de carbone (kg CO₂e).

TRE : Taux de retour énergétique (EROI ou EROEI en anglais). Ratio d'énergie utilisable acquise à partir d'une source donnée d'énergie, rapportée à la quantité d'énergie dépensée pour obtenir cette énergie. Dépend grandement du périmètre de l'étude.

TCO : Coût total de possession en anglais. Il représente la somme totale des coûts associés à un bien au cours du cycle de vie de ce dernier. Dépend également du périmètre de l'étude.

4.9.13 Commentaire sur l'étude Tecphy

Le chapitre 4.9 fournit la synthèse des résultats de l'étude Tecphy 2021 TPF HEIA. Tecphy se propose de présenter aux acteurs et partenaires du projet sa démarche et les conclusions.

L'ensemble des analyses, des commentaires et des sources, ainsi que les détails des calculs et du dimensionnement de l'installation pour le projet d'équipement des 5 bus se trouvent dans le rapport complet associé.

Les données d'entrée Tecphy sont issues de calculs préliminaires, d'une revue du marché actuel via nos relations avec le secteur industriel, ainsi que d'une étude bibliographique des projets passés dans le domaine et des projections d'évolutions. Elles sont utilisées dans les calculs comme variables des scénarii envisagés pour l'installation pilote :

- Rendement électrolyse et compression
- Optimisation des dimensionnements entre les différents équipements

- CAPEX et OPEX HRS (station hydrogène), électrolyseur, stock H2, PV, batterie, cogénération
- Durée de vie électrolyseur (stack), batterie
- Variabilité et diminution de la production PV et compensation associée en soutirant au réseau
- Évolution des prix des équipements projetés dans les plans de maintenances
- Émissions de GES des équipements et des flux
- Bilan carbone horaire du mix énergétique suisse

Par ailleurs, nous poursuivrons selon les besoins du projet et les demandes des partenaires notre accompagnement dans la mise en œuvre de la stratégie énergétique.

4.10 Planning du projet

4.10.1 Développement du moteur

		Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9
	Description WP									
WP1	BUS H2ICE : analyse et développement détaillés du véhicule									
WP2	Intégration du stockage H2 et du moteur									
WP3	Adaptation de l'ECU et du VCU									
WP4	Intégration du système d'échappement									
MS1										
WP5	Intégration véhicule et construction du prototype									
MS2										
WP6	Essais et optimisation du véhicule									
WP7	Maintenance et SAV									

Tableau 15 : Planning du développement moteur

Jalons :

- MS1 : Développement du véhicule terminé et prêt pour la fabrication/le montage.
- MS2 : Véhicule approuvé pour une utilisation routière

4.10.2 Développement du véhicule et construction du prototype

		Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9
	Description WP									
WP1	Simulation moteur	■	■	■		■	■			
<i>MS1</i>			■							
WP2	Modification du moteur de base pour le fonctionnement à l'H2 et adaptation de la cellule d'essai	■	■	■	■					
WP3	Configuration de la combustion H2			■	■	■	■			
<i>MS2</i>					■					
WP4	Amélioration du processus de combustion (efficacité, émissions NOx)					■	■	■	■	
WP5	Optimisation finale, cartographie complète du moteur et caractérisation							■	■	■
<i>MS3</i>									■	
WP6	Résumé et rapport final									■
<i>MS4</i>										■

Tableau 16 : Planning du développement véhicule

Jalons :

- MS1 : Résultats des simulations disponibles
- MS2 : Enquête de base effectuée, début de l'analyse et de la corrélation avec la simulation.
- MS3 : Résultats de la spécification finale du moteur et de la disposition du post-traitement (si nécessaire) disponibles.
- MS4 : Objectifs du projet atteints et rapport final remis. Le moteur est prêt à fonctionner en conditions réelles dans le bus.

5 Discussion

A l'heure actuelle, le problème principal lorsque l'on parle de la propulsion d'un bus à l'aide d'un moteur à hydrogène est la disponibilité du système. Plusieurs constructeurs de moteurs ont récemment annoncé qu'ils développaient ou allaient développer des moteurs à combustion à hydrogène dans un futur proche. Il semble assez évident que la disponibilité sur le marché des moteurs actuellement en développement (diverses cylindrées et puissances allant a priori de 129 à 370 kW, y compris le moteur FPT dont il est question pour le projet H2BICE) sera étalée sur 2-3 années à partir de 2023/2024.

Dans le cadre de cette étude préliminaire, une approche conservatrice a été privilégiée en raison du fait que le moteur à hydrogène est un développement récent et qu'il n'est pas possible de se caler sur un système existant pour, par exemple, définir un rendement optimisé.

Selon les dernières informations provenant de l'un des principaux constructeurs de bus du marché, l'autonomie actuelle des bus 12 m 100% électriques est d'environ 200 km. Ce constructeur prévoit de parvenir à la même autonomie sur des bus de 18 m dans 5 ans, ce qui reste inférieur de plus d'un tiers à l'autonomie journalière requise par les TPF (l'autonomie actuelle des bus électriques 18m est de 150 à 180 km). La masse totale des batteries (de l'ordre de 400 kWh) n'est pas communiquée par le constructeur, mais la fourchette suivante peut être considérée : 2.4 t (basé sur une densité massique de 0.165 kWh/kg pour des batteries LFP [34]) à 6.9 t (basé sur les batteries de 1.2 t pour environ 70 kWh installées dans les trolleybus à batteries HESS [21]). Selon toute vraisemblance, le haut de la fourchette est plus plausible, vu que cette valeur provient non pas d'une valeur théorique mais bien d'un véhicule en circulation. Une utilisation de véhicules 100% électriques sur la totalité du réseau est dès lors totalement utopique, tant en raison de l'autonomie réduite que du nombre de véhicules qu'il faudrait acquérir en plus afin de compenser ladite autonomie si l'exploitant devait accepter cette tare. Dans l'état actuel, il faudrait acquérir environ un véhicule supplémentaire pour 3 véhicules Diesel à remplacer, ce qui représente une augmentation du nombre de véhicules à acquérir de plus de 30% (chiffres pour une flotte qui serait chargée exclusivement au dépôt, ce qui implique que la seule solution pour « faire le plein » est de retourner au dépôt, impossible de le faire le long du tracé qu'il parcourt) !

Plusieurs études récentes corroborent également le fait que l'application d'une stratégie « 100% électrique » en ce qui concerne les bus de transports public est irréaliste lorsqu'on parle de lignes régionales, et ce tant sur le plan technique qu'économique [30], [35].

6 Conclusions et recommandations

La pertinence de l'utilisation de chaque technologie est liée tant à un aspect technique qu'à un aspect économique. En effet, les sociétés de transports publics ne peuvent pas exploiter un véhicule qui a un coût d'exploitation exorbitant pour la seule raison qu'il est innovant ou intéressant d'un point de vue technologique ou écologique. Le but était de proposer un concept de véhicule à moteur à combustion à hydrogène qui soit concurrentiel avec les autres technologies dites « alternatives ». En effet, au vu du prix actuel des carburants fossiles (qui plus est en considérant le remboursement de l'impôt sur les huiles minérales), il semblerait qu'aucune technologie ne puisse être concurrentielle par rapport à un véhicule Diesel au niveau du TCO. La faute incombe entre autres à la nouvelle infrastructure qui devra être mise en place pour toute nouvelle source d'énergie. On relèvera que malgré sa présence dans le tableau comparatif en raison de son omniprésence aujourd'hui, le bus Diesel n'est plus à prendre en référence : l'avenir est aux solutions « zéro CO2 ».

Sur le plan technique, tant la HEIA-FR que le partenaire motoriste FPT Motorenforschung AG sont convaincus, résultats de mesures et de simulations à l'appui, que **le moteur thermique à hydrogène est une solution concurrentielle pour motoriser les bus de transports publics**. En particulier sur les lignes régionales/extra-urbaines avec une topographie aussi variée et exigeante que celle du réseau TPF, le *H2BICE* permettra de remplir les objectifs d'autonomie tout en proposant le même niveau de puissance et de couple que le moteur actuel, ce qui était un prérequis des TPF.

Une **analyse financière du TCO**, réalisée avec les **coûts (max et min) actuels et projetés de l'hydrogène jusqu'en 2050**, montrent que :

- **Le prix d'achat du bus *H2BICE* sera nettement inférieur à celui des autres alternatives**
- **Dans le cas de trajets extra-urbains, le *H2BICE* aura un TCO inférieur à celui d'un bus électrique et d'un bus à pile à combustible**
- **Dans le cas de trajets urbains, le *H2BICE* aura un TCO inférieur à celui d'un bus à pile à combustible. Après 2030, son TCO devient même inférieur à celui des bus à batterie.**

Les tableaux comparatifs ci-dessous sont repris du ch. 4.8.1. Les calculs sont réalisés avec le prix moyen de l'hydrogène (moyenne des prix min et max actuels et projetés). Le prix de l'électricité pour le bus à batterie est gardé constant.

	Coût de l'hydrogène	Batterie	Bus PàC	H2BICE
Prix d'achat (CHF)		935 000	1 300 000	700 000
TCO (10 ans) situation actuelle	<i>10.60 CHF/kg</i>	3 050 000	3 290 000	2 670 000
TCO (10 ans) projection 2025	<i>8.25 CHF/kg</i>	3 050 000	3 055 000	2 395 000
TCO (10 ans) projection 2030	<i>6.30 CHF/kg</i>	3 050 000	2 855 000	2 165 000
TCO (10 ans) projection 2050	<i>5.00 CHF/kg</i>	3 050 000	2 720 000	2 010 000

Tableau 17 : Comparaison des TCO, véhicules régionaux (la colonne des bus à batterie est barrée car l'option ne peut être réellement comparée aux autres en raison de l'autonomie insuffisante de ce type de véhicule)

	Coût de l'hydrogène	Batterie	Bus PàC	H2BICE (Hybrid)
Prix d'achat (CHF)		850 000	1 300 000	800 000
TCO (10 ans) situation actuelle	<i>10.60 CHF/kg</i>	2 100 000	2 960 000	2 765 000
TCO (10 ans) projection 2025	<i>8.25 CHF/kg</i>	2 100 000	2 760 000	2 490 000
TCO (10 ans) projection 2030	<i>6.30 CHF/kg</i>	2 100 000	2 600 000	2 255 000
TCO (10 ans) projection 2050	<i>5.00 CHF/kg</i>	2 100 000	2 490 000	2 100 000

Tableau 18 : Comparaison des TCO, véhicules urbains

En raison de la capacité insuffisante des batteries installées dans les véhicules électriques, des chargeurs rapides devront être installés aux terminus de chaque ligne exploitée par de tels véhicules. L'impact de l'installation d'un grand nombre de chargeurs rapides sur le réseau électrique n'est pour l'instant pas connu.

Il ne faut pas non plus négliger le fait que la plupart des bus à PAC nécessitent une double infrastructure pour faire le plein d'énergie, car en plus de devoir en faire le plein d'hydrogène, il faut recharger leurs batteries pendant la nuit.

On notera également qu'à ce jour, tous les véhicules électriques ou à pile à combustible déjà sur le marché ou annoncés par les grands constructeurs (Solaris, Mercedes-Benz, MAN, Volvo, etc.) sont des véhicules urbains et non articulés pour la plupart. Il y a donc de la place sur le marché pour un nouveau développement de véhicule extra-urbain (pas uniquement articulé).

Le concept *H2BICE* a non seulement du potentiel au niveau de la **conception** de nouveaux véhicules mais est également la solution qui permettrait le plus facilement de faire un « **retrofit** » de véhicules existants. En effet, le bus de transports publics étant un véhicule qui a une durée de vie et d'exploitation dépassant allègrement les 10-12 ans, ce pourrait être économiquement très intéressant pour certains exploitants de convertir leurs véhicules à l'hydrogène. Cette opération permet de conserver la quasi-totalité du véhicule et uniquement de remplacer ou convertir le moteur Diesel en moteur à Hydrogène ainsi qu'ajouter un système de stockage d'H₂ afin qu'il puisse être exploité avec le nouveau carburant.

Il est important de préciser que le moteur à hydrogène qui devrait être développé à la suite de ce projet aura un potentiel d'application qui ne se limitera pas uniquement à un bus de 18m. En effet, sa cylindrée et sa classe de puissance le rendent éligible comme motorisation pour des applications ferroviaires, routières (camions), agricoles ou même stationnaires (groupes électrogènes).

Potentiel de déploiement et préconisation

Si l'on se concentre sur le réseau des TPF, la **flotte régionale** parcourt environ **7.5 millions de kilomètres par année**, ce qui représente plus de 60% du nombre total de « kilomètres productifs » (à savoir les trajets n'incluant pas les transferts à vide entre dépôts ou les trajets de début et fin de service) parcourus par **plus de 70% de la flotte de bus**. D'autre part, on se rend compte de l'importance du parc de véhicules régionaux en regardant les chiffres des TPF : **155 sur 216 véhicules routiers** sont à l'heure actuelle en exploitation **sur des lignes extra-urbaines (état au 21.12.2021)**. Etant donné la compétitivité du concept *H2BICE* en termes de TCO sur ces dernières, **la préconisation issue de cette étude de faisabilité est le déploiement de cette technologie sur les lignes extra-urbaines. Le potentiel de déploiement en nombre de véhicules est énorme**. Par ailleurs, les aspects suivants renforcent l'intérêt de cette solution :

- Les prévisions de décroissance du prix de l'hydrogène sur les prochaines années rendront le concept *H2BICE* encore plus compétitif par rapport au 100% électrique
- Le concept *H2BICE* est basé sur une technologie éprouvée (le moteur à combustion) et complètement recyclable

A l'échelle **nationale**, on parle d'un potentiel de déploiement de **plus de 2800** véhicules typés « régio ».

Des contributions indirectes pour d'autres applications pourraient également être possibles : autobus à plancher haut (tels que ceux utilisés par CarPostal ou par des sociétés de transport privées), trains, camions, navires, applications agricoles et stationnaires. Les composants et la méthodologie nécessaires à la conversion du moteur réalisée au cours de ce projet pourraient ensuite être industrialisés pour des conversions à large échelle.

Economie de consommation de diesel et réduction des émissions de CO₂

En considérant un déploiement de la technologie *H2BICE* sur 70% de la flotte de bus des TPF, et la consommation actuelle annuelle de diesel de 4.8 millions de litres :

- **Le potentiel de réduction de consommation de diesel est de 3.36 millions de litres**
- **Le potentiel de réduction des émissions de CO₂ est ainsi de 8 770 tonnes par année**

Au niveau Suisse, il est possible de faire une **première projection**. En considérant un déploiement de modes de propulsion à hydrogène qui permettraient de couvrir 50% de la consommation nationale de bus exploités par des ETC:

- **Le potentiel annuel de réduction de consommation de Diesel est de 55 à 60 millions de litres**

- **Le potentiel annuel de réduction des émissions de CO2 est de l'ordre de 150 000 tonnes**

Les résultats de cette étude confirment l'intérêt de la solution *H2BICE* par sa compétitivité économique, et sa faisabilité technique tout en garantissant les aspects sécuritaires . Les **prochaines étapes** devraient être les suivantes :

1. Le développement du moteur H2
2. Et le développement du véhicule pour la réalisation d'un 1^{er} prototype
3. Les essais en conditions réelles de ce 1^{er} prototype
4. Le déploiement de cette technologie sur une flotte pilote avant déploiement à plus large échelle.

F. Liste des symboles et abréviations

ASC	Ammonia Slip Catalyst (Catalyseur d'élimination de fuite d'amoniac)
ASIL	Automotive Safety Integrity Level (niveau d'intégrité de la sécurité automobile)
CAN	Controller Area Network (Bus Système série selon ISO 11898)
CNG	Compressed Natural Gas (Gaz Naturel Compressé)
CSF	Catalysed Soot Filter (Filtre à suies catalysé)
DOC	Diesel Oxydation Catalyst (Catalyseur à oxydation Diesel)
DTC	Dynamic Test Center (à Vauffelin)
ETC	Entreprises de Transport Concessionnaires
FMS	Fleet Management System (Système de gestion de flotte selon SAE J1939)
FPT	Fiat Powertrain Technologies
FSC	Functionnal Safety Concept (Concept de sécurité fonctionnelle)
FSR	Functionnal Safety Requirements (Exigences de sécurité fonctionnelle)
H2ICE	Hydrogen Internal Combustion Engine (Moteur à combustion à hydrogène)
HEPIA	Haute Ecole du Paysage, d'Ingénierie et d'Architecture, Genève
ICE	Internal Combustion Engine (Moteur à combustion interne)
NG	Natural Gas (Gaz Naturel)
OCN	Office de la Circulation et de la Navigation (canton de Fribourg)
OFROU	Office Fédéral des Routes
OFS	Office Fédéral de la Statistique
OFT	Office Fédéral des Transports
PAC	Pile à combustible
PRFC	Polymère Renforcé de Fibres de Carbone
PME	Pression Moyenne Effective
SCR	Selective Catalytic Reduction (Réduction catalytique sélective)
SG	Security Goals (Objectifs de sécurité)
SS	Safe State (Etat sûr)
SSB	Stuttgarter Strassenbahnen (Transports publics de la ville de Stuttgart)
TCO	Total Cost of Ownership (Coût total de possession)
TPF	Transports Publics Fribourgeois
VBL	Verkehrsbetriebe Luzern (Transports Publics Lucernois)

G. Références

- [1] R. Boyd, « Hydrogen Fuel Quality for FCVs, current status of efforts at CGA ». juin 2010. Consulté le: 27 août 2021. [En ligne]. Disponible sur: https://static1.squarespace.com/static/5668416ddc5cb4375e2a9ef8/t/566f2c0569492e03ccfaf299/1450126341955/may10Minutes_boyd.pdf
- [2] Y. Ligen, H. Vrabel, et H. Girault, « Energy efficient hydrogen drying and purification for fuel cell vehicles | Elsevier Enhanced Reader ». 17 janvier 2020. doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.02.035.
- [3] P. Hadikhani, S. M. H. Hashemi, S. A. Schenk, et D. Psaltis, « A membrane-less electrolyzer with porous walls for high throughput and pure hydrogen production », *Sustain. Energy Fuels*, vol. 5, n° 9, p. 2419-2432, 2021, doi: 10.1039/D1SE00255D.
- [4] « Remboursement de l'impôt sur les huiles minérales aux entreprises de transport concessionnaires ». 29 juillet 2020.
- [5] « Remboursement de l'impôt sur les huiles minérales grevant les carburants utilisés par les entreprises de transport concessionnaires de la Confédération ». 1 janvier 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ezv.admin.ch/dam/ezv/fr/dokumente/abgaben/minoest-tsr/merkblatt-ktu-rueckerstattung.pdf.download.pdf/Merkblatt%20KTU%20f.pdf>
- [6] « 19.3375 | Remboursement de l'impôt sur les huiles minérales. Va-t-on dans la bonne direction | Objet | Le Parlement suisse ». <https://www.parlament.ch/fr/ratsbetrieb/suche-curia-vista/geschaeft?AffairId=20193375> (consulté le 30 août 2021).
- [7] « Rapport de gestion des CFF 2020 », p. 120, 2020.
- [8] « Electric bus Mercedes-Benz eCitaro - ready for the city of tomorrow », *Daimler*. <https://www.daimler.com/magazine/technology-innovation/ecitaro-electric-bus.html> (consulté le 24 janvier 2022).
- [9] « A Report on the Achievements and Learnings from The HyFLEET:CUTE Project 2006-2009 ». 2009. Consulté le: 23 août 2021. [En ligne]. Disponible sur: https://www.eltis.org/sites/default/files/case-studies/documents/hfc_brochure_10_12_09_4.pdf
- [10] « Final Report CHIC ». 28 février 2017. Consulté le: 23 août 2021. [En ligne]. Disponible sur: https://fuelcellbuses.eu/sites/default/files/documents/Final%20Report_CHIC_28022017_Final_Public.pdf
- [11] N. Peters et M. Bunce, « Active Pre-Chamber Ignition (for Dilute Combustion): CO2 Reduction Opportunities and Application Challenges », p. 41, août 2021.
- [12] « FMS-Standard description Version 03 ». 14 septembre 2012. Consulté le: 26 août 2021. [En ligne]. Disponible sur: http://www.fms-standard.com/Truck/download/fms_document_ver03_vers_14_09_2012.pdf
- [13] « Evolution de la législation suisse relative aux gaz d'échappement des véhicules à moteur et des machines ». 31 mars 2019. [En ligne]. Disponible sur: https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/fr/dokumente/luft/fachinfo-daten/entwicklung_der_schweizerischengesetzgebungimbereichderabgasemis.pdf.download.pdf/evolution_de_la_legislationsuisserelativeauxgazdechappementdesve.pdf
- [14] « Normes européennes en matière d'émissions des véhicules — Euro 7 pour les voitures, les camionnettes, les camions et les autobus », *Have your say*. https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12313-Normes-europeennes-en-matiere-d%E2%80%99emissions-des-vehicules-Euro-7-pour-les-voitures-les-camionnettes-les-camions-et-les-autobus_fr (consulté le 28 janvier 2022).
- [15] « Pragma industries, Metal Hybrid Tanks ». Consulté le: 23 juin 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.pragma-industries.com/brochure/MH-TANK-brochure-V2019.pdf>
- [16] J. Bellosta von Colbe *et al.*, « Application of hydrides in hydrogen storage and compression: Achievements, outlook and perspectives », *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 44, n° 15, p. 7780-7808, mars 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.01.104.
- [17] Makridis, « Hydrogen storage and compression », in *Methane and Hydrogen for Energy Storage*, Carriveau et Ting, Éd. Institution of Engineering and Technology, 2016, p. 1-28. doi: 10.1049/PBPO101E_ch1.

- [18] R. B. Gupta, A. Basile, et T. N. Veziroğlu, Éd., « Compendium of Hydrogen Energy », Woodhead Publishing, 2016, p. 3-25. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-362-1.09988-0>.
- [19] « PanGas, Hydrogène H2 gazeux comprimé ». Consulté le: 7 juillet 2021. [En ligne]. Disponible sur: https://www.pangas.ch/fr/images/pangas_ps_hydrogene-50-trailer_f_tcm557-381549.pdf
- [20] I. H. Bell, J. Wronski, S. Quoilin, et V. Lemort, « Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp », *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 53, n° 6, p. 2498-2508, févr. 2014, doi: 10.1021/ie4033999.
- [21] B. Vogel, « Ein Trolley, der auch ohne Oberleitung fährt », sept. 2018.
- [22] « Règlement (UE) no 406/2010 de la Commission du 26 avril 2010 portant application du règlement (CE) no 79/2009 du Parlement européen et du Conseil concernant la réception par type des véhicules à moteur fonctionnant à l'hydrogène », p. 107.
- [23] « Le Citaro Hybride », 2019, Consulté le: 25 août 2021. [En ligne]. Disponible sur: https://www.mercedes-benz-bus.com/content/dam/mbo/markets/common/buy/services-on-line/download-product-brochures/images/content/regular-service-buses/citaro-hybrid/citaro-hybrid-08-19/1044_MB_BR_Citaro_hybrid_2019_FR.pdf
- [24] C. Bertschi et J.-P. Römer, « Verkehrsbetriebe Luzern AG Medienmitteilung : vbl setzt den Versuchsbetrieb mit Hybridbussen fort », p. 2, févr. 2014.
- [25] « Vier Hybrid-Postautos für den Kanton Thurgau ». 12 août 2016. Consulté le: 25 août 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.postauto.ch/de/news/vier-hybrid-postautos-fuer-den-kanton-thurgau>
- [26] W. Tschakert, « Spartechnik ohne Verzicht », *BusFahrt*, juin 2009. Consulté le: 26 août 2021. [En ligne]. Disponible sur: https://busfahrt.com/images/stories/testberichte/ci-taro_g_blue_tec_1109.pdf
- [27] M. Horsky, T. Robert-Nicoud, J. Barbey Horvath, Y. Delacrétey, et L. Bossoney, « Alternabus : Etude du potentiel des systèmes de propulsion alternatifs pour bus , rapport final ». 30 juin 2019. [En ligne]. Disponible sur: https://www.bav.admin.ch/dam/bav/fr/dokumente/themen/umwelt/ener-giestrategie-projekte/schlussbericht-p113.pdf.download.pdf/P-113-AlternabusRapport-FinalV7.6_f.pdf
- [28] « ISO 26262-3:2018 Road vehicles — Functional safety — Part 3: Concept phase ». ISO, 1 décembre 2018.
- [29] « DOSSIER Trasporto passeggeri e mobilità, FOCUS sul trasporto collettivo su gomma ». Associazione Nazionale Filiera Industria Automobilistica, 30 juin 2020. Consulté le: 2 septembre 2021. [En ligne]. Disponible sur: https://www.ansa.it/documents/1598459316540_DossierTrasportoPersoneMobilita_Giugno2020_conerratacorrigge.pdf
- [30] « Encourager le passage des véhicules de transport public aux énergies propres (Rapport du Conseil fédéral en réponse au postulat 19.3000 CTT-CN du 15 janvier 2019) ». 12 mars 2021. Consulté le: 15 septembre 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.news.ad-min.ch/newsd/message/attachments/65687.pdf>
- [31] Etat de Genève ; Office Fédéral de l'Environnement, « facteurs_conversion.pdf ». Consulté le: 3 décembre 2021. [En ligne]. Disponible sur: https://www.ge.ch/statistique/tel/do-maines/08/08_03/facteurs_conversion.pdf
- [32] « Centrale de production d'hydrogène | Groupe E ». <https://www.groupe-e.ch/fr/une-etape-importante-pour-la-production-dhydrogene-vert-fribourgeois> (consulté le 28 janvier 2022).
- [33] « Gruyère Energie s'engage dans la production d'hydrogène à Bulle ». <https://www.gruyere-energie.ch/news/gruyere-energie-s-engage-dans-la-production-dhydrogene-a-bulle-1736/> (consulté le 28 janvier 2022).
- [34] T. Earl, L. Mathieu, S. Cornelis, S. Kenny, C. C. Ambel, et J. Nix, « Analysis of long haul battery electric trucks in EU », p. 22.
- [35] R. Kollegger, P. Casagrande, H. Clausdeinken, S. Rosser, et P. de Haan, « Elektrifizierung von Bussen in ländlichen Bergregionen », p. 52, févr. 2021.

- [36] « Performances of fuel cell electric buses powered by Ballard Power Systems ». <https://info.ballard.com/hubfs/Premium%20Content/Fuel%20Cell%20Electric%20Buses%20Proven%20Performance%20and%20Way%20Forward/WP-Performances%20of%20fuel%20cell%20electric%20buses%20powered%20by%20Ballard%20Power%20Systems.pdf?hsCtaTracking=fe5959a-45cf-4120-ae90-142e072ef7e0%7Cdb730e18-8ea9-4811-a9d4-7a5468cb436c> (consulté le 27 janvier 2022).

H. Annexes

H.1 Code d'acquisition et de traitement des données

Comme décrit plus haut, le système d'acquisition de données développé par l'HEPIA dans le cadre du projet OFT P-084 a pu être utilisé pour obtenir les données brutes de l'ordinateur de bord du véhicule. Cela correspond à un enregistrement en continu des données générées par le véhicule sur le canal FMS. Néanmoins, ces données ne sont pas exploitables en tant que tel car d'une part dans un format illisible (écriture hexadécimale) et d'autre part non synchronisées entre elles. Un code MATLAB a été écrit pour convertir ces données en valeurs physiques, les trier et les synchroniser afin d'ensuite pouvoir les exploiter pour comprendre l'utilisation du véhicule en service journalier. On parle ici d'un nombre conséquent de données (environ 220 par seconde), ce qui implique que pour traiter des enregistrements pouvant aller jusqu'à plus de 12h, un code robuste est requis.

On peut considérer à titre d'exemple ces deux lignes extraites d'une course :

```
(1615907273.591702) can0 0CF00400#FF887D212EFFF488  
(1615907273.592946) can0 10F00300#F10000FFFFFFFFFA
```

- La valeur entre parenthèses nous indique (en temps UNIX) que la mesure a été effectuée le mardi 16 mars 2021 à 16h07, 53.591702 secondes, respectivement le mardi 16 mars 2021 à 16h07, 53.592946 secondes (heure de Fribourg).
- La première partie (avant le #) du code à 26 caractères suivant le nom du canal (can0) nous indique qu'il s'agit pour la première ligne d'une mesure de couple et régime moteur et pour la seconde ligne d'une position de pédale d'accélérateur.
- La seconde partie (après le #) du code à 26 caractères nous indique dans le premier cas que le moteur tourne à 1476.125 tours/min avec un couple de 0 Nm et dans le second cas que la position de la pédale d'accélérateur est à 0%

Ces valeurs extraites de courses réelles ont ensuite pu être appliquées (grâce à un second code MATLAB) au futur moteur à hydrogène afin de simuler (en particulier sa consommation) sur des tracés réels en conditions réelles.

H.2 Nomenclature des qualités d'hydrogène

La qualité ou pureté de l'hydrogène est décrit dans sa nomenclature de la même manière que tout autre gaz disponible sur le marché en qualité industrielle. Les chiffres décrivant la qualité suivent toujours le nom du gaz sous la forme « X.Y ». La valeur X correspond au nombre de « 9 » (à commencer par les dizaines et la valeur Y informe sur le dernier chiffre de la pureté (généralement soit un 0 soit un 5). Un hydrogène 4.5 est donc pur à 99.995%. A préciser que la terminologie « hydrogène technique » parfois utilisée par certains producteurs correspond généralement à une qualité 2.5 (99.5%).

H.3 Méthodologie de simulation de la consommation

Il faut comprendre que pour cette étude, il a été décidé de ne pas faire de simulation du véhicule complet, comme c'est parfois le cas dans certaines études. En effet, cette méthodologie nécessite d'estimer bon nombre de rendements qui ne sont pas faciles à obtenir ou à mesurer (rendement des composants de la chaîne de transmission, consommation des différents agrégats, etc.). L'alternative choisie a été rendue possible grâce à la volonté de rendre la conception de ce véhicule la plus simple possible, à savoir remplacer le moteur thermique Diesel par un H2ICE en touchant le moins possible aux autres composants de la chaîne de transmission. Cela permet de traiter les rendements en consommations des différents composants tels une boîte noire, c'est-à-dire sans avoir besoin de connaître leurs spécificités. Un second élément clé de cette méthodologie est que les performances (maximales) du futur moteur H2ICE sont prévues pour être exactement au même niveau que la motorisation actuelle (1700 Nm, 265 kW). Cette particularité permet de s'imaginer qu'un chauffeur pourrait conduire les deux véhicules avec une motorisation différente exactement de la même manière. La méthode de simulation de la consommation utilise donc toutes les données mesurées sur les véhicules des TPF en y intégrant la cartographie du moteur H2ICE à la place de celle du moteur Diesel. On fait donc l'hypothèse qu'en tout point, du trajet, la demande de couple/puissance et le régime moteur seront identiques sur les deux véhicules.

Il est précisé dans le corps du rapport que la cartographie prévisionnelle du moteur à hydrogène a été générée sur la base du moteur existant avec un rendement maximal imposé à 40%. Les performances du moteur amélioré dont il est question au chapitre 4.4 font référence à une présentation de l'entreprise Mahle Powertrain [31] présentant le potentiel d'augmentation du rendement moteur avec les innovations technologiques en cours de développement. Selon Mahle, un rendement maximal de 46 à 49% sera

atteignable une fois ces innovations appliquées au moteur. La valeur de 46% a été retenue comme valeur maximale pour le « rendement amélioré ». Cette amélioration de rendement a été appliquée sur toute la cartographie initiale (base 40%).

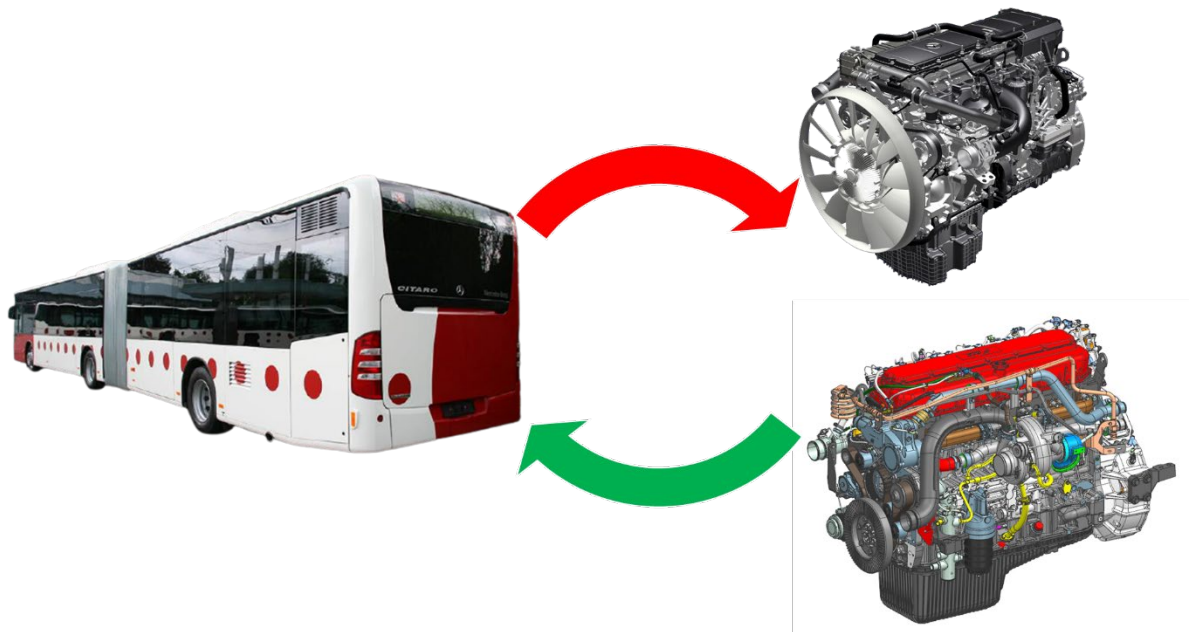


Figure 17 : Représentation schématique de la base de la simulation : seul le moteur change (le Mercedes OM470 Diesel est remplacé par un FPT Cursor 13 H2)

L'implantation simulée d'un alerno-démarrreur afin de créer une chaîne de transmission avec une hybridation légère (« mild-hybrid ») est quant à elle basée sur la cartographie de base (rendement max. 40%). Le principe avec ce concept est de couper le moteur dès que le véhicule est à l'arrêt (on ne parle donc pas d'une hybridation complète grâce à laquelle le véhicule pourrait se mouvoir uniquement avec le moteur électrique mais bien d'un système qui permet de maintenir les systèmes enclenchés à l'arrêt bien que le moteur soit éteint et de relancer le moteur lorsque le bus doit repartir). Pour simuler cela, on retranche à la consommation totale de Diesel celle qui est mesurée alors que le véhicule à une vitesse nulle. Cette méthode pourrait être qualifiée d'optimiste mais elle est validée par le fait les résultats obtenus sont parfaitement dans les fourchettes d'économies de carburant annoncées par les constructeurs qui proposent ce système sur leurs véhicules (tel Mercedes).

On notera encore que l'objectif de rendement avec le concept de moteur choisi (injection indirecte) est d'environ 43% à terme. Si l'on désire se passer de l'injection directe, bon nombre d'autre innovations sont tout de même implémentables dans le moteur, comme par exemple des bougies à pré-chambre passive, l'optimisation du rapport de compression et des flux d'air, etc.

H.4 Consommation des différents modes de propulsion

Les valeurs de consommation pour tous les modes de propulsion ainsi que leur provenance sont conciliées dans le tableau suivant :

Motorisation	Consommation	Source	Commentaire
Diesel	43.5 - 57.4 l/100 km	TPF	Ces deux valeurs proviennent de statistiques annuelles des TPF pour des véhicules de 18m, pour des lignes régionales, respectivement urbaines
Electrique	2.5 kWh/km	TPF (partenaire)	Cette valeur a été communiquée au TPF par un fabricant (confidentiel) de bus électriques pour des véhicules 18m.
Pile à combustible	12 kg/100km	CHIC/ Ballard [36]	Les valeurs de consommation disponibles le sont pour des bus 12m (8 kg/100km). Si l'on se réfère aux données du projet CHIC [10], on se rend compte que cette valeur est peut-être même optimiste (sur les 5

			ville européenne impliquées, seule Argovie/CarPostal a atteint la valeur de 8 kg/100km). L'extrapolation à 12 kg/100km (+50%) pour des bus de 18m provient de l'augmentation du poids total autorisé de 49%. Cette valeur inclut une récupération car basée sur des données réelles d'utilisation.
H2ICE			Voir le détail au chapitre 4.4, respectivement l'annexe H.3
Hybride-H2ICE			Basé sur les valeurs du H2ICE et diminution de la consommation due à l'hybridation de l'ordre de 9%. Selon les informations des TPF et d'un de leurs fournisseurs, l'hybridation d'un de leurs véhicules aurait permis une réduction de consommation de l'ordre de 18% (incluant la récupération). On a opté ici pour une valeur plus conservative.

Tableau 19 : Détail des consommations des véhicules

H.5 Détail des coûts annexes utilisés pour le calcul du TCO

Lors du calcul du TCO relatif à chaque type de motorisation, les coûts d'entretien au kilomètre ont été pris en compte. On trouvera dans le tableau ci-après le détail de ces valeurs ainsi que leur provenance.

Motorisation	Coût d'entretien [CHF/km]	Source
Diesel	0.71	TPF (exploitation)
Hybride-Diesel	0.85	TPF (partenaire)
Electrique	0.85	TPF (partenaire)
Pile à combustible	0.90	TPF (partenaire)
H2ICE	0.80	HEIA-FR (extrapolation)
Hybride – H2ICE	0.94	HEIA-FR (extrapolation)

Tableau 20 : Valeur et provenance des coûts d'entretien utilisés dans le calcul du TCO

De plus, des coûts d'investissement ont été appliqués pour les infrastructures telles les stations de recharge électriques ou la station d'hydrogène. On précisera que dans ce dernier cas, il ne s'agit que de la station, indépendante de sa source de combustible.

Investissement	Coût unitaire [CHF]	Commentaire	Source
Station de recharge électrique lente (dépôt)	80 000	On considère une station de recharge par véhicule au dépôt afin de principalement charger les véhicules durant la nuit	TPF
Station de recharge électrique rapide (terminus)	750 000	On considère une station de recharge par terminus (cela représente généralement 2 chargeurs par ligne)	TPF
Station d'hydrogène	5 000 000	Cette valeur est une estimation intégrant la station en elle-même, les études, les travaux de génie civil et les divers potentiels imprévus	TPF

Station Diesel	0	Cette infrastructure étant déjà existante, il n'est pas nécessaire d'intégrer un investissement y relatif	TPF
----------------	---	---	-----

Tableau 21 : Résumé des investissements liés à l'infrastructure d'approvisionnement en énergie

H.6 Résumé des valeurs prises en compte pour le calcul du TCO

Elément	Valeur	Unité
Données générales		
Kilométrage annuel des véhicules	70 000	km
Durée d'exploitation véhicules	10	ans
Coûts d'acquisition véhicules		
Coût d'achat 18m Diesel	500 000	CHF
Coût d'achat 18m full electric urbain	850 000	CHF
Coût d'achat 18m full electric régio	935 000	CHF
Coût d'achat 18m PAC	1 300 000	CHF
Coût d'achat 18m H2ICE régio	700 000	CHF
Coût d'achat 18m H2ICE-hybride urbain	800 000	CHF
Coûts du carburant/source d'énergie		
Coût du Diesel	1.40	CHF/litre
Coût de l'hydrogène (2021)	9.03 - 12.18	CHF/kg
Coût de l'hydrogène (horizon 2025)	6.50 – 10.00	CHF/kg
Coût de l'hydrogène (horizon 2030)	5.00 – 7.60	CHF/kg
Coût de l'hydrogène (horizon 2050)	5.00	CHF/kg
Coût du kWh électrique	0.16	CHF/kWh
Consommation des véhicules		
Consommation de Diesel 18m urbain	57.4	l/100km
Consommation de Diesel 18m régio	43.5	l/100km
Consommation de Diesel 18m urbain Hybride	48	l/100km
Consommation d'électricité 18m urbain	2.5	kWh/km
Consommation d'H2 18m PAC urbain & régio	12	kg/100km
Consommation d'H2 18m H2ICE régio	14	kg/100km
Consommation d'H2 18m H2ICE-hybride urbain	17	kg/100km
Coûts d'entretien des véhicules		
Coût d'entretien 18m Diesel	0.71	CHF/km
Coût d'entretien 18m électrique	0.85	CHF/km
Coût d'entretien 18m PAC	0.90	CHF/km
Coût d'entretien 18m H2ICE	0.80	CHF/km
Coût d'entretien 18m H2ICE-hybride	0.94	CHF/km
Stations de recharge		
Nombre de stations de recharge rapides	1	Par terminus
Nombre de stations de recharge lentes	1	Par véhicule
Nombre de stations de recharge d'H2	1	
Coût d'une station de recharge électrique rapide	750 000	CHF
Coût d'une station de recharge électrique lente	80 000	CHF
Coût de la station de recharge d'hydrogène	5 000 000	CHF
Efficacité moteur des simulations		
H2ICE régio	43	%
H2ICE-hybride urbain	46	%

Tableau 22 : Résumé des valeurs utilisées pour les calculs du TCO

H.7 Formules

La PME (Pression Moyenne Effective) est une valeur indicative permettant de comparer les performances de différents moteurs entre elles, même si les données « géométriques » du moteur sont radicalement différentes. En effet, la PME est adimensionnée par la cylindrée (c'est-à-dire que la valeur est exempte de l'influence de la cylindrée moteur).

$$PME = \frac{C \cdot \theta \cdot 10}{V_{cyl}} \quad (1)$$

Avec la PME en bar, V_{cyl} la cylindrée du moteur en cm^3 , C le couple moyen effectif en Nm et θ l'angle de rotation du moteur pendant un cycle en radians (2π pour un moteur 2-temps et 4π pour un moteur 4-temps).