



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 Stratégie énergétique 2050 des transports publics
(SETP 2050)

Stratégie Energétique 2050 dans les Transports Publics

Etude du potentiel des systèmes de propulsion alternatifs pour bus

Rapport final

Mathieu Horsky, Haute-Ecole ARC

Rue de la Serre 7 / 2610 St-Imier, mathieu.horsky@he-arc.ch, www.he-arc.ch

Thierry Robert-Nicoud, Haute-Ecole ARC

Rue de la Serre 7 / 2610 St-Imier, thierry.robert@he-arc.ch, www.he-arc.ch

Julie Barbey Horvath, Haute-Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud

Route de Cheseaux 1 / 1401 Yverdon-les-Bains, julie.barbeyhorvath@heig-vd.ch, www.heig-vd.ch

Yves Delacretaz, Haute-Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud

Route de Cheseaux 1 / 1401 Yverdon-les-Bains, yves.delacretaz@heig-vd.ch, www.heig-vd.ch

Luc Bossoney, Haute-Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud

Route de Cheseaux 1 / 1401 Yverdon-les-Bains, luc.bossoney@heig-vd.ch, www.heig-vd.ch

Groupe d'accompagnement

M. Tristan Chevroulet, Office Fédéral des Transports (OFT)
M. Daniel Schaller, Planair SA
M. Stefan Schnell, Office Fédéral des Transports (OFT)
M. Walter Josi, Office Fédéral des Transports (OFT)

Personnes interviewées

M. Thierry Wagenknecht, Transports Publics Genevois (TPG)
Mme Valérie Bourquard, Transports Publics de la Région Lausannoise (TL)
M. Laurent Mudry, Transports Publics de la Région Lausannoise (TL)
Mme Eveline Wüest, CarPostal
M. Urs Schläpfer, CarPostal
M. Marcus Jung, Städtische Verkehrsbetriebe Bern (Bernmobil)
M. Roman Zürcher, Regionalverkehr Bern-Solothurn AG (RBS)
Mme Laura Andres, Transports Publics Fribourgeois (TPF)
M. Marc Oggier, Basler Verkehrsbetriebe (BVB)

Mentions légales

Éditeur:
Office fédéral des transports OFT
Programme : Stratégie Énergétique 2050 dans les transports publics (SETP 2050)
CH-3003 Berne

Conduite du programme
Tristan Chevroulet, OFT

Numéro de projet: P-113
Source
Disponible en français et en allemand à l'adresse internet :
www.bav.admin.ch/energie2050

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

Berne, juin 2019

Résumé opérationnel

La problématique de l'abandon des carburants fossiles dans notre société a été remise sur la table avec la votation du 21 mai 2017 sur la Stratégie Energétique 2050 (SE 2050) et on peut constater plus généralement depuis quelques années que les choses s'accélèrent, notamment au rythme des évolutions technologiques, des scandales grandement médiatisés, de l'appauvrissement des ressources, et des pressions politiques. Les entreprises de transports publics ont le devoir important de montrer l'exemple dans la transition énergétique puisqu'il est possible de remplacer efficacement le moteur diesel dans le transport de personnes.

Cette étude a toutefois démontré au travers d'une évaluation détaillée de technologies alternatives pertinentes sur cinq scénarios variés qu'il n'existe pas une seule solution universelle permettant de se passer du diesel, mais plusieurs solutions suivant les compromis choisis. Il faut considérer en effet chaque cas individuellement, notamment en raison des disparités locales propres à notre pays concernant la disponibilité des énergies, de leur coût, de la topographie, etc.

Ces technologies ont été évaluées selon 15 critères répartis en cinq catégories telles que : performances, attractivité pour l'utilisateur, nuisances, exploitation, et économie. Ce travail a permis de mettre en évidence les points forts et faibles de chaque technologie, mais également les éléments à prendre en compte lors du choix d'une technologie par rapport à une autre.

Grâce aux échanges avec près d'une dizaine d'entreprises de transport public, des témoignages et expériences de première main ont pu être récoltés et ont démontré qu'il existe une réelle envie d'en apprendre davantage sur cette problématique et de pouvoir disposer d'outils efficaces permettant de sélectionner plus facilement la bonne option. Les obstacles freinant les entreprises de transport à une transition énergétique ont été identifiés et des solutions ont été proposées.

Le travail effectué au cours de ce projet démontre que la transition énergétique des bus est un sujet d'actualité, intéressant à la fois les pouvoirs publics et les entreprises, et qu'il existe un vide de connaissances et un besoin d'en savoir plus dans ce domaine très évolutif.

Executive Summary

The issue of the fossil fuel desertion in our society has been put on the table with the 21st of May 2017 vote on the “Stratégie Énergétique 2050” (SE 2050) subject, and more generally we have seen these past few years that things appear to move forward quicker, in sync with the technologies evolution, the largely publicized scandals, the impoverishment of the resources, and the political pressure. The public transportation companies have the important duty to lead the energy transition because it is possible to effectively replace the diesel engine in the public transportation.

This study has shown through the detailed evaluation of relevant alternative technologies over five different scenarios that there is not a single universal solution to avoid the use of diesel, but few different solutions depending on the chosen compromises. One has to consider each case individually, in particular due to the local disparities inherent of our country regarding the availability of energies, their cost, the topography, etc.

Those technologies have been evaluated upon 15 criteria under five categories such as: performance, user attractiveness, nuisances, operation, and economy. This work has put to light the strong and weak points of each technology, but also the points to take in consideration when choosing a technology over another.

Thanks to the discussions with nearly a dozen public transportation companies, testimonials and first hand experiences were collected and proved that there is a real desire to learn more about this subject and to have efficient tools to select the right option more easily. The obstacles slowing the transportation companies from an energy transition have been identified and solutions have been proposed.

The work done during the project shows that the energy transition for buses is a hot topic, interesting both public authorities and bus companies, and that there is a general void of knowledge, and a need to know more in this highly scalable field.

Zusammenfassung für Entscheidungsträger

Aufgrund der Abstimmung vom 21 Mai 2017 zur Energiestrategie 2050, bekam die Problematik des Verzehrs von fossilen Brennstoffen in unserer Gesellschaft neuen Aufwind. Desweiteren stellen wir fest, dass sich diese Problematik insbesondere durch die technischen Fortschritte, den öffentlich ausgetragenen (Diesel-)Skandalen, der Ressourcenverknappung sowie durch den zunehmenden politischen Druck, verschärft hat. Verkehrsunternehmen haben die wichtige Aufgabe, in der Energiewende mit gutem Beispiel voranzugehen, da es möglich ist, den Dieselmotor im Personenverkehr effektiv zu ersetzen.

Diese Studie kam zum Schluss, Aufgrund einer detaillierten Bewertung von fünf relevanten Szenarien alternativer Technologien, dass es nicht eine universelle Lösung zum Verzicht auf Diesel geben kann, sondern dass es vielmehr um mehrere verschiedene Lösungen handelt. Die entsprechenden Lösungen können somit, je nach den lokalen Gegebenheiten wie Topologie, Verfügbarkeit von unterschiedlichen Energieformen, sowie deren Kosten, unterschiedlich ausfallen.

Die alternativen Technologien wurden nach 15 Kriterien bewertet, die in fünf Kategorien unterteilt waren: Leistung, Attraktivität für den Benutzer, Umweltbelastung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit. Diese Arbeit hat es ermöglicht, die Stärken und Schwächen jeder Technologie hervorzuheben, aber auch die Elemente, die bei der Auswahl einer Technologie gegenüber einer anderen berücksichtigt werden müssen.

Durch den Austausch mit fast einem Dutzend öffentlichen Verkehrsunternehmen, wurden Zeugnisse und Erfahrungen aus erster Hand gesammelt und dabei aufgezeigt, dass es ein echter Wunsch ist, mehr über dieses Thema zu lernen und effektive Tools zu besitzen, um die Auswahl der richtigen Option zu erleichtern. Die Hindernisse, welche die Verkehrsunternehmen an einer Energiewende hindern, wurden identifiziert und Lösungen vorgeschlagen.

Die während dieses Projekts geleistete Arbeit hat gezeigt, dass die Energiewende ein heißes Thema ist, das sowohl Behörden als auch Transportunternehmen interessiert, und dass es nach wie vor ein grosses Wissensbedürfnis, sowie ein gewisser Mangel an Kenntnissen, zu dieser sehr evolutionären Thematik gibt.

Résumé

La problématique de l'abandon des carburants fossiles dans notre société a été remise sur la table avec la votation du 21 mai 2017 sur la Stratégie Energétique 2050 (SE 2050) et on peut constater plus généralement depuis quelques années que les choses s'accélèrent, notamment au rythme des évolutions technologiques, des scandales grandement médiatisés, de l'appauvrissement des ressources, et des pressions politiques. Les entreprises de transports publics ont le devoir important de montrer l'exemple dans la transition énergétique puisqu'il est possible de remplacer efficacement le moteur diesel dans le transport de personnes.

Cette étude a toutefois démontré au travers d'une évaluation détaillée de technologies alternatives pertinentes sur cinq scénarios variés qu'il n'existe pas une seule solution universelle permettant de se passer du diesel, mais plusieurs solutions suivant les compromis choisis. Il faut considérer en effet chaque cas individuellement, notamment en raison des disparités locales propres à notre pays concernant la disponibilité des énergies, de leur coût, de la topographie, etc.

Ces technologies ont été évaluées selon 15 critères répartis en cinq catégories telles que : performances, attractivité pour l'utilisateur, nuisances, exploitation, et économie. Ce travail a permis de mettre en évidence les points forts et faibles de chaque technologie, mais également les éléments à prendre en compte lors du choix d'une technologie par rapport à une autre.

Le premier profil d'exploitation analysé est la *ligne urbaine de grande capacité*. Ce profil typique d'une grande ville telle que Genève met en jeu des « mégabus » pouvant accueillir environ 140 passagers (valeur de confort). Peu de bus existent dans cette catégorie, par conséquent ce sont les trolleybus à batterie ainsi que les bus hybrides diesel/électriques qui répondent le mieux à ce scénario, selon si la ville dispose déjà de caténaires ou non. Il est déjà prévu dans un futur proche que des bus à batterie à recharges rapides puissent répondre à ce besoin, ce qui en ferait l'alternative parfaite au bus hybride.

Le deuxième scénario d'exploitation étudié est celui d'une *ligne urbaine à forte pente*, comme on en retrouve par exemple à Lausanne. Ici la puissance nécessaire est un critère majeur, alors que la capacité l'est un peu moins que pour le premier scénario. Cela ouvre alors la porte au bus électrique à recharges rapides qui bénéficie d'une très grande réserve de puissance et répond parfaitement aux autres critères, comme un bruit et un impact visuel minimum. Le trolleybus à batterie trouve également ici sa place, d'autant plus si la ville dispose déjà de caténaires.

Pour le troisième cas, nous parlons d'une *ligne urbaine de rabattement*. Des bus de petite capacité sont utilisés ici, de l'ordre de 20 à 30 personnes. Sur ce terrain de jeu le diesel est à son avantage, mais il existe des solutions alternatives intéressantes et réalistes, comme le gaz naturel ou l'hybride hydrogène/électrique. Bien qu'actuellement trop coûteux, l'hybride hydrogène/électrique a un potentiel intéressant dans ce secteur. L'offre de technologies alternatives dans cette gamme de capacité commence à s'étoffer de manière encourageante pour le futur.

L'avant-dernière condition d'exploitation fait référence à une *ligne de campagne* où le rayon d'action est un critère majeur. La gamme de capacité mise en évidence ici est celle de cars standards (50 passagers assis), là où les bus électriques sont les plus présents. Ici encore le diesel est à son avantage, mais l'évolution rapide et intéressante de la technologie des batteries est telle que les bus électriques peuvent répondre efficacement à ce scénario. Il en va de même pour l'hybride hydrogène/électrique qui permet également de se déplacer en silence à la campagne, et de façon propre.

Enfin, le dernier scénario représente une *ligne de montagne*. Le climat hivernal plus rude qu'en plaine ne met pas à son avantage les bus électriques, de même que le besoin d'un rayon d'action important. A l'heure actuelle, il est difficilement envisageable de parcourir plus de 400 km en montagne en une journée par un temps glacial en utilisant un bus électrique. C'est donc bien le gaz naturel ou même le bio gaz naturel qui est recommandé ici, puisque ce dernier provient notamment de déchets de restaurants, en faisant alors un choix écologiquement très attractif.

Les solutions sont résumées dans le tableau suivant :

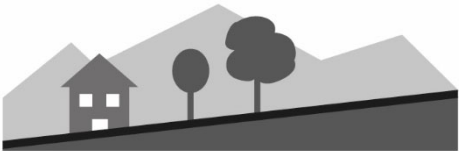
Profil d'exploitation	Caractéristiques principales	Options recommandées
 Ligne urbaine principale de forte capacité	Très grande capacité Disponibilité importante Impact visuel important Pollution et bruit minimum	Trolleybus à batterie Hybride diesel/électrique
 Ligne urbaine principale avec fortes pentes	Grande capacité Puissance nécessaire élevée Disponibilité importante Impact visuel important Pollution et bruit minimum	Trolleybus à batterie Bus à batterie à recharges rapides
 Ligne de quartier ou de rabattement	Petite capacité	Hybride hydrogène/électrique Gaz naturel (év. Électrique)
 Ligne régionale avec faibles pentes	Capacité moyenne Rayon d'action important	Electrique Hybride hydrogène/électrique
 Ligne régionale avec fortes pentes	Capacité moyenne Rayon d'action important	Gaz naturel ou BioGNV Diesel

Tableau 1 : résumé des recommandations en fonction des conditions d'exploitation

Grâce aux échanges avec près d'une dizaine d'entreprises de transport public, des témoignages et expériences de première main ont pu être récoltés et ont démontré qu'il existe une réelle envie d'en apprendre davantage sur cette problématique et de pouvoir disposer d'outils efficaces permettant de sélectionner plus facilement la bonne option. Les obstacles freinant les entreprises de transport à une transition énergétique ont été identifiés et des solutions ont été proposées.

Il faut, et c'est une évidence, rendre les moyens de propulsion alternatifs plus abordables, que ce soit du côté du coût d'investissement (véhicules et infrastructures) ou d'exploitation. Une standardisation des pièces ainsi que des appels d'offres groupés de la part des entreprises de transports publics pourraient permettre de réduire ces coûts. D'autre part, en revoyant le système de taxation des transports et des carburants, il serait possible de rendre moins intéressant le diesel, ou alors directement favoriser les solutions alternatives. Un travail de fond doit être effectué de ce côté afin d'adapter le modèle économique à ces moyens de propulsion alternatifs.

Il convient aussi d'optimiser les lignes et les profils d'utilisation afin de palier au problème de la capacité et de la durée de vie et du recyclage des batteries des bus électriques. Ainsi, une gestion adéquate du réseau permettrait de la consommation électrique. En hiver la consommation du chauffage a un impact majeur sur l'autonomie du bus, de même que la réduction des performances des batteries avec le froid.

Il en va de même pour leur recyclage qu'il faut absolument prendre en compte. Un bus électrique transporte plusieurs centaines de kilogrammes de matières toxiques, dont il faut s'occuper une fois leur durée de vie échu. Des solutions doivent être trouvées lors de l'élaboration de l'étude de marché.

Au niveau politique aussi, il faut éviter les incitations contradictoires qui rendent problématique une cohésion d'ensemble. Qui dit pouvoirs politiques dit également législation, et ici aussi il est important de légiférer sur ces nouvelles technologies dont certaines présentent des défis inédits. Les risques liés par exemple au stockage d'hydrogène ou à la présence d'une grande quantité de batteries (et donc de polluants majeurs) doivent être clairement identifiés pour protéger non seulement la population, mais également les intervenants. Dans le même registre législatif, certains ajustements doivent être apportés pour ce qui est des trolleybus et des trolleybus à batterie notamment, afin d'éviter qu'ils entrent en conflit avec le fait qu'une ligne de trolleybus peut être prolongée sans caténaires, si cette portion ne représente pas plus de 50% de la longueur totale de la ligne, sans quoi les statuts changent. Enfin, il faut informer la population et les acteurs des risques et de la sécurité.

Les implications liées aux moyens de propulsion alternatifs doivent être mieux connues. Grâce à une information de qualité et impartiale, les acteurs du secteur seraient capables de prendre les bonnes décisions afin de ne pas se trouver confronté à des mauvais choix. De façon générale, il est possible de répondre à ces nombreuses questions et discussions en palliant au manque de connaissances du sujet, par exemple grâce à des études et autres guides.

Compte tenu des perspectives d'évolution du transport, et notamment de la croissance attendue pour les transports publics, qui pourrait atteindre +51% entre 2010 et 2040¹, et en tenant compte des besoins de renouvellement de flotte, on s'attend à ce que les entreprises de transport public investissent massivement, et en particulier dans des bus utilisant des moyens de propulsion alternatifs. En choisissant les bonnes solutions le potentiel d'économie de coût d'exploitation peut être substantiel, de même que l'impact de ces choix sur le climat.

¹ <https://www.are.admin.ch/are/fr/home/transports-et-infrastructures/bases-et-donnees/perspectives.html>

Le travail effectué au cours de ce projet démontre que la transition énergétique des bus est un sujet d'actualité, intéressant à la fois les pouvoirs publics et les entreprises, et qu'il existe un vide de connaissances et un besoin d'en savoir plus dans ce domaine très évolutif.

Zusammenfassung

Aufgrund der Abstimmung vom 21. Mai 2017 zur Energiestrategie 2050 erhielt die Problematik des Verzichts auf fossile Brennstoffe in unserer Gesellschaft neuen Aufwind. Zudem ist festzustellen, dass sich die Problematik insbesondere wegen der technischen Fortschritte, der öffentlich ausgetragenen (Diesel-)Skandale, der Ressourcenverknappung sowie durch den zunehmenden politischen Druck zuspitzt. Verkehrsunternehmen haben die wichtige Aufgabe, in der Energiewende mit gutem Beispiel voranzugehen, da es möglich ist, den Dieselmotor im Personenverkehr effektiv zu ersetzen.

Diese Studie gelangte aufgrund einer detaillierten Bewertung von fünf relevanten Szenarien alternativer Technologien zum Schluss, dass es keine Universallösung für den Verzicht auf Diesel geben kann, sondern vielmehr mehrere unterschiedliche Lösungen. Die entsprechenden Lösungen können je nach den lokalen Gegebenheiten wie Topologie, Verfügbarkeit und Kosten der unterschiedlichen Energieformen unterschiedlich ausfallen.

Die alternativen Technologien wurden nach 15 Kriterien bewertet, die in fünf Kategorien unterteilt waren: Leistung, Attraktivität für den Benutzer, Umweltbelastung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit. Diese Arbeit ermöglichte es, die Stärken und Schwächen jeder Technologie hervorzuheben, aber auch die Elemente, die bei der Auswahl einer Technologie berücksichtigt werden müssen.

Als erstes Betriebsprofil wurde *die städtische Linie mit hoher Kapazität* analysiert. Das für eine Grossstadt wie Genf typische Profil umfasst «Megabusse» für bis zu 200 Personen. Für dieses Betriebsprofil stehen nur wenige Busse zur Auswahl. Je nach Verfügbarkeit einer elektrischen Oberleitung eignen sich O-Busse (Trolleybusse) beziehungsweise Diesel/Elektro-Hybridbusse für dieses Betriebsprofil am besten. Bereits in naher Zukunft ist damit zu rechnen, dass schnellladefähige Batteriebusse diesen Anforderungen gerecht werden und damit die perfekte Alternative zum Hybridbus darstellen.

Das zweite untersuchte Betriebsszenario ist das einer *steilen städtischen Linie*, wie es beispielsweise in Lausanne zu finden ist. Hier ist die benötigte Leistung ein Hauptkriterium, während die Kapazität etwas geringer ist als beim ersten Szenario. Damit tritt der Schnelllade-Elektrobus auf den Plan, der eine sehr hohe Leistungsreserve aufweist und die anderen Kriterien wie Lärm und minimale optische Auswirkung perfekt erfüllt. Auch hier findet der Trolleybus mit Batterieantrieb seinen Platz, umso mehr, wenn die Stadt bereits über Oberleitungen verfügt.

Der dritte Fall betrifft die *städtische Zubringerlinie*. In diesem Fall werden Busse mit geringer Kapazität von etwa 20 bis 30 Personen verwendet. Hier ist der Diesel klar im Vorteil. Es gibt aber dennoch interessante und realistische alternative Lösungen wie Erdgas oder Wasserstoff/Elektro-Hybrid. Obwohl der Wasserstoff/Elektro-Hybrid derzeit finanziell nicht tragbar ist, bietet er in diesem Bereich ein interessantes Potenzial. Es wird erwartet, dass sich das Angebot an alternativen Technologien in diesem Kapazitätsbereich in naher Zukunft erweitert.

Die vorletzte Betriebsbedingung bezieht sich auf eine *Überlandlinie*. Hier bildet der Aktionsradius ein Hauptkriterium. Der benötigte Kapazitätsbereich beträgt 80 Personen. Diese Kapazität entspricht jener der meisten Elektrobusse. Auch hier sind die Dieselbusse im Vorteil, doch die rasante Entwicklung der Batterietechnologie wird den Elektrobussen für diese Betriebsbedingung zugutekommen. Gleiches gilt für den Wasserstoff/Elektro-Hybridbus, der es auch erlaubt, lautlos und sauber auf dem Land zu fahren.

Das letzte Szenario schliesslich stellt eine *Gebirgslinie* dar. Das verglichen mit den Niederungen rauere Winterklima kommt den Elektrobussen nicht zugute, ebenso wenig wie der grosse Aktionsradius. Gegenwärtig ist es schwer vorstellbar, in den Bergen an einem Tag bei eisigem Wetter mit einem elektrischen Bus mehr als

400 km zu fahren. Hier ist also Erdgas oder sogar Biogas zu empfehlen; da Letzteres aus Restmüll stammt, stellt es eine ökologisch sehr attraktive Wahl dar.

Die Lösungen sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

Betriebsprofil	Hauptmerkmale	Empfohlene Optionen
 Stadtbuslinie mit hoher Kapazität	Sehr hohe Kapazität Hohe Verfügbarkeit Starker Landschaftsschutz, Lärm & Luftsanierung	Batterietrolleybus Diesel/Elektro-Hybridbus
 Stadtbuslinie mit starker Steigung	Hohe Kapazität Hohe Antriebsleistung Hohe Verfügbarkeit Starker Landschaftsschutz, Lärm & Luftsanierung	Batterietrolleybus Schnellladefähiger Batteriebus
 Quartierlinie oder Ortsbuslinie	Geringe Kapazität	Wasserstoff/Elektro- Hybridbus Erdgas (ev. Elektrobus)
 Regionalbuslinie mit geringer Steigung	Mittlere Kapazität Grosser Aktionsradius	Elektrobus Wasserstoff/Elektro- Hybridbus
 Regionalbuslinie mit starker Steigung	Mittlere Kapazität Grosser Aktionsradius	Erdgas oder Biogas-Bus Diesel

Tabelle 2: Zusammenfassung der Empfehlungen basierend auf den Betriebsbedingungen

Durch den Austausch mit fast einem Dutzend öffentlichen Verkehrsunternehmen wurden Rückmeldungen und Erfahrungen aus erster Hand gesammelt und dabei aufgezeigt, dass der echte Wunsch vorhanden ist, mehr über dieses Thema zu lernen und effektive Tools zu besitzen, um die Auswahl der richtigen Option zu erleichtern. Zudem wurden die Hindernisse identifiziert, die die Verkehrsunternehmen an einer Energiewende hindern, und Lösungen vorgeschlagen.

Der alternative Antrieb muss offensichtlich erschwinglicher werden, und zwar sowohl bei den Anschaffungskosten für Busse und bei der Infrastruktur als auch beim Unterhalt. Die Standardisierung von Teilen sowie die Bündelung von Ausschreibungen durch öffentliche Verkehrsunternehmen könnten diese Kosten reduzieren. Andererseits wäre es durch die Überarbeitung des Steuersystems für Transport und Kraftstoffe möglich, den Diesel weniger attraktiv zu machen oder alternative Lösungen direkt zu bevorzugen. Hier müssen substantielle Arbeiten durchgeführt werden, um das Wirtschaftsmodell an diese alternativen Antriebsmittel anzupassen.

Es ist auch notwendig, die Betriebslinien und die Nutzungsprofile zu optimieren, um das Problem der Lebensdauer und des Recyclings der Batterien eines elektrischen Busses zu lösen. Ähnlich würde ein intelligentes Netzwerkmanagement die Auswirkungen dieses unvermeidlichen Phänomens im Zusammenhang mit Batterien verringern. Dabei ist nicht zu vergessen, dass im Winter der Heizungsverbrauch einen grossen Einfluss auf die Autonomie des Busses sowie auf die Reduzierung der Batterieleistung bei Kälte ausübt.

Gleiches gilt für das Recycling, das bei der Suche nach Lösungen berücksichtigt werden muss. Es ist nicht zu vergessen, dass ein Elektrobus mehrere hundert Kilogramm Schadstoffe transportiert, die nach Ablauf der Lebensdauer entsorgt werden müssen. Bei der Entwicklung der Marktstudie müssen Lösungen gefunden werden.

Auch auf politischer Ebene müssen widersprüchliche Anreize vermieden werden, die die Gesamtkohärenz beeinträchtigen. Politik bedeutet auch Gesetzgebung: Hier ist es wichtig, Gesetze zu den neuen Technologien, die z.T. neuartige Herausforderungen aufwerfen, zu verabschieden. Die Risiken, die beispielsweise mit der Speicherung von Wasserstoff oder dem Vorhandensein einer grossen Menge von Batterien (und somit von mehr Schadstoffen) verbunden sind, müssen eindeutig identifiziert werden, um nicht nur die Bevölkerung, sondern auch die Interessengruppen zu schützen. Zudem müssen einige Anpassungen der Gesetzgebung insbesondere für Oberleitungsbusse und Batterietrolleybusse vorgenommen werden, um Verletzungen der Vorschrift zu vermeiden, wonach eine Trolleybuslinie ohne Oberleitung nur verlängert werden kann, wenn dieser Anteil höchstens 50 % der Gesamtlänge ausmacht; ansonsten ändert sich der Status des Busses. Schliesslich müssen wir die Bevölkerung und die Akteure über Risiken und Sicherheit informieren.

Die Auswirkungen alternativer Antriebsmittel müssen besser bekannt werden. Mit qualitativ hochwertigen und objektiven Informationen wären die Akteure in der Branche in der Lage, die richtige Auswahl zu treffen, um nicht mit Fehlentscheidungen konfrontiert zu werden. Allgemein lassen sich die vielen Fragen und Diskussionen dadurch beantworten, dass die Wissenslücken zum Thema beispielsweise durch Studien und Leitfäden geschlossen werden.

In Anbetracht der Aussichten für den Verkehr und insbesondere des erwarteten Wachstums für den öffentlichen Verkehr, der zwischen 2010 und 2040 + 51% erreichen könnte, und unter Berücksichtigung der Notwendigkeit der Erneuerung der Flotte, ist zu erwarten, dass die Unternehmen des öffentlichen Verkehrs insbesondere in Busse mit alternativen Antriebssystemen stark investieren werden. Wenn die richtigen Lösungen ausgewählt werden, fällt das Einsparpotenzial für die Betriebskosten erheblich aus – ebenso wie die Auswirkungen dieser Entscheidungen auf das Klima.

Die während dieses Projekts geleistete Arbeit zeigt, dass die Energiewende ein heißes Thema ist, das sowohl Behörden als auch Transportunternehmen interessiert, und dass es nach wie vor ein grosses Wissensbedürfnis, sowie ein gewisser Mangel an Kenntnissen, zu dieser sehr evolutionären Thematik gibt.

Table des matières

Résumé opérationnel	3
Executive Summary	4
Zusammenfassung für Entscheidungsträger	5
Résumé	6
Zusammenfassung	10
Table des matières	13
Liste des illustrations	16
Liste des tableaux	17
1. Introduction	18
1.1 Méthodologie	18
1.2 Structure du projet	18
2. Etat de l'art	19
2.1 Général	19
2.2 Coûts	21
2.3 Consommation	21
2.4 Pollution	22
3. Inventaire des technologies	24
3.1 Electrique	24
3.1.1 Trolley conventionnel	24
3.1.2 Trolleybus à batterie	26
3.1.3 Bus à batteries	26
3.1.4 Batterie à recharges rapides	27
3.2 Thermique	29
3.2.1 Diesel	29
3.2.2 Gaz naturel pour véhicules (GNV ou CNG)	30
3.2.3 Bio gaz naturel (BioGNV)	30
3.2.4 Gaz naturel liquéfié (GNL)	30
3.2.5 Gaz de pétrole liquéfié (GPL)	30
3.2.6 Biodiesel	31
3.2.7 Hythane	31
3.2.8 Bioéthanol	31
3.2.9 Turbine à gaz	31
3.3 Hybride	32
3.3.1 Electrique et diesel	32

3.3.2	Electrique et GNV	33
3.3.3	Electrique et micro-turbine	33
3.3.4	Electrique et hydrogène	33
3.3.5	Electrique et solaire	34
3.3.6	Electrique, diesel et hydraulique	35
4.	Evaluation des variantes	36
4.1	Performances	36
4.1.1	Performance du système de traction	36
4.1.2	Autonomie	38
4.1.3	Consommation énergétique	40
4.2	Nuisances	43
4.2.1	Bruit	43
4.2.2	Pollution	45
4.2.3	Impact visuel	47
4.3	Exploitation	49
4.3.1	Gamme de capacité	49
4.3.2	Disponibilité	51
4.3.3	Maturité technologique	53
4.3.4	Flexibilité	54
4.4	Usagers	55
4.4.1	Confort	55
4.4.2	Image	56
4.5	Economie	57
4.5.1	Coût d'achat véhicule	57
4.5.2	Coût d'achat infrastructure	58
4.5.3	Coût d'usage	59
4.6	Résumé de l'évaluation	60
5.	Scénarios étudiés	62
5.1	Ligne urbaine grande capacité	62
5.2	Ligne urbaine en pente	63
5.3	Ligne urbaine de rabattement	64
5.4	Ligne de campagne	64
5.5	Ligne de montagne	65
6.	Transition énergétique	67
6.1	Obstacles	67
6.1.1	Coûts	67

6.1.2	Durée de vie des batteries d'un bus électrique.....	67
6.1.3	Matière première, recyclage, et transport.....	67
6.1.4	Politique.....	67
6.1.5	Risques et sécurité.....	67
6.1.6	Flexibilité et fiabilité	68
6.1.7	Législation concernant les trolleybus à batterie	68
6.1.8	Manque de connaissances	68
6.2	Propositions.....	68
6.2.1	Coûts.....	68
6.2.2	Durée de vie des batteries d'un bus électrique.....	68
6.2.3	Matière première et recyclage des batteries problématique	69
6.2.4	Politique.....	69
6.2.5	Sécurité.....	69
6.2.6	Flexibilité et fiabilité	70
6.2.7	Législation concernant les trolleybus à batterie	70
6.2.8	Manque de connaissances	70
7.	Conclusion	71
7.1	Constats	71
7.2	Pour une analyse méthodique des cas réels	72
7.3	Perspectives.....	73
8.	Annexes	74
8.1	Comparaison technologies	74
8.1.1	Hybrides.....	74
8.1.2	Electriques	75
8.2	Poster.....	76

Liste des illustrations

Figure 1 : Coûts des bus comparés.....	21
Figure 2 : mix énergétique dans la production d'électricité dans le monde.....	24
Figure 3 : premier trolleybus Suisse en 1912	25
Figure 4 : inauguration des nouveaux trolleybus de Fribourg en 2010	25
Figure 5 : Swiss Trolley plus en action à Zürich	26
Figure 6 : bus modifié pour fonctionner avec des batteries dans les années 70	27
Figure 7 : bus TOSA et sa station de recharge rapide à l'arrêt.....	28
Figure 8 : système de recharge par induction.....	28
Figure 9 : essais du Gyrobus à Yverdon en 1950.....	29
Figure 10 : émissions de CO ₂ de variantes thermiques (variantes 1 et 2) hybrides (3) et électriques (4 et 5)	29
Figure 11 : premier bus à turbine à gaz en 1953.....	31
Figure 12 : prototype futuriste en 1956 de bus longues distances.....	32
Figure 13 : car postal fonctionnant grâce à de l'hydrogène et une pile à combustible.....	34
Figure 14 : bus solaire africain.....	35
Figure 15 : nouveauté intéressante avec le multi-hybride.....	35
Figure 16 : image thermique d'un bus	42
Figure 17 : exemples d'émissions de CO ₂ des bus en fonction du carburant	46
Figure 18 : émissions de CO ₂ selon le moyen de transport en 2016 sans l'aviation internationale	47
Figure 19 : vue de la place Bel-Air à Genève avec les nombreux caténaires	47
Figure 20 : armoire électrique TOSA et système de recharge.....	48
Figure 21 : la complexité et le volume de l'équipement nécessaire au bus à hydrogène Phileas de 18 [m]....	50
Figure 22 : premier bus double-articulé au gaz naturel.....	50
Figure 23 : à quoi pourraient ressembler nos routes avec voies de charge dédiées aux bus par exemple.....	51
Figure 24 : Trolleybus NAW à Lausanne.....	53
Figure 25 : mise en valeur d'un bus au biogaz naturel.....	56
Figure 26 : représentation de l'évaluation technologies hybrides et gaz selon critères du chapitre 4	60
Figure 27 : représentation des technologies électriques selon critères du chapitre 4.....	60
Figure 28 : illustration des scénarios étudiés	62
Figure 29 : projet bus électrique en site propre.....	71
Figure 30 : comparaison technologies hybrides, gaz naturel, et diesel selon critères du chapitre 4	74
Figure 31 : comparaison technologies électriques et diesel selon critères du chapitre 4	75
Figure 32 : poster pour le colloque de l'UTP en 2018	76
Figure 33 : poster (version en allemand) pour le colloque de l'UTP en 2018	77

Liste des tableaux

Tableau 1 : résumé des recommandations en fonction des conditions d'exploitation	7
Tabelle 2: Zusammenfassung der Empfehlungen basierend auf den Betriebsbedingungen.....	11
Tableau 3 : évaluation du critère de performance	37
Tableau 4 : évaluation du critère d'autonomie	40
Tableau 5 : rendement et consommation des moyens de propulsion	42
Tableau 6 : évaluation du critère de consommation énergétique	43
Tableau 7 : évaluation du critère de bruit	45
Tableau 8 : normes anti-pollution pour moteurs diesel lourds.....	45
Tableau 9 : évaluation du critère de préservation de la qualité de l'air	47
Tableau 10 : évaluation du critère d'impact visuel	49
Tableau 11 : norme de capacité	49
Tableau 12 : évaluation du critère de gamme de capacité	51
Tableau 13 : évaluation du critère de disponibilité.....	52
Tableau 14 : évaluation du critère de maturité technologique	54
Tableau 15 : évaluation du critère de flexibilité.....	55
Tableau 16 : évaluation du critère de confort.....	55
Tableau 17 : évaluation du critère d'image.....	57
Tableau 18 : évaluation du critère du coût d'achat des bus	57
Tableau 19 : évaluation du critère du coût d'achat véhicule	58
Tableau 20 : coûts d'achat infrastructure	58
Tableau 21 : évaluation du critère du coût d'achat infrastructure	59
Tableau 22 : coûts d'usage des bus.....	59
Tableau 23 : évaluation du critère du coût d'usage	59
Tableau 24 : recommandation scénario 1	63
Tableau 25 : recommandation scénario 2	63
Tableau 26 : recommandation scénario 3	64
Tableau 27 : recommandation scénario 4	65
Tableau 28 : recommandation scénario 5	66
Tableau 29 : résumé des recommandations en fonction des conditions d'exploitation	72

1. Introduction

Dans le cadre de la Stratégie énergétique 2050 voulue par le Conseil fédéral, un volet spécifique concerne les transports publics, au travers du programme « Stratégie Énergétique 2050 dans les Transports Publics » (SETP 2050). La mise en œuvre de ce programme est confiée à l'Office Fédéral des Transports (OFT) et s'adresse en particulier aux entreprises de transports publics. Il vise à améliorer l'efficacité énergétique dans les transports publics de personnes au travers de trois actions :

- Fixation des principes de base, récolte de données, fixation d'objectifs, et établissement de mécanismes incitatifs.
- Utilisation de réseaux d'informations, amélioration de la mise en réseau et de l'échange d'informations entre acteurs.
- Encouragement de la pratique, identification et financement de projets innovants.

C'est dans le cadre de ce dernier point que cette étude trouve son sens, afin de fournir à l'OFT les bases nécessaires et les outils permettant de répondre au mieux aux questions générales du projet SETP 2050.

L'objectif du projet est de réaliser une étude systématique des propulsions alternatives tout ou partiellement électrifiées à même de potentiellement remplacer les moteurs diesel des bus. L'identification des obstacles économiques à la généralisation de ces propulsions alternatives, des propositions pour les contourner et une meilleure information doivent permettre d'aider les entreprises de transport public à choisir des véhicules et des systèmes d'exploitation qui sont à la fois efficace sur le plan énergétique, tout en étant adaptés à leur mission de transport, situation financière et à la typologie de leur réseau. Une vision d'ensemble serait bénéfique à la plupart des entreprises exploitant des bus.

1.1 Méthodologie

Ceci sera fait notamment au travers de plusieurs éléments :

- Etat de l'art de ce qui se fait en Suisse et en Europe
- Entretiens avec diverses entreprises de transports publics afin de récolter les avis à la source des principaux intéressés
- Analyse approfondie des technologies passées, présentes, et futures
- Simulation de scénarios pertinents et évaluation des variantes technologiques retenues
- Identification des obstacles à une transition énergétique et proposition de solutions
- Rédaction d'un guide pratique en quatre langues (français, anglais, italien, allemand)

Le présent rapport sert de support technique au guide pratique.

1.2 Structure du projet

Le projet est divisé en plusieurs « work package » :

- WP1 : réalisation d'une comparaison technique, économique et opérationnelle des systèmes et technologies (rapport d'étude)
- WP2a : réalisation d'un guide pratique à l'intention des entreprises de transports publics
- WP2b : traduction trois langues (allemand, italien, anglais)
- WP3 : conception et animation d'un workshop d'une demi-journée, à Berne, bilingue français-allemand ; pour 30 personnes

2. Etat de l'art

Il existe de nombreuses expériences et études faites sur les moyens de propulsion dits « alternatifs ». La très grande majorité s'accorde à dire que des économies énergétiques sont réalisées lorsqu'un moyen de propulsion différent du diesel est utilisé. De même, le consensus général s'accorde à dire que le diesel est voué à être remplacé, mais qu'il conserve un grand attrait, entre autres grâce à son faible coût.

L'orientation vers le tout électrique n'est pas encore tout à fait établie, les hybrides occupant en ce moment encore une bonne place, avec l'idée de maximiser un moyen de propulsion déjà existant et bon marché – le diesel – tout en bénéficiant des avantages socio-économiques de l'électrique.

Dans un contexte où les conditions d'accès aux technologies alternatives ne sont pas encore réunies (manque de modèles, manque de standards et d'évaluations, logistique d'approvisionnement nouvelle), les entreprises de transport font figure de pionniers dans l'expérimentation de nouvelles technologies, et seules certaines d'entre elles peuvent supporter les risques technologiques liées à cette transition, avec le soutien ou l'impulsion des collectivités publiques qui commandent leur prestations de transport.

2.1 Général

Historiquement parlant, en 2002² se posait déjà la question de l'évolution des moyens de propulsion pour les bus, comme l'a montré une étude pour Dallas Area Rapid Transit (USA). A ce moment déjà l'hybride diesel/électrique occupait la première place. Suivait ensuite un bus avec micro-turbine alimentée par diesel ou gaz naturel, preuve que déjà à l'époque des solutions alternatives existaient et étaient envisagées. L'électrique, et c'est compréhensible, n'occupait que la dernière place en raison d'obstacles énergétiques majeurs, notamment une trop faible densité d'énergie.

En 2009³, une étude pour la Compañia del Tranvía de San Sebastián (Espagne) arrivait à la conclusion que l'utilisation de bus diesel et biodiesel à faible émissions était le plus recommandé. Par contre, pour le moyen-long terme l'utilisation de véhicules tout électriques ou hybrides diesel/électrique était préférée.

Les Transports Publics Fribourgeois (TPF) ont conclu sans surprise en 2012⁴ que la solution la plus avantageuse au niveau économique était bien le diesel, mais que l'électrique était la solution à envisager pour le futur, puisqu'elle regroupe les avantages du trolleybus, sans les inconvénients majeurs.

Une autre étude, mais n'évaluant que l'hybride diesel/électrique face au trolleybus a conclu en 2013⁵ pour la ville de la Chaux-de-Fonds que le bus hybride série était la solution la plus intéressante, en tenant compte notamment de contraintes d'aménagement imposant la suppression de lignes de contact autour de la gare pour des travaux.

Les statistiques parlent néanmoins toujours en faveur du diesel, puisqu'en 2013⁶, seuls 1.2% des bus en Europe étaient propulsés par l'électrique, contre 79% pour le diesel, 9.9% pour le biodiesel, et 7% pour le gaz naturel, soit tout de même quasiment neuf bus sur dix roulant avec une forme de diesel.

Malgré les signes encourageants émis par les études successives publiées, en 2017⁷ l'Allemagne est à l'arrêt au niveau de sa transition énergétique. Les bus électriques coûtent trop cher, il n'existe quasiment aucun

² https://www.afdc.energy.gov/pdfs/dart_tech_assess.pdf

³ <https://www.dbus.eus/wp-content/uploads/2014/04/5-biofuels-and-new-technologies-for-dbus.pdf>

⁴ http://agglo-fr.ch/fileadmin/user_upload/Comite/Reponses_Post_Mot_Quest/2016/fd_160323_RepComite_Quest28_Rapport.pdf

⁵ http://www.chaux-de-fonds.ch/autorites/conseil-general/Documents/seances_CG/2014/20140630/cg_20140630_04b.pdf

⁶ <http://zeeus.eu/uploads/publications/documents/zeeus-ebus-report-internet.pdf>

⁷ <https://www.tagesspiegel.de/berlin/oeffentlicher-verkehr-in-berlin-die-bvg-kommt-bei-e-mobilitaet-nicht-voran/20153518.html>

modèle disponible fabriqué dans le pays, les installations de recharge sont difficiles à mettre en place, il faut refaire et mettre à jour les ateliers de réparation, bref, leur objectif de sortir du diesel d'ici à 2020 tiendrait du miracle.

En France⁸ la situation est différente, puisque la Régie Autonome des Transports Parisiens a fixé comme objectif 80% de bus électriques à l'horizon 2025 et les 20% restants au biogaz. Cette proportion a été revue légèrement en 2018⁹ à deux tiers électrique pour un tiers biogaz, et un appel d'offre portant sur l'achat de 250 à 1000 bus à batteries a été lancé, pour un coût total de 400 millions d'euros attribué finalement en trois lots à des entreprises françaises qui fourniront au total 800 bus¹⁰, malgré une période de tests qui laissaient la porte ouverte à des entreprises de Chine, où la technologie est déjà bien implantée¹¹.

Dans l'attente d'une transition générale éventuelle vers le tout électrique ou une autre alternative durable, il existe une solution permettant, pour les villes disposant de trolleybus, de s'orienter vers des modèles à batteries. C'est le cas des Transports publics de la Riviera Vaudoise (VMCV) qui vont équiper des trolleybus existants avec des batteries pour prolonger une ligne de bus à Villeneuve sans devoir poser des caténaires¹². Zurich est également sur la brèche avec le «Swiss Trolley plus», un autre bus utilisant les caténaires pour se recharger en cours de route.

Dans cette optique, les Transports Publics Genevois (TPG) et les Transports Lausannois (TL) commencent à remplacer les génératrices de leurs trolleybus par des batteries, non seulement pour diminuer les nuisances lors de leur utilisation lors de travaux par exemple, mais également dans le cadre mentionné ci-dessus, à savoir le prolongement de lignes existantes ou simplement pour relier deux lignes existantes autrement que par la pose de caténaires, afin d'augmenter l'offre à moindre coût.

Si l'électrification des trolleybus est un moyen simple d'améliorer leur autonomie, les bus tout électriques posent quant à eux de gros problèmes de stratégie de charge. Comment parvenir à charger 100 bus électriques pendant la nuit, lorsque l'exploitation ne laisse que trois heures de temps disponible pour ce faire ? Une puissance de l'ordre de 21 MW serait nécessaire, soit cinq fois la centrale de Letten¹³. Il faudrait pouvoir planifier intelligemment grâce à la collecte d'information et à leur traitement¹⁴ les recharges de ces bus afin de lisser au maximum la consommation d'électricité, permettant ainsi d'économiser sur l'investissement en infrastructure. C'est tout le défi de l'électrification du réseau et du « Smart Grid ».

Finalement, les Japonais ont décidé de tenter l'expérience de l'hydrogène, puisque depuis 2018¹⁵ le premier bus à hydrogène homologué dans ce pays va permettre aux habitants de Tokyo (Japon) de se déplacer en silence.

⁸ <http://www.lagazettedescommunes.com/520295/bus-electriques-et-gnv-la-ratp-experimente-tous-azimuts/>

⁹ <https://www.romandie.com/news/L-Ile-de-France-se-lance-resolument-dans-le-bus-electrique/883796.rom>

¹⁰ <https://www.lesechos.fr/industrie-services/tourisme-transport/la-ratp-fait-le-choix-du-made-in-france-pour-sa-commande-massive-de-bus-electriques-1007849>

¹¹ https://www.challenges.fr/automobile/bus-electriques-chinois-pourquoi-les-europeens-sont-a-la-traine_474534

¹² <http://www.hopitalrivierachablais.ch/upload/docs/application/pdf/2017-06/tp.pdf>

¹³ <http://tst-suisse.ch/files/248/vbz-ebus-strategie-franz-11052017.pdf>

¹⁴ <https://www.theagilityeffect.com/fr/article/smart-charging-pour-bus-100-electriques/>

¹⁵ <https://www.lesnumeriques.com/voiture/toyota-sora-premier-bus-a-hydrogene-cache-botte-secrete-n73159.html>

2.2 Coûts

Il est généralement constaté que les bus électriques, que ce soit en louant ou en achetant les batteries, sont au moins une fois et demie plus chers que leurs équivalents diesel, en tenant compte des coûts d'achat, de maintenance, et d'exploitation. L'hybride hydrogène/électrique est à ce jour la technologie de propulsion la plus onéreuse, loin devant le trolleybus classique. L'hybride diesel/électrique se situant un peu au-dessus du diesel.

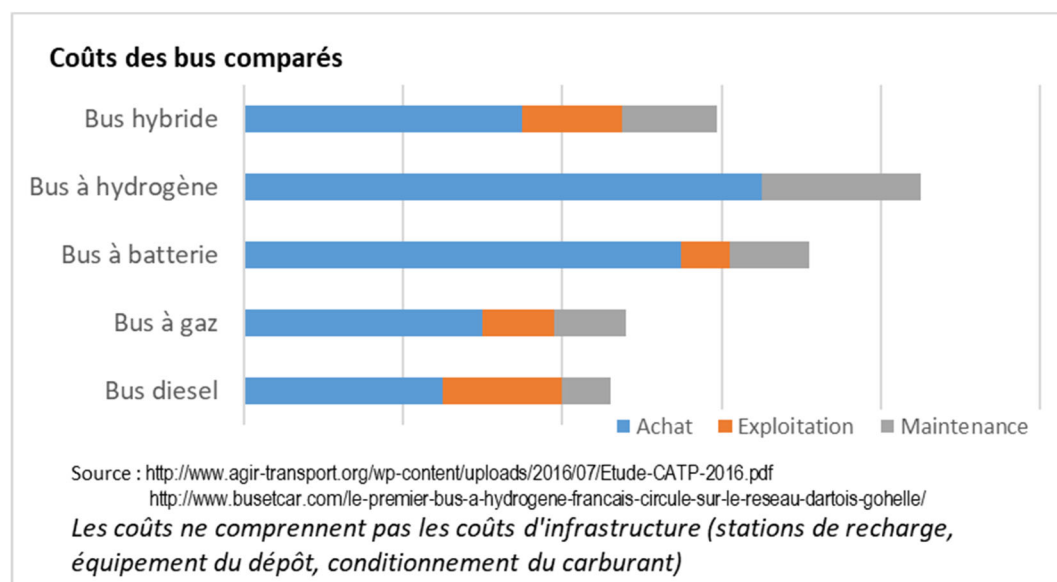


Figure 1 : Coûts des bus comparés

A noter que le prix des carburants augmentent, le diesel a doublé en 20 ans¹⁶, ce qui devrait influencer à l'avenir les coûts globaux d'exploitation des bus.

En 2013¹⁷, un rapport du Blekinge Institute of Technology (Suède) a démontré que le tout électrique est le moyen le plus avantageux en tenant compte du cycle de vie complet du produit sur une période de huit ans, face notamment au diesel, hybride, biogaz et biodiesel. Il faut néanmoins préciser que la durée de vie choisie dans cette étude est courte et va forcément avantager l'électrique avec des batteries qui vieillissent très rapidement, contrairement par exemple à un diesel dont la durée de vie constatée est d'au moins 15 ans, ou celle d'un trolleybus dont la durée de vie peut atteindre 20 ans ou plus.

2.3 Consommation

La consommation de carburant des moyens de propulsions alternatifs a toujours été un argument phare selon la direction dans laquelle s'oriente le débat. Mais force est de constater que le mètre étalon dans le transport de personnes est le diesel. L'évolution des moteurs, des normes et des pénalités gouvernementales a forcé les constructeurs à développer des moteurs de plus en plus économes et propres, car qui dit baisse de consommation dit également baisse des émissions de CO₂ et permet donc d'atteindre les objectifs fixés.

Dans ce sens, Mercedes¹⁸ a développé en 2012 son Citaro Euro VI, un bus animé par un moteur diesel de 300 ch répondant donc à la norme Euro VI, et qui consomme 8.5% de carburant en moins – soit 3.6 l/100km

¹⁶ <http://france-inflation.com/prix-carburants.php>

¹⁷ <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:834206/FULLTEXT01.pdf>

¹⁸ https://www.mercedes-benz.fr/content/france/mpc/mpc_france_website/fr/home_mpc/bus/home/buses_world/record_run/result/Promise_redeemed.html

– que son prédécesseur, le Citaro Euro V. En comptant une durée de vie de 12 ans et un kilométrage annuel de 60'000 km, l'on calcule que cela équivaut à une économie de plus de 25'000 litres de diesel par bus.

Mais les économies possibles avec une motorisation hybride ont été comprises rapidement. En 2009¹⁹ déjà, une baisse de consommation de carburant de l'ordre de 30% était constatée sur des bus à motorisation hybride diesel/électrique dans les villes de Seattle et de New York (USA).

Les Transports Publics de Bienne (TPB) ont réalisé des essais en 2011²⁰ avec un bus hybride diesel/électrique qui a permis d'économiser jusqu'à 30% de carburant.

L'étude menée à la Chaux-de-Fonds en 2013 mentionnée au point 2.1 rapporte une consommation d'un bus hybride environ 25% inférieure à un diesel conventionnel, mais l'évolution technologique des nouveaux bus diesel les rendent plus performants sur le plan de la consommation. Cette étude montre également que le trolleybus fait encore mieux, avec une réduction de 45% de la consommation toujours par rapport au diesel.

Egalement en 2013²¹ mais au Québec (Canada), une comparaison entre un bus hybride diesel/électrique et un bus diesel conventionnel a révélé une baisse de la consommation de l'ordre de 30 à 37% suivant le parcours.

Une étude de 2014²² portant sur de grandes flottes de bus en Chine a montré que les économies de carburant pour les bus hybrides se montaient à environ 25% par rapport à un bus conventionnel, passant de 40 à 30 l/100km. Ce n'est pas pour rien que ce pays détient 95% des bus électriques vendus dans le monde en 2016¹¹.

Encore en 2014²³, c'est dans la ville de Göteborg (Suède) que le projet d'échelle européenne « Hyper Bus » a été appliqué, afin de mettre en avant la technologie hybride diesel/électrique. Avec succès, puisque les économies d'énergies se sont montées à 61% et celles de carburant à 81% par rapport à un diesel conventionnel de type Euro V.

A l'exception de l'expérience de Göteborg, il faut constater qu'il est très rarement mentionné comment sont calculés ces gains. Il ne suffit pas en effet de tenir simplement compte de la consommation de carburant, mais également de la consommation d'énergie, puisque les carburants ont un pouvoir calorifique différent.

En 2017²⁴, des expérimentations dans trois régions françaises – Marseille, Nice, le Vaucluse – sur des véhicules au gaz naturel n'ont pas permis de mettre en évidence des économies de carburant par rapport à un bus diesel conventionnel, malgré ce que l'article essaye de démontrer, car il faut tenir compte également de l'équivalence énergétique entre les carburants, et les résultats présentés sont alors bien différents.

Au contraire, en 2016²⁵, une consommation de l'ordre de 813 kWh/100km de gaz naturel était observée sur des bus permettant de transporter 100 personnes environ à Nancy (France), soit une consommation de 50% plus élevée que les bus diesels comparables, ce que corroborent nos entretiens.

2.4 Pollution

De façon similaire à la consommation, lors du calcul des émissions de CO₂, il faut tenir compte non pas du véhicule seul (réservoir à la roue, ou TTW), mais de la globalité de la chaîne comprenant également la

¹⁹ http://publications.gc.ca/collections/collection_2012/tc/T41-1-71-fra.pdf

²⁰ vb-tpb.ch/fileadmin/_migrated/content_uploads/2011_12_19_Medienmitteilung_Hybrid_Ergebnisse_vb-tpb_F_01.pdf

²¹ http://www.stm.info/sites/default/files/affairespubliques/Communiques/Annexes/rapport_essais_iveco.pdf

²² http://www.repic.ch/files/7114/4126/7442/Grutter_FinalReport_e_web.pdf

²³ http://www.hyperbus.se/download/18.6f0426c148417f553730177/1409928650556/Hyperbus+Rapport_2014_140623.pdf

²⁴ <http://www.gaz-mobilite.fr/actus/experimentations-autocars-gnv-paca-gaz-naturel-resultats-1701.html>

²⁵ http://www.grandnancy.eu/fileadmin/fichiers/web/ESPACE_PRESSE/DP/Dossier_de_presse_Citaro.pdf

fabrication du produit et de tout ce qui l'entoure (du puits à la roue, ou WTW). Ces valeurs sont malheureusement trop souvent ignorées ou inconnues, ce qui rajoute à la confusion générale concernant les émissions des véhicules. Et ceci sans même entrer en matière concernant les différents tests ou normes qui influencent grandement les résultats ou les valeurs des constructeurs.

En 2010²⁶ en Suisse, la part d'émission de PM10 liées au trafic routier (voyageurs) se montait à environ 11%. A savoir que ces particules ne proviennent pas exclusivement des gaz d'échappement, mais également de l'usure des composants des véhicules (freins, embrayage et pneus), de l'abrasion des routes, etc.²⁷

Une étude de 2007²⁸ sur le rôle du gaz naturel et du biométhane dans le futur de l'Allemagne a démontré que l'hydrogène était le plus mauvais candidat à l'exercice du bilan de CO₂ du puits à la roue. La raison en est que la transformation de l'hydrogène utilise énormément d'énergie. Mais il faut préciser que suivant le pays et la région, l'énergie provient de différentes sources plus ou moins propres (nucléaire, charbon, hydraulique, etc.). L'hydraulique entrant en grande partie dans le mix énergétique suisse, ce besoin d'énergie pour conditionner l'hydrogène n'influencerait pas autant négativement le bilan CO₂ de cette technologie que dans le cas de l'Allemagne.

De plus, il faudrait tenir compte des pénalités ou des bonus gouvernementaux liés aux rejets de CO₂, qui pénalisent par exemple encore davantage les bus propulsés par des carburants fossiles tels que le diesel. A contrario, sur le plan de l'émission de polluants, grâce aux récentes évolutions sur les normes antipollution, les bus diesels se comportent de mieux en mieux, en particulier grâce aux filtres à particules. La dernière norme toujours en vigueur – Euro VI – date de 2013, et la norme Euro VII n'est pas prévue avant au moins 2020 ou 2021²⁹.

Pour ce qui est des gains, l'expérience des TPB a révélé une réduction des émissions de CO₂ de 30%. Dans l'expérience de Göteborg citée précédemment, les émissions de CO₂ ont été réduites de 75% grâce à la possibilité de conduire 80% du trajet en tout électrique et d'éviter ainsi de polluer dans des zones sensibles sélectionnées.

La Poste quant à elle a conclu en 2016³⁰ une expérience de cinq ans portant sur l'utilisation de cinq cars postaux utilisant une pile à hydrogène dans la région de Brugg. Plus d'un million de kilomètres ont été parcourus à la satisfaction générale, permettant d'économiser 1500 tonnes de CO₂. Par contre, un manque de rentabilité³¹ lié notamment à une évolution de la technologie moins importante qu'initialement prévue n'a pas permis de poursuivre l'aventure. Les développements technologiques actuels et futurs permettraient de lever une partie des contraintes rencontrées dans cette expérience pilote, notamment en matière de stockage de l'hydrogène.

²⁶ https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/fr/dokumente/luft/fachinfo-daten/feinstaub_fragenundantworten.pdf.download.pdf/poussieres_finesquestionsetreponses.pdf

²⁷ <http://ademe.typepad.fr/files/ademe-v%C3%A9hicules-diesel-d%C3%A9finitive.pdf>

²⁸ http://www.arol-energy.com/fileadmin/user_upload/Fiche_technique_biogncv.pdf

²⁹ <https://www.carkeys.co.uk/guides/euro-emission-standards-explained>

³⁰ <https://www.postauto.ch/fr/news/cinq-ans-reussi-sur-les-routes-avec-de-l-hydrogene>

³¹ <https://www.postauto.ch/fr/news/cars-postaux-%C3%A0-pile-%C3%A0-combustible-un-bilan-positif>

3. Inventaire des technologies

Ce chapitre regroupe les différentes technologies d'intérêt et autres curiosités pour propulser les bus ainsi qu'une brève description de leur fonctionnement, et une appréciation de leurs points positifs et négatifs.

3.1 Electrique

Les bus tout électriques sont réputés les plus propres et pour cela, sont appréciés par la population. En réalité, leur efficacité énergétique est fortement tributaire de la provenance de l'électricité utilisée pour les recharger. Les différentes sources d'électricité présentent de fortes différences en matière d'empreinte écologique et CO₂.

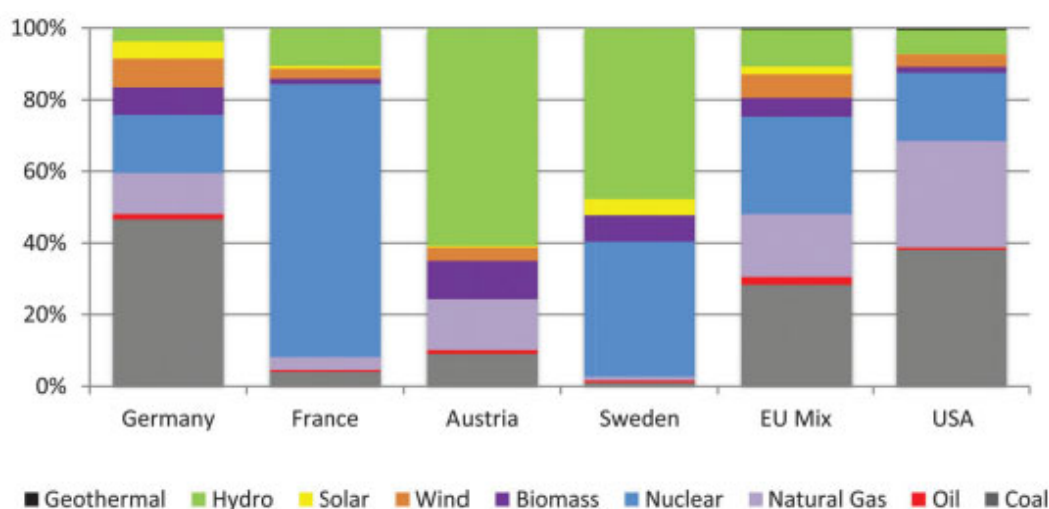


Figure 2 : mix énergétique dans la production d'électricité dans le monde³²

Au niveau des sources énergétiques, les disparités sont énormes entre les pays d'un même continent.

En Suisse et en 2016, 59% de l'électricité provenait de l'hydraulique, 33% du nucléaire, 3% de centrales à combustibles fossiles et 5% provient de sources renouvelables³³. En raison des fluctuations saisonnières du niveau des barrages et du débit des rivières, la Suisse importe une partie de son énergie en automne et en hiver, principalement de France et d'Allemagne. En moyenne annuelle, seuls les 60% de l'énergie consommée en Suisse est issue de la production indigène. Dans le cadre de la Stratégie énergétique 2050, un des objectifs est l'augmentation de la part des nouvelles énergies renouvelables dans le mélange électrique³⁴. En ce qui concerne les transports publics, cet objectif est important car il n'y a aucun intérêt du point de vue énergétique à alimenter des bus électriques au moyen d'une électricité produite par des moyens thermiques³⁵.

3.1.1 Trolley conventionnel

Le trolleybus dit « conventionnel » à pantographes existe depuis plus de 100 ans en Suisse, et est à ce jour toujours le type de bus le plus propre et efficace énergétiquement pour le transport de personnes. La Suisse est donc très attachée émotionnellement à ce moyen de transport qui a traversé les âges, et elle compte le plus grand nombre de villes à en être équipées en Europe occidentale³⁶.

³² <http://pubs.rsc.org/is/content/articlepdf/2015/ee/c5ee01512j>

³³ <https://www.energie-environnement.ch/definitions/538-mix-electrique-et-mix-energetique>

³⁴ <https://www.admin.ch/opc/fr/federal-gazette/2013/6771.pdf>

³⁵ https://www.rtbef.be/info/societe/onpdp/detail_les-bus-hybrides-de-namur-pas-si-verts-que-ca?id=9878024

³⁶ https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_de_trolleybus_en_Suisse

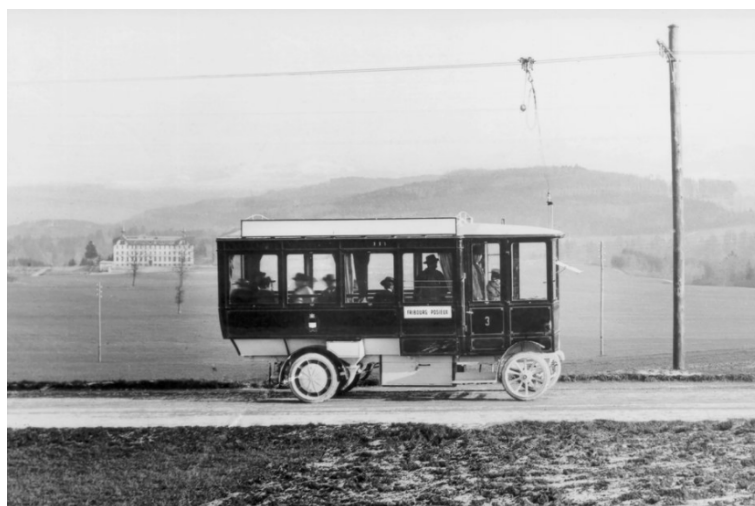


Figure 3 : premier trolleybus Suisse en 1912³⁷

Embarquant une petite génératrice diesel ou des batteries comme propulsion de secours, le trolleybus permet même de naviguer sur de petites distances sans ses perches. Par contre, cette technologie demande de lourds travaux d'aménagements urbains, rendant ainsi très difficile une exploitation à la campagne, sans compter l'aspect jugé disgracieux des caténaires, spécialement dans les hyper-centres. En revanche, outre sa grande capacité de transport³⁸, il se distingue par sa facilité d'accès grâce à un plancher plat, ainsi qu'un niveau de bruit minimum.



Figure 4 : inauguration des nouveaux trolleybus de Fribourg en 2010³⁹

Ces bus possèdent une excellente accélération grâce au couple instantané des moteurs électriques, et une faible consommation due à un excellent rendement global (de l'ordre de 75%⁴⁰). Ils peuvent récupérer de l'énergie en descente et au freinage et la réintégrer au réseau. Le prix d'achat des véhicules et de l'infrastructure est élevé, mais néanmoins en-dessous d'un tram. De surcroît, plus le prix des carburants augmente, plus le trolleybus devient avantageux, et l'infrastructure a une durée de vie d'environ 50 à 60 ans⁴¹. Un problème dans des villes où la température moyenne annuelle est basse est le givre des lignes de contact dont il faut s'occuper activement et qui nécessite des frais supplémentaires.

³⁷ <https://www.lematin.ch/societe/siecle-trolleybus-suisse/story/12525945>

³⁸ <https://www.hess-ag.ch/fr/busse/trolleybusse/trolleyuebersicht.php>

³⁹ <http://jorgetrolleybus.skyrock.com/2946952747-Mise-en-service-des-nouveaux-trolleybus-de-Fribourg-Suisse.html>

⁴⁰ <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00834819/document>

⁴¹ http://www.trolleybus.eu/www/verwaltung/common/files/Trolleybuses_eurobus_2006.pdf

3.1.2 Trolleybus à batterie

Le trolleybus à batterie utilise l'infrastructure existante des trolleybus, et au contraire d'un bus à recharge rapide, ne nécessite pas d'installation particulière le long du parcours. Hess fournit la Verkehrsbetriebe Zürich (VBZ) avec son Swiss Trolley Plus. L'image ci-dessous représente parfaitement le fonctionnement de ces bus pouvant rouler sans utiliser de caténaires.



Figure 5 : Swiss Trolley plus en action à Zürich⁴²

Le Swiss Trolley Plus est annoncé pouvant parcourir 30 km sans caténaire et consomme jusqu'à 15% d'énergie en moins par rapport à un trolleybus conventionnel⁴³ grâce à une gestion intelligente de la consommation. Il est propulsé par deux moteurs électriques de 152 kW chacun et alimentés grâce à une batterie de 60 kWh⁴⁴. Il s'agit d'une solution intéressante permettant notamment d'élargir le rayon d'action d'un trolleybus classique, tout en profitant de l'installation existante et en minimisant la construction de nouvelles lignes aériennes. A Genève, les tpg exploitent plusieurs lignes avec des trolleybus à batterie, et ont la possibilité de prolonger certaines lignes sans caténaires. En confrontant les sources et déclarations des exploitants, on retiendra une autonomie de l'ordre de 10 à 30km sans recharge par caténaire.

3.1.3 Bus à batteries

Les bus à batterie, également appelés Electrobus, sont des bus se déplaçant uniquement grâce à un ou deux moteurs électriques, alimentés par des batteries embarquées. Cela rend ce système extrêmement pénalisant au niveau du poids puisque les batteries sont tractées par le véhicule en tout temps, et aucune recharge n'est possible en cours de route. Ce système a les avantages d'un véhicule électrique au niveau des nuisances, mais l'autonomie est limitée. La problématique peut se poser ainsi « plus de batteries égal plus d'autonomie et plus de masse, mais plus de masse égal moins d'autonomie ». Système existant depuis fort longtemps, il ne fut que peu utilisé jusqu'à récemment en raison entre autres de coûts très élevés (80% de plus au kilomètre par rapport à un diesel en 1975⁴⁵).

⁴² <https://www.kommunalmagazin.ch/fahrzeuge/ein-trolleybus-fast-ohne-oberleitung>

⁴³ <https://www.spirit.bfh.ch/index.php?id=757&L=1>

⁴⁴ <https://www.stadt-zuerich.ch/content/dam/stzh/vbz/Deutsch/Ueber%20das%20Departement/Medienmitteilungen/2017/Factsheet%20SwissTrolley%20plus.pdf>

⁴⁵ <http://archive.commercialmotor.com/article/15th-august-1975/4/battery-bus-nearly-ready>



Figure 6 : bus modifié pour fonctionner avec des batteries dans les années 70⁴⁶

La technologie a aujourd'hui bien évolué, et il existe à présent une multitude de bus électriques compétitifs. Ce sont néanmoins des bus de taille moyenne, de l'ordre de 8 à 12 m et prévus pour de courtes distances avec un nombre limité de passagers. En effet, il ne faut légalement pas dépasser une certaine masse totale, pour ne pas endommager les routes ou infrastructures publiques.

Plus qu'avec n'importe quelle autre technologie, le recyclage des composants revêt ici une importance toute particulière, puisque ces bus embarquent plusieurs tonnes de batteries hautement toxiques et composés de matériaux non renouvelables. Il faut aussi compter avec une situation qui concerne tout particulièrement notre pays : le froid. Ces batteries peuvent perdre jusqu'à 35% de leur capacité par des températures de -20 °C.

3.1.4 Batterie à recharges rapides

Cette nouvelle technologie aussi appelée bus à « biberonnage » est une sorte de trolleybus à batterie sans caténaires. Il bénéficie également d'une grande flexibilité de déplacement car les points de recharges peuvent être espacés selon la taille de batterie embarquée et du profil de la route, et peuvent aussi être mutualisés entre plusieurs lignes. Ce bus présente donc les avantages d'un bus électrique sans certains inconvénients, et constitue un bon compromis, avec en plus un effet « nouveauté » auprès du public.

Hess fournit aux TPG un véhicule nommé TOSA, qui ne met que 15 secondes pour charger ses batteries afin de rallier l'arrêt suivant, et quatre minutes en fin de ligne⁴⁷. C'est pour cette raison que les stations de recharge pour ces bus sont placées généralement tous les trois à quatre arrêts, suivant le profil de la ligne (topographie, fréquentation, etc.). Nantes a également acquis 20 bus de ce type qui devraient être mis en fonction dès fin 2018⁴⁸. Un inconvénient de cette technologie est constitué par l'infrastructure requise qui est importante, que ce soit au dépôt pour la recharge lente, ou sur la ligne pour les recharges rapides, inconvénient venant s'ajouter aux problèmes de durée de vie et de recyclage des batteries inhérents aux bus électriques.

Ce système a connu quelques soucis lors de sa première mise en service en décembre 2017⁴⁹ qui a nécessité l'arrêt de son exploitation pendant quelques semaines. Ces défauts de jeunesse sont maintenant résolus et les TPG exploitent avec succès ces bus sur leur ligne 23.

⁴⁶ <http://transport-illustrated.blogspot.ch/2016/03/runcorn-in-eighties.html>

⁴⁷ <http://www.agir-transport.org/wp-content/uploads/2016/07/Etude-CATP-2016.pdf>

⁴⁸ <http://www.busetcar.com/bus-electrique-hess-innove-solution-tosa-dabb/>

⁴⁹ rts.ch/info/regions/geneve/9162599-mise-en-service-court-circuit-tee-pour-le-bus-tosa-100-electrique-a-geneve-.html



Figure 7 : bus TOSA et sa station de recharge rapide à l'arrêt⁵⁰

Un moyen nettement plus discret de recharger ces bus à recharges rapide est de le faire par induction. En 2014⁵¹ Scania a développé cette technologie pour la ville de Södertälje (Suède). C'est en 2016⁵² qu'elle a inaugurée une ligne de 10 km où le bus se recharge en sept minutes au terminus grâce à un chargeur à induction de 200 kW, ce qui permet au bus de parcourir le trajet sans recharger sa batterie de 56 kWh.

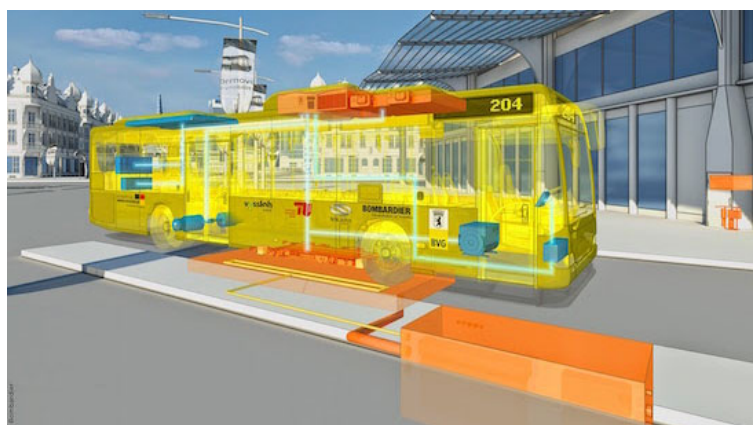


Figure 8 : système de recharge par induction⁵³

Mais Berlin (Allemagne) fut la première ville européenne à tester cette technologie en été 2015⁵⁴ grâce au fabricant Bombardier et à son bus Primove. En janvier 2017⁵⁵ il avait déjà parcouru 500'000 km, permettant ainsi d'économiser 527 tonnes de CO₂. Malheureusement à fin 2017⁵⁶ de nombreux problèmes clouaient ces bus au dépôt et les solutions tardent à venir.

De manière plus anecdotique, on peut mentionner le Gyrobus apparu à Yverdon-les-Bains dans les années 1940, ancêtre des bus électriques à recharges rapides, qui grâce à son volant à inertie de 1500 kg lancé à 3000 tr/min, permettait d'alimenter les moteurs électriques nécessaires à sa propulsion afin de parcourir environ 6 km en mode tout-électrique. L'opération de « remontage » du volant prenait jusqu'à trois minutes aux arrêts grâce à des perches amovibles placées sur le toit du bus, et était possible également en descente.

⁵⁰ Photo : HEIG-VD – HE-ARC

⁵¹ <https://www.scania.com/group/en/wirelessly-charged-city-bus-tested-for-the-first-time-in-sweden/>

⁵² <https://www.connaissancedesenergies.org/recharge-dun-bus-electrique-par-induction-en-suede-161219>

⁵³ http://www.avere-france.org/Site/Article/?article_id=5893

⁵⁴ <http://www.mobilicites.com/011-4062-Berlin-experimente-une-ligne-de-bus-electriques-a-recharge-sans-fil.html>

⁵⁵ <http://www.marketwired.com/press-release/bombardiens-primove-e-buses-pass-500000-km-milestone-tsx-bbd.b-2189312.htm>

⁵⁶ <https://www.golem.de/news/bombardier-primove-die-bvg-hat-probleme-mit-ihren-berliner-induktionsbussen-1711-131001.html>



Figure 9 : essais du Gyrobus à Yverdon en 1950⁵⁷

3.2 Thermique

Les bus à propulsion thermique sont généralement tributaires de carburants d'origine non-renouvelables, et émettent divers polluants atmosphériques. L'évolution technologique tend à améliorer leur efficacité et réduire leur pollution, et la production de « biocarburant » à partir de déchets permet de limiter le recours aux énergies fossiles. C'est toutefois pour son impact climatique, soit l'émission de CO₂, que la propulsion thermique est désormais généralement présentée comme une technologie à remplacer⁵⁸.

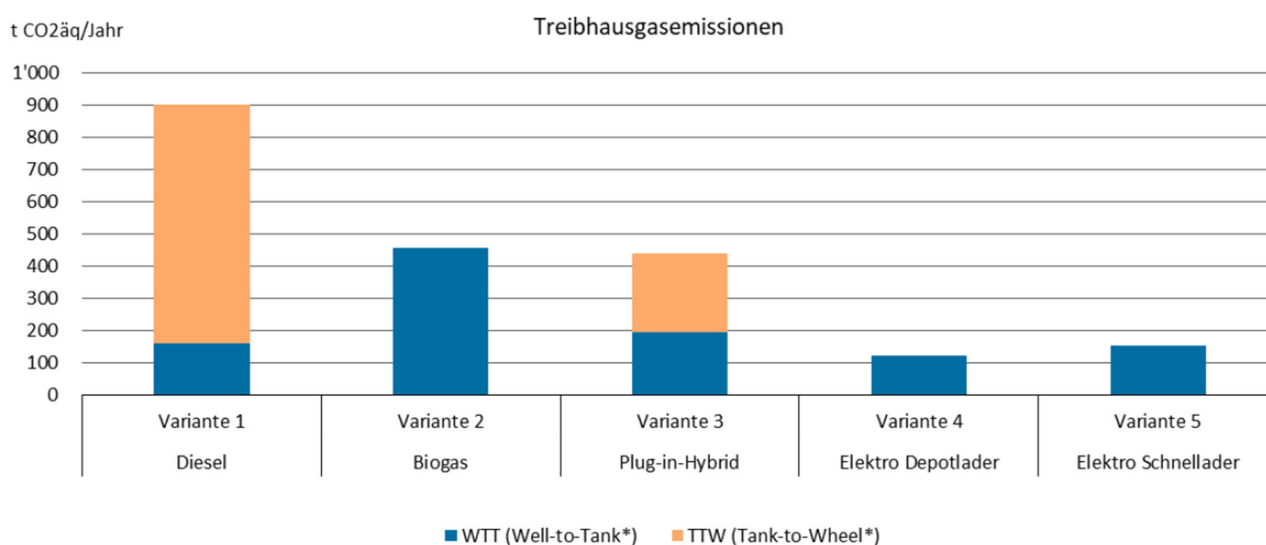


Figure 10 : émissions de CO₂ de variantes thermiques (variantes 1 et 2) hybrides (3) et électriques (4 et 5)⁵⁹

3.2.1 Diesel

Le moteur Diesel, fonctionnant au moyen de carburant fossile issu du pétrole, est la technologie la plus utilisée actuellement pour les bus, mais vouée à être remplacée principalement en raison de ses émissions de CO₂ et de polluants, et de son carburant d'origine non-renouvelable. De nombreux points négatifs viennent entacher le diesel, comme une pollution importante, des nuisances olfactives et sonores, et une mauvaise image auprès

⁵⁷ <http://new.abb.com/news/detail/3321/from-streetcars-to-race-cars-abbs-deep-experience-in-e-mobility>

⁵⁸ <https://www.parlament.ch/fr/ratsbetrieb/suche-curia-vista/geschaeft?AffairId=20193000>

⁵⁹ Infrac, Bus der Zukunft : E-Optionen für die RVBV, 4. Juin 2018.

du public. Ses avantages résident en des coûts d'investissement et de maintenance relativement faibles, d'autant plus que les véhicules diesel ne nécessitent aucune infrastructure particulière, si ce n'est une pompe à carburant et du stockage. La fiabilité et la rentabilité de ce moyen de propulsion n'est plus à prouver, et l'on verra dans les comparaisons de variantes technologiques (chapitre 4) qu'il garde des avantages selon plusieurs critères.

3.2.2 Gaz naturel pour véhicules (GNV ou CNG)

Il s'agit d'un carburant fossile constitué à 90 ou 95% de méthane propulsant un moteur thermique d'architecture classique et respectant les normes Euro VI, mais le tout sans odeur ou fumées. Un avantage de ce carburant pour l'exploitant est son prix moins élevé que le diesel⁶⁰. Généralement comprimé à 200 bar, il rend indispensable une infrastructure de conditionnement. Il existe des risques importants en cas d'incendie⁶¹ qui imposent des normes de sécurité sévères.

3.2.3 Bio gaz naturel (BioGNV)

Il s'agit de la version renouvelable du GNV appelée biométhane, produite à partir de déchets fermentescibles, donc ne concurrençant pas l'alimentation. Permet de rouler aux eaux usées et graisses de restaurants⁶². La chaîne de magasin Carrefour⁶³ utilise par exemple les déchets de ses supermarchés pour alimenter ses camions. Ce carburant peut être fabriqué dans le pays d'exploitation des bus, d'où une indépendance énergétique, mais il doit être purifié avant d'être utilisé⁶⁴. Dans une enceinte fermée sans oxygène, la décomposition de déchets tels qu'agroalimentaires ou industriels génère du biogaz qui est transformé en biométhane.

Technologie malheureusement pas assez exploitée (sauf en Suède), qui permet de rentabiliser une source d'énergie disponible (le méthane), responsable en grande partie de l'émission globale de gaz à effet de serre. La raison se trouve peut-être dans le fait que dans certains pays, le bioGNV doit d'abord être injecté dans le réseau de gaz de la ville avant de pouvoir être utilisé dans les transports, ce qui pénalise son intérêt.

3.2.4 Gaz naturel liquéfié (GNL)

Le GNL occupe un volume inférieur de 600 fois à celui du GNV pour un même pouvoir calorifique⁶⁵. Ce moyen de propulsion est extrêmement peu répandu, du fait du faible nombre de véhicules disponibles chez les constructeurs et des rares stations de charge existantes. Le stockage demande de lourds moyens, puisqu'il y a évaporation de l'ordre de 1% en masse par jour.

3.2.5 Gaz de pétrole liquéfié (GPL)

Ce gaz est facile à transporter et à stocker car liquéfié à basse pression. Il pollue cinq fois moins que l'essence⁶⁶ et procure une nette réduction des émissions polluantes par rapport à un diesel (65 à 80%⁶⁷). Par contre, la consommation est jusqu'à deux fois supérieure à un moteur diesel⁶⁸.

⁶⁰ <https://www.gazprom-energy.fr/gazmagazine/2017/10/gaz-naturel-vehicules-bus/>

⁶¹ <https://www.ledauphine.com/isere-sud/2010/03/25/un-bus-au-gaz-d-s-embrasse-l-auroroute-coupee>

⁶² <http://geopolis.francetvinfo.fr/biogaz-en-suede-les-bus-de-stockholm-roulent-grace-aux-eaux-usees-84063>

⁶³ https://www.lesechos.fr/20/05/2014/LesEchos/21691-101-ECH_en-france--bus-et-camions-commencent-a-rouler-au-gaz.htm

⁶⁴ https://www.vd.ch/fileadmin/user_upload/themes/environnement/energie/fichiers_pdf/CECV_Glossaire.pdf

⁶⁵ <https://www.gazprom-energy.fr/gazmagazine/2015/07/gnl-gpl-gnv-differences-usages/>

⁶⁶ <http://www.leparisien.fr/yvelines/les-nouveaux-bus-roulent-au-gpl-14-12-2001-2002658013.php>

⁶⁷ <https://www.transbus.org/dossiers/gpl.html>

⁶⁸ <https://www.lemoniteur.fr/articles/bus-propres-quelle-filiere-choisir-393153>

3.2.6 Biodiesel

Ce carburant existe en version B20 (20% de biodiesel et 80% de diesel) ou B100 (100% de biodiesel)⁶⁹. Provenant notamment d'huiles usagées⁷⁰, ou de colza, huile de palme, etc., le biodiesel souffre d'un manque de compétitivité, puisque la rétrocession financière de la Confédération aux entreprises de transports ne s'effectue que si la part de biodiesel n'excède pas les 7%, le biodiesel étant déjà subventionné à la production. De plus, les constructeurs demandent de longues périodes d'acclimatation et de tests dans le cas d'une augmentation de la concentration de biodiesel.

3.2.7 Hythane

Les bus à hythane sont généralement modifiés à partir de bus GNV. Il s'agit d'une combinaison de gaz naturel (80%) et d'hydrogène (20%). L'hydrogène améliore la combustion du gaz naturel et permet de réduire à la fois la consommation et les émissions polluantes par rapport à un GNV classique, jusqu'à 9%⁷¹. Le mélange est réputé aussi stable⁷² que le gaz naturel.

3.2.8 Bioéthanol

L'ED95 utilisé est un mélange d'éthanol (95%) et d'additif non pétrolier (5%) destiné en priorité aux bus. Son énorme désavantage réside au niveau de la provenance du carburant, car celui-ci utilise des denrées alimentaires telles que maïs, blé et betteraves sucrières. L'on obtient une réduction importante des émissions de CO₂ (jusqu'à 90%), et des particules fines de 70%⁷³, ainsi qu'une amélioration des performances, mais la consommation reste de 30 à 50% plus importante qu'avec un carburant diesel⁷⁴. Ce système est plutôt utilisé dans les pays d'Amérique du Sud.

3.2.9 Turbine à gaz

Une version expérimentale d'un bus équipé d'une turbine à gaz datant des années 1950, le GM Turbocruiser⁷⁵, fut vite abandonnée en raison d'une trop grande consommation et pollution. GM pensait à l'époque que si la turbine s'imposait sur les véhicules, cela serait le cas en premier lieu sur les véhicules lourds⁷⁶ ce qui est correct en principe. Le bruit n'était pas non plus son point fort.

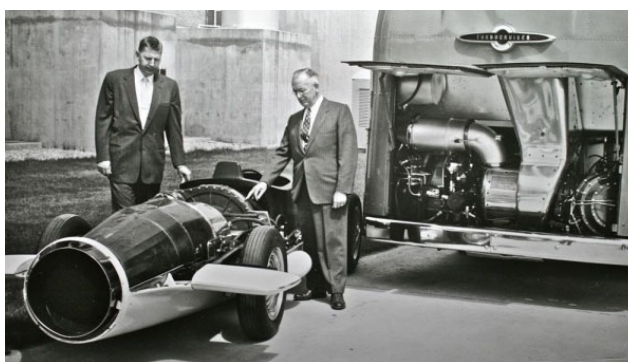


Figure 11 : premier bus à turbine à gaz en 1953⁷⁵

⁶⁹ https://www.cmu.edu/energy/education-outreach/public-outreach/17-104%20Policy%20Brief%20Buses_WEB.pdf

⁷⁰ <https://www.biomassesuisse.ch/fr/biodiesel>

⁷¹ <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/lhythane-carburant-du-futur-3858/>

⁷² <http://www.cleantechrepublic.com/2011/02/22/hythane-premiere-etape-hydrogene-transports/>

⁷³ https://www.bioethanolcarburant.com/nos_dossiers/ed95-un-biocarburant-au-format-poids-lourd/

⁷⁴ <http://www.raisinor-bioethanolavance.com/ethanol-diesel95>

⁷⁵ <http://theoldmotor.com/?p=33461>

⁷⁶ <http://forum.bustalk.info/viewtopic.php?p=14905&sid=a5337b1ef2573eb6655e6643210faece>

Dans le même registre motorisé, et à titre de curiosité, le « Golden Dolphin » en 1956 était théoriquement un bus capable d'atteindre la vitesse de 200 km/h grâce à sa turbine à gaz et sa forme futuriste, prévu pour les voyages internationaux et les liaisons rapides⁷⁷.



Figure 12 : prototype futuriste en 1956 de bus longues distances⁷⁷

3.3 Hybride

Les technologies hybrides combinent une motorisation électrique (batterie et moteur électrique) et thermique, cumulant les avantages des deux modes. Une explication simple consiste à dire qu'à basse vitesse, c'est le moteur électrique qui transmet son énergie à la roue, tandis que le moteur thermique propulse le véhicule lorsqu'une puissance plus importante est nécessaire. La motorisation hybride permet la récupération d'énergie en décélération ou au freinage par accumulation dans la batterie, un avantage qui réduit encore sa consommation et ses émissions.

On distingue deux catégories d'hybrides selon le type de connexion entre les moteurs et la transmission :

- Série
- Parallèle

Avec le système « série », le moteur (thermique) est couplé à un générateur afin d'alimenter directement le moteur électrique relié aux roues. Dans un hybride « série », il n'y a ainsi pas de lien mécanique entre la roue et le moteur thermique, ce qui permet à ce dernier de travailler à son régime optimal, indépendamment de la vitesse de la roue. La récupération de l'énergie en décélération ou au freinage est stockée dans la batterie (ou super-condensateurs) et restituée au bus lors des démarrages et à basse vitesse, alors que le moteur thermique est coupé, et ne redémarre que lorsque l'énergie électrique fait défaut.

Le système « parallèle » place le moteur thermique et le moteur électrique en parallèle dans le schéma de traction. Grâce à leur combinaison directe sur l'axe de roue, les deux moteurs sont mécaniquement liés aux roues du véhicule et peuvent être pilotés selon différentes stratégies et permettent également la récupération d'énergie au freinage. Selon la typologie de parcours analysé, ils consomment et polluent moins⁷⁸ que leurs homologues « série ». Pour les bus, il semble que ce système s'impose en raison de son efficacité entre 10 et 30 km/h, qui correspond aux vitesses des bus urbain⁷⁹.

3.3.1 Electrique et diesel

Il s'agit probablement de la technologie hybride la plus répandue. La récupération d'énergie au freinage, et la propulsion électrique à faible vitesse et au démarrage sont les grands atouts de l'hybride diesel-électrique, particulièrement utile dans les centres urbains. Il ressort de nos entretiens que cette technologie est

⁷⁷ <https://superretro.com/the-golden-dolphin-as-designed-by-ricciotti-tonon-in-1956-a-gas-turbine-powered-bus-capable-of-cruising-at-125-mph-thought-for-international-tourism-and-fast-connections/>

⁷⁸ <http://www.catp.fr/wp-content/uploads/2017/09/Etude-comparative-des-diff%C3%A9rentes-motorisations-de-bus-2017.pdf>

⁷⁹ http://www.swisscamion.ch/archives/2014/3/SC_3_2014_FR_TOTAL.pdf

généralement considérée comme une technologie de transition ou une solution de court ou moyen terme, offrant un bon potentiel d'économie de carburant, et de réduction des émissions de CO₂.

3.3.2 Electrique et GNV

Cette technologie est similaire à l'hybride diesel/électrique, avec l'avantage du bus à gaz qui émet moins de polluants. Les problèmes d'infrastructure sont les mêmes que pour la propulsion obtenue uniquement par gaz naturel. Monté en série avec un moteur électrique, il lui sert de « range extender »⁸⁰.

3.3.3 Electrique et micro-turbine

Pouvant être alimentée au biogaz, GPL, GNV ou diesel⁸¹, la turbine permet jouer avec l'état de charge de la batterie tampon de quelques dizaines de kWh, batterie qui fournit l'énergie de traction du bus⁸². Cette solution permet de faire tourner le plus souvent possible la turbine au point de fonctionnement à rendement maximum, réduisant les émissions de CO₂ par rapport à un bus diesel et diminuant la consommation en carburant par rapport aux flottes de bus hybrides classiques⁸².

Un tel système a été testé à New York en 2009 et 2010⁸³. La faible puissance de la turbine – 30 kW – n'a pas permis de répondre avec succès aux sollicitations prévues, et la pose d'une turbine plus puissante de 65 kW a entraîné des problèmes de fiabilité qui ont entraîné l'arrêt définitif du projet, malgré des qualités certaines au niveau du silence de fonctionnement⁸⁴.

3.3.4 Electrique et hydrogène

Une pile à combustible fonctionnant à l'hydrogène alimente en série des moteurs électriques. Une batterie peut également être utilisée comme réservoir tampon afin de stocker l'énergie de récupération au freinage. Le gros avantage de ce moyen de propulsion est que le carburant est fabriqué « à la demande » à bord par la pile à combustible. Elle ne dégage que de la vapeur d'eau et permet donc une réduction importante des émissions de CO₂, mais le procédé de transformation est coûteux en énergie. Il existe des solutions pour diminuer cet impact négatif, comme le fait d'utiliser l'énergie solaire pour produire l'hydrogène⁸⁵. Il ne faut pas oublier que pour transporter en camion 1 kg d'hydrogène, il faut compter sur une cuve de 100 kg en acier, d'où la nécessité de produire l'hydrogène localement.

Un manque de fiabilité des compresseurs d'hydrogène est la cause la plus courante de panne des stations de recharge⁸⁶. Le prix est également un point négatif, ce qui pénalise la rentabilité du bus, malgré une réduction du coût d'achat des véhicules, qui a été divisé par quatre en 25 ans⁸⁷. En revanche, les bus utilisant cette technologie sont trois fois plus silencieux que les véhicules diesel⁸⁸.

⁸⁰ <http://www.gaz-mobilite.fr/actus/bus-hybrides-gnv-retour-experience-ville-barcelone-1358.html>

⁸¹ <https://www.lemoniteur.fr/articles/mettez-une-turbine-dans-le-moteur-300807>

⁸² <https://www.greencarcongress.com/2007/10/microturbine-se.html>

⁸³ <http://secondavenuesagas.com/2011/02/03/end-of-the-designline-for-new-buses/>

⁸⁴ https://www.greencarreports.com/news/1054947_jaguar-style-turbine-hybrid-buses-not-up-to-nyc-service-sadly

⁸⁵ <https://www.scania.com/ch/fr/home/experience-scania/news-and-events/News/archive/2016/08/asko.html>

⁸⁶ https://www.coop.ch/content/dam/Medien/Medienmitteilung/2016/Coop-eroeffnet-erste-oeffentliche-Wasserstofftankstelle/Factsheet_Tankstelle_F.pdf

⁸⁷ <http://www.afhypac.org/documents/tout-savoir/Fiche%209.2%20-%20Les%20bus%20H2%20rev.sept2016%20Th.pdf>

⁸⁸ <http://old.agoria.be/www.wsc/rep/prg/ApplContent?SessionLID=2&vUserID=999999&ENewsID=100045>



Figure 13 : car postal fonctionnant grâce à de l'hydrogène et une pile à combustible³⁰

Les bombonnes d'hydrogène comprimé à haute pression (souvent 350 ou 700 bar) disposées sur le toit ont une certaine tendance à effrayer l'opinion publique. Toutefois, moyennant des précautions basiques d'usage, les risques sont très limités, comme le confirment les exploitants de ces bus. Des soupapes de sécurité permettent de libérer le gaz en cas de surpression.

A noter que, en cas de catastrophe naturelle par exemple, ces bus peuvent servir de générateur de secours⁸⁹, ce qui est pratiqué au Japon.

Une évolution pourrait améliorer la sécurité et la rentabilité du système, le stockage « LOHC », qui tire parti de la propriété chimique de l'hydrogène de se fixer sur des éléments métalliques. Il faut toutefois parvenir à limiter voire tirer parti de l'inconvénient de cette technologie, à savoir la gestion de la chaleur produite ou extraite pendant le stockage ou la restitution de l'hydrogène, de l'ordre de -200°C. : Un deuxième problème soulevé est liée à la composition de cette solution chimique, donc des risques accrus de manutention, une gestion des déchets produits et des réactions chimiques secondaires. Mais la principale limite actuellement est le faible degré de maturité du système, qui est toujours à l'étude actuellement et n'est qu'une intention sur les bus⁹⁰.

3.3.5 Electrique et solaire

Des panneaux solaires sont installés sur le toit du bus et servent de « range extender » aux batteries qui alimentent les moteurs électriques. Cette technologie reste réservée bien sûr aux endroits très ensoleillés. L'Ouganda a mis au point un véhicule de ce type nommé Kayoola⁹¹, permettant de transporter 35 personnes et de parcourir jusqu'à 12 km uniquement avec l'énergie du soleil⁹². Il contient une batterie de 70 kWh alimentant un moteur de 150 kW. La batterie de ce bus en particulier lui permet de parcourir 80 km.

⁸⁹ <http://www.automobile-propre.com/breves/toyota-un-bus-hydrogene-japon/>

⁹⁰ https://www.h2fc-fair.com/hm18/images/forum/tf/03di/10.20_Hydrogenious%20Technologies_HMI2018.pdf
et https://www.tvt.cbi.uni-erlangen.de/LOHC-LKW_Bericht_final.pdf

⁹¹ <http://kiiramotors.com/new/wp-content/uploads/Kayoola%20Solar%20Bus%20V10%20Magazine.pdf>

⁹² <http://bfmbusiness.bfmtv.com/entreprise/ce-pays-d-afrique-a-concu-son-propre-bus-solaire-949009.html>



Figure 14 : bus solaire africain⁹³

L'Ouganda bénéficie d'un ensoleillement annuel moyen d'environ 2000⁹⁴ kWh/m², loin devant ce que l'on peut trouver en Suisse, à savoir une moyenne de 1150 kWh/m² sur le plateau, et 1400 kWh/m² en Valais⁹⁵. Par conséquent un tel bus ne paraît pas spécialement bien adapté à nos contrées. Néanmoins avec le développement et l'utilisation de panneaux solaires de haute qualité, il serait envisageable d'appliquer cette technologie à certaines régions afin de bénéficier de quelques kilomètres d'autonomie en plus.

3.3.6 Electrique, diesel et hydraulique

Une curiosité a fait son apparition sur le marché français, le Businova : un bus d'une taille maximum de 12 m multi-hybride couplant en parallèle à la fois un moteur électrique de 250 kW, et un moteur hydraulique de 110 cm³. Enfin, un moteur thermique de 80 kW sert de « range extender ». Le tout est connecté à une batterie de 132 kWh lui permettant une autonomie de 200 km.



Figure 15 : nouveauté intéressante avec le multi-hybride⁹⁶

Ce bus est censé réduire la consommation et les émissions polluantes de façon significatives, mais dans l'attente de tests concrets et de retours d'expérience, ce dispositif est plutôt à voir comme une curiosité, mettant en avant une propulsion multi-hybride qui pourrait se révéler intéressante dans le futur, quoique compliquée, à l'heure où la technologie « simple » de bus à batterie évolue rapidement.

⁹³ <http://www.innogencepulse.com/kayoola-premier-bus-solaire-dafrique/>

⁹⁴ <http://www.greenrhinoenergy.com/solar/radiation/empiricalevidence.php>

⁹⁵ <https://www.icstech.ch/energie-solaire/solaire-photovolta%C3%AFque/>

⁹⁶ https://actu.fr/hauts-de-france/abbeville_80001/un-bus-electrique-dans-les-rues-a-lessai-samedi-13-mai_10135500.html

4. Evaluation des variantes

Cette section présente les critères qui permettront de définir les moyens de propulsion les plus intéressants. Ils sont classés de un (mauvais) à cinq (excellent) et cinq catégories principales :

- Performances : capacités des bus dans les différentes situations
 - Puissance de propulsion
 - Autonomie
 - Consommation énergétique
- Nuisances : aspects sociaux-environnementaux
 - Bruit
 - Pollution
 - Impact visuel
- Exploitation : éléments importants à ne pas perdre de vue pour l'exploitant
 - Gamme de capacité
 - Disponibilité
 - Maturité technologique
 - Flexibilité
- Usager : l'utilisateur étant l'utilisateur principal des bus, il convient de ne pas l'oublier avec des notions de confort ressenti et d'image véhiculée par la technologie
 - Confort
 - Image
- Economie : partie financière comprenant les bus et l'infrastructure
 - Coût d'achat véhicule
 - Coût d'achat infrastructure
 - Coût d'usage

Les graphiques des différentes technologies se trouvent en annexe à ce rapport. Les variantes technologiques retenues sont les suivantes :

- Trolleybus
- Trolleybus à batterie
- Bus à batterie conventionnel
- Bus à batterie à recharges rapides
- Diesel
- Gaz naturel
- Hybride diesel/électrique
- Hybride hydrogène/électrique

Ces variantes ont été retenues selon ce qu'il est possible d'implémenter dans notre pays, en considérant l'approvisionnement de carburant, le profil d'utilisation, le potentiel d'avenir de la technologie, etc. Ce resserrement des possibilités n'est donc pas subjectif, mais permet de centrer la réflexion sur le marché suisse.

4.1 Performances

4.1.1 Performance du système de traction

La puissance de propulsion est une caractéristique importante à prendre en considération, en particulier suivant la topographie du terrain. Disposer d'une réserve de puissance est en effet indispensable dans les fortes pentes que l'on trouve dans certaines villes, ou à la montagne.

Au niveau des performances, le trolleybus s'en sort le mieux grâce à ses moteurs électriques pouvant atteindre une puissance totale de plus de 300 kW. Il profite d'un couple instantané important au démarrage. Il en va ainsi pour les bus électriques de manière générale qui disposent d'un à deux moteurs de 100 à 150 kW suivant leur taille. C'est pour cette raison qu'ils sont privilégiés dans des villes à fortes dénivellations. Grâce à leurs accélérations plus franches, ils gagnent en vitesse commerciale comparativement aux véhicules dotés de moteurs thermiques. Certains trolleybus ou bus articulés se permettent même le luxe de disposer de la traction sur deux essieux, ce qui est un avantage intéressant en Suisse lorsque les routes sont glissantes et de surcroît en pente.

La puissance du bus hybride hydrogène/électrique va dépendre bien sûr de la puissance de sa pile à combustible, qui est généralement de l'ordre de 100 kW. Il est possible d'en combiner deux (et à terme peut-être plus), afin de fournir une puissance supérieure à 200 kW. Il existe en effet déjà depuis 2009 un bus de 300 kW développé par Hyundai⁹⁷, dont la prochaine génération prévue prochainement devrait améliorer encore plus les performances. D'une manière générale, les constructeurs ont bien compris la nécessité de développer des piles à combustible de forte puissance, comme le montrent les récents progrès faits dans ce domaine, car ce type de bus ne peut pas répondre à l'heure actuelle à tous les besoins en termes de puissance.

Le moteur diesel est également une source efficace de propulsion, puisque son moteur développant jusqu'à 280 kW assure un franchissement de fortes pentes, mais il est obligé alors de fonctionner à pleine puissance, circonstance où il est le plus bruyant, ce qui pose des problèmes dans les zones urbanisées. Sa puissance motrice est légèrement inférieure à celle des trolleybus à deux moteurs, mais cela ne le pénalise pas de façon drastique.

Les bus au gaz naturel disposent également d'une puissance intéressante pouvant atteindre les mêmes valeurs que les moteurs diesels, leur permettant ainsi de répondre aux différentes conditions d'exploitations qu'ils peuvent rencontrer.

L'inconvénient du bus hybride diesel/électrique est qu'il ne dispose pas d'un puissant moteur diesel (généralement moins de 175 kW), et d'un seul moteur électrique (généralement de maximum 150 kW). Le problème avec cette configuration, est son handicap dans les fortes pentes, qui peut même se trouver rédhibitoire dans certaines villes. Dans un bus hybride, la quantité d'énergie électrique disponible, afin de soutenir la puissance thermique, est limitée, ce qui diminuerait l'intérêt de ce type de propulsion, dans des applications avec des fortes accélérations en pente répétées et/ou des applications avec des trajets sur routes à trafic rapide.

Le tableau trois résume l'évaluation de ce critère « puissance » pour les différentes technologies prises en considération (de 1 = faible performance ; à 5 = forte performance).

Technologie	Appréciation
Trolleybus conventionnel	5
Trolleybus à batterie	5
Bus à batterie conventionnel	5
Bus à batterie à recharges rapides	5
Diesel	4
Gaz naturel	4
Hybride diesel/électrique	3
Hybride hydrogène/électrique	3

Tableau 3 : évaluation du critère de performance

⁹⁷ http://www.cte.tv/wp-content/uploads/2016/12/4_Jeon.pdf

4.1.2 Autonomie

L'autonomie est bien sûr un point-clé dans le choix d'une technologie. Suivant le profil d'utilisation, certaines technologies ne sont tout simplement pas assez avancées à l'heure actuelle pour répondre aux besoins. L'autonomie (ou rayon d'action) est définie ici comme étant la distance que peut parcourir le bus entre deux points de recharge, lui permettant d'augmenter à nouveau son rayon d'action. Un lien existe avec le critère de disponibilité (section 4.3.2), car une grande disponibilité peut compenser dans une certaine mesure une faible autonomie.

Le dilemme auquel doit faire face le bus électrique est le suivant : pour gagner en autonomie, il faut ajouter des batteries, or cela augmente la masse du véhicule, ce qui à son tour réduit l'autonomie. A l'heure actuelle la technologie progresse de façon rapide, ce qui impacte moins le fait de rajouter des batteries pour gagner en autonomie. Certains constructeurs l'ont compris, car avec 256 kWh de batteries, Hyundai⁹⁸ promet une autonomie de 290 km, ce qui pourrait correspondre à une journée normale de trajet urbain, mais sans préciser les conditions dans lesquelles a été obtenu ce chiffre. A l'extrême, le chinois BYD a livré en 2017⁹⁹ aux Etats-Unis un bus de 12 mètres embarquant 547 kWh de batteries lui permettant ainsi de parcourir 440 km avec une seule charge, idéal pour les trajets régionaux, et très probablement peu vallonnés sur des routes droites. A ce petit jeu, Proterra remporte la partie avec un bus embarquant 660 kWh de capacité qui lui a permis de battre le record du monde de distance en 2017, avec 1172 km, dans des conditions également inconnues. Les minibus tout-électriques quant à eux ne disposent pas de beaucoup d'autonomie, de l'ordre de 120¹⁰⁰ km, et cela chez plusieurs fabricants différents¹⁰¹.

Un bus à batterie conventionnel, embarquant donc une grande quantité de batteries, verra ces dernières perdre de la capacité au fil des années d'exploitation, réduisant ainsi son autonomie, ce qui pourrait rendre nécessaire l'ajout de bus supplémentaires pour compenser la réduction du temps de travail possible du bus. Ce problème est moins marqué avec les bus à recharges rapides puisque leur sollicitation est moins importante (la batterie subit moins de cycles complets de charge/décharge).

La différence principale entre les bus tout-électrique et les bus à batteries à recharges rapides est bien sûr la quantité de batteries embarquée. Un bus électrique classique embarquera généralement au moins 350 kWh de batteries, alors qu'un bus électrique à recharges rapide peut se contenter d'environ 70 kWh, soit moins qu'une voiture Tesla Model S !¹⁰² Sachant que les batteries ont une densité d'énergie de l'ordre de 0.1 kWh/kg, l'économie de masse réalisée se monte à presque trois tonnes, soit la masse de 40 passagers de corpulence moyenne, à déplacer en tout temps, y compris lorsque le bus est vide. Il faut aussi tenir compte du fait que le toit du bus ne peut pas accueillir une quantité infinie de batteries, ainsi que de tous les problèmes annexes liés à une telle quantité de batterie, développés plus loin dans ce rapport.

Il est clair qu'un bus à recharges rapides ne sera pas adapté à de longs trajets puisque son autonomie n'est que de 25 km environ (suivant la saison et donc la consommation d'auxiliaires), et qu'il faut ensuite le recharger complètement pour pouvoir parcourir à nouveau cette distance. Néanmoins, avec l'évolution de la technologie des batteries, il n'est pas improbable que ces véhicules puissent se comporter de plus en plus comme des bus tout-électrique sur toute la longueur d'un parcours, et se passer ainsi des stations de recharge intermédiaires dans un futur proche. Mais il faut aussi considérer l'autre côté des choses, avec une diminution

⁹⁸ <https://fr.motor1.com/news/147435/bus-electrique-hyundai/>

⁹⁹ <https://electrek.co/2017/05/04/byd-all-electric-bus/>

¹⁰⁰ <http://www.bluebus.fr/caracteristiques-techniques>

¹⁰¹ https://www.transbus.org/construc/gepebus_oreos2x.html

¹⁰² https://fr.wikipedia.org/wiki/Tesla_Model_S

assurée de l'autonomie des batteries avec le temps du fait d'une utilisation plus intensive (cycles de charge/décharge plus importants).

Un autre élément néfaste à l'autonomie et qui est développé au point 4.1.3 est la diminution de la capacité des batteries en hiver à cause du froid, mais également en raison du chauffage qui est responsable d'une quantité importante d'énergie consommée.

Le trolleybus est à mettre à part, puisque tant qu'il dispose de courant, il peut rouler. En cas de coupure, il peut se rabattre sur sa génératrice diesel ou ses batteries embarquées afin de parcourir de très faibles distances, lors de travaux sur une ligne de contact par exemple, ou de fermeture de route. Mais sans caténaire son autonomie est globalement quasi-nulle.

Le trolleybus à batterie est également limité, puisqu'à l'image du bus électrique à recharges rapides, il est constamment dépendant de la taille de sa batterie embarquée. Celle-ci se situe plutôt entre 40 et 50 kWh, ce qui lui permet de parcourir une quinzaine de kilomètres, suivant les conditions, avant de devoir « re-percher » sur des caténaires pour se ravitailler. Cette faculté à se recharger en roulant est un avantage notable de disponibilité par rapport à toutes les autres technologies.

Un bus diesel classique peut parcourir jusqu'à 450 km avec un plein complet en parcours régional, et jusqu'à 300 km en milieu urbain, ce qui lui permet de facilement tenir ses engagements sur une journée complète. Son faible rendement énergétique est compensé par le haut pouvoir calorifique de son carburant et d'un stockage à bord important. Les minibus diesels disposent eux d'une autonomie très importante, dépassant largement les 500 km et se rapprochant des voitures particulières dont certaines peuvent parcourir 1000 km.

L'hybride diesel/électrique permet une réduction de consommation et donc une augmentation de l'autonomie, comme cela a été démontré au chapitre 2 (état de l'art), avec de nombreuses expériences positives. Certains bus hybrides diesel/électriques peuvent parcourir plus de 30 km en mode tout électrique, n'utilisant leur moteur diesel que dans de rares occasions. En revanche, les minibus hybrides permettant de transporter entre 20 et 30 passagers ne possèdent qu'une autonomie très limitée, d'environ 100 à 120¹⁰³ km, ce qui est nettement inférieur aux minibus diesels.

Les bus au gaz naturel profitent d'une autonomie supérieure aux bus diesels, puisque celle-ci peut atteindre 500¹⁰⁴ à 600¹⁰⁵ km à taille identique. Elle va dépendre, tout comme l'hydrogène, du nombre de bouteilles embarquées. L'autonomie de ces bus se doit d'être importante, puisqu'ils ont une consommation de carburant nettement plus élevée que les autres moyens de propulsion alternatifs envisagés ici.

L'autonomie des bus hybrides hydrogène/électrique est difficile à évaluer tant les chiffres varient et sont difficiles à trouver. La Poste rapporte¹⁰⁶ une autonomie de 400 à 600 km, les autres constructeurs tablent plutôt sur une autonomie de 200 à 300¹⁰⁷ km. Le tout sans en préciser les conditions d'occupation, la capacité de la batterie, ni de profil de conduite, topographie, etc. Il faut tout de même constater que l'autonomie ne permet pas de choisir aveuglément un modèle de bus hydrogène, bien qu'il ait été démontré dans le cadre du projet¹⁰⁸ Clean Hydrogen In european Cities portant sur 2010 à 2016 que sur un éventail de 54 bus de 12 mètres, l'autonomie moyenne mesurée s'est révélée supérieure à 350 km, soit quasiment l'équivalent des bus

¹⁰³ http://www.avery-france.org/Site/Category/?arborescence_id=96

¹⁰⁴ <https://www.bus.man.eu/ch/fr/bus-urbains/man-lions-city-cng/technique-et-environnement/technique-et-environnement/Technique-et-environnement.html>

¹⁰⁵ <https://www.francebleu.fr/infos/transports/un-bus-qui-roule-uniquement-au-gaz-naturel-1516294300>

¹⁰⁶ <https://movi-mento.ch/fr/menu/2017/les-bus-a-hydrogene-ne-sont-pas-encore-rentables.html>

¹⁰⁷ <http://bfmbusiness.bfmtv.com/entreprise/la-premiere-ligne-de-bus-a-hydrogene-en-france-circulera-a-pau-1250270.html>

¹⁰⁸ <http://erh2-bretagne.strikingly.com/blog/le-projet-europeen-de-bus-hydrogene-chic-rapport-final>

diesels. De même, des minibus fonctionnant avec cette technologie se montrent très économes (sur le papier tout du moins), avec 500¹⁰⁹ km d'autonomie annoncés.

Le tableau quatre résume l'évaluation du critère « autonomie » pour les différentes technologies.

Technologie	Appréciation
Trolleybus conventionnel	1
Trolleybus à batterie	2
Bus à batterie conventionnel	3
Bus à batterie à recharges rapides	2
Diesel	4
Gaz naturel	5
Hybride diesel/électrique	4
Hybride hydrogène/électrique	4

Tableau 4 : évaluation du critère d'autonomie

4.1.3 Consommation énergétique

La consommation d'énergie, calculée en kilowattheures par kilomètre est liée au rendement de la chaîne de traction, et tient compte également de la consommation des auxiliaires (chauffage, p.ex.). Dans cette analyse ne figurent que les consommations brutes des véhicules : le bilan « du puits à la roue » (well-to-wheel en anglais, ou WTW) est ignoré car dépendant de la source d'approvisionnement.

Le critère consommation, comprend également la capacité des systèmes de récupérer de l'énergie, que ce soit au freinage ou en descente. L'envoi d'énergie dans le réseau de la part d'un trolleybus peut atteindre 20% de sa consommation totale en période estivale. Cette énergie est généralement déjà incluse dans les chiffres de consommation énergétique fournis, et moyennée sur l'année.

Les trolleybus, mais aussi les bus fonctionnant à l'électricité en général, sont donc extrêmement compétitifs du fait du haut rendement de leur chaîne de traction. L'énergie de récupération peut ensuite soit être stockée à bord et utilisée lors des démarrages si le bus dispose de batteries de stockage, directement réinjectée dans le réseau, ou encore dissipée dans une résistance électrique pouvant dans certains cas être utilisée pour chauffer le bus en hiver. Il est ici intéressant de valoriser au maximum la production d'énergie ou de chaleur « perdue » à bord des bus. La consommation d'énergie de ces grands bus électrifiés est de l'ordre de 2.5 à 3.5 kWh/km en tenant compte des auxiliaires, et de 0.9 à 2 kWh/km pour les plus petits. Ce qui fera varier les valeurs entre les différents bus est principalement la manière dont sont alimentés les auxiliaires.

La consommation des bus diesel s'étale de 0.2 pour les minibus, à 0.7 l/km pour les plus gros, avec des variations toujours suivant le profil d'exploitation, et l'ancienneté. Sachant que le pouvoir calorifique inférieur (PCI) du diesel est de 10.6 kWh/l, la consommation au kilomètre vaut :

$$\begin{cases} C_{diesel,min} = 10.6 \cdot 0.2 = 2.12 \left[\frac{kWh}{km} \right] \\ C_{diesel,max} = 10.6 \cdot 0.7 = 7.42 \left[\frac{kWh}{km} \right] \end{cases}$$

Le bus diesel ne permet pas en revanche la récupération d'énergie en descente ou au freinage, ce qui est un énorme désavantage, sachant ce que l'on peut gagner dans ce secteur. Il pourrait, grâce à un système de récupération d'énergie cinétique, pallier quelque peu à ce manque, mais vu les travaux que cela impliquerait, il est peu probable qu'un financement soit investi dans cette innovation technologique.

¹⁰⁹ http://french.china.org.cn/business/txt/2017-11/20/content_50064852_2.htm

Un bus au gaz naturel consomme entre 0.4 et 0.8 Nm³/km de gaz, mais les valeurs constatées se situent plutôt dans la moitié supérieure de cette fourchette dans des conditions similaires à nos contrées. En utilisant un PCI du gaz naturel standard de 10.5 kWh/Nm³, on obtient :

$$\begin{cases} C_{\text{gaz naturel}, \min} = 10.5 \cdot 0.4 = 4.20 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{km}} \right] \\ C_{\text{gaz naturel}, \max} = 10.5 \cdot 0.8 = 8.40 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{km}} \right] \end{cases}$$

Idéalement il faudrait tenir compte de la nécessité de compresser le gaz naturel à 200 bar pour son stockage sur véhicule, ce qui consomme d'avantage d'énergie. On le voit, ce moyen de propulsion n'est pas spécialement rentable. Il tire principalement son épingle du jeu grâce au coût du carburant inférieur au diesel.

Pour l'hydrogène le problème est similaire, et il existe plusieurs méthodes de stockage :

- Comprimer l'hydrogène jusqu'à 700 bar
- Refroidir l'hydrogène jusqu'à -253 °C pour le stocker sous forme liquide (LOHC)

La seconde méthode en est encore à un stade expérimental, et c'est donc l'hydrogène comprimé qui est à ce jour la technologie développée dans les transports. Comme pour le gaz naturel, l'énergie nécessaire à la compression ou à la production d'hydrogène, qui est très importante, n'est pas prise en compte dans les mesures de consommation données. Ces bus consomment en moyenne entre 0.1 et 0.14 kg/km d'hydrogène¹¹⁰, mais il n'est pas rare de voir des chiffres de 0.08 kg/km¹¹¹ pour les plus petits bus. Une fourchette de valeurs généralement constatée¹¹² de 0.08 à 0.09 kg/km pour des bus de 12 m, et de l'ordre de 0.13 kg/100km pour ceux de 18 m. En comptant un PCI de l'hydrogène de 33.3 kWh/kg, on obtient :

$$\begin{cases} C_{H_2, \min} = 33.3 \cdot 0.08 = 2.66 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{km}} \right] \\ C_{H_2, \max} = 33.3 \cdot 0.14 = 4.66 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{km}} \right] \end{cases}$$

Sachant l'impact financier de la consommation énergétique d'un bus sur son coût total, on voit bien ici que suivant la consommation utilisée pour les calculs de coût, les résultats peuvent varier fortement. Les constructeurs de bus ne mentionnent pas souvent de façon précise comment les consommations sont calculées ou mesurées. Néanmoins, la consommation ne doit pas être considérée toute seule. Le coût du carburant forme l'autre partie de l'équation pour calculer le coût d'usage de la technologie.

Le tableau cinq ci-après résume les différentes consommations spécifiques. Dans ce tableau, la valeur basse correspond un bus de petite taille, alors que la valeur haute de la plage est plutôt représentative d'un bus de taille plus grande (quand cette option existe dans la technologie en question).

¹¹⁰ <https://www.europe-camions.com/actu-pl/a43771/hydrogene-energie-alternative-viable-2020>

¹¹¹ <https://www.agoria.be/fr/Van-Hool-construit-40-autobus-a-hydrogene-pour-Cologne-et-Wuppertal-Allemagne>

¹¹² http://www.pvi.fr/IMG/pdf/HAMBOURG-Pile_a_combustible.pdf

Technologie	Consommation
	[kWh/km]
Trolleybus conventionnel	2.4 – 3.2
Trolleybus à batterie	
Bus à batterie conventionnel	0.9 – 3.5
Bus à batterie à recharges rapides	2.5 – 3.5
Diesel	2.1 – 7.4
Gaz naturel	4.2 – 8.4
Hybride diesel/électrique	2.4 – 4.7
Hybride hydrogène/électrique	2.7 – 4.7

Tableau 5 : rendement et consommation des moyens de propulsion

La consommation énergétique du système de confort (chauffage, climatisation) est par ailleurs déterminante puisque dans un pays comme la Suisse où les variations de climat sont importantes, ces équipements peuvent entraîner jusqu'à 50% de la consommation totale en énergie. C'est donc un facteur sensible. Il convient de parler de deux types de confort thermique :

- Actif : climatisation, chauffage, ventilation
- Passif : isolation, stockage au dépôt, passagers

Le confort passif est dépendant du bus. A l'image d'une maison, l'économie d'auxiliaire faite peut être importante, en particulier sur la durée de vie d'un bus. Que ce soit en améliorant l'isolation des parois et du toit ou en choisissant des vitres de meilleure qualité, il est possible d'effectuer des économies intéressantes en termes de consommation énergétique. Certaines améliorations pourraient théoriquement être apportées rétroactivement sur des bus diesel anciens, comme par exemple l'isolation thermique des durites de chauffage, ou une isolation amovible du compartiment moteur et du soubassement d'un bus diesel qui permettrait en été d'éviter de chauffer inutilement l'habitacle, ou en hiver justement d'aider à le chauffer. Avantage supplémentaire d'une bonne isolation thermique, l'isolation phonique s'en trouvera également améliorée pour les passagers du bus.

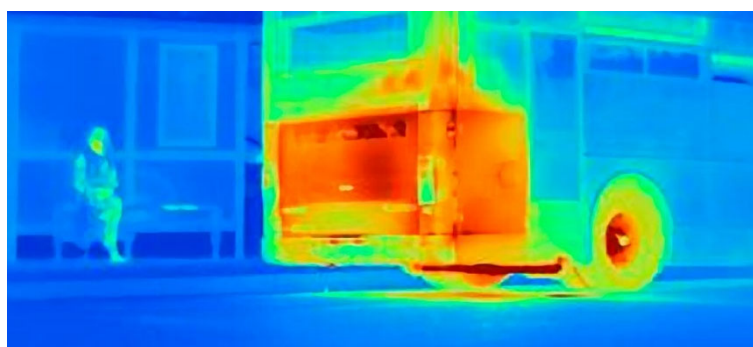


Figure 16 : image thermique d'un bus¹¹³

Pour ce qui est du confort thermique actif, la façon de produire cette énergie auxiliaire varie bien sûr selon le mode de propulsion utilisé. Sachant qu'un moteur thermique classique a un rendement entre 30 et 40%, voire même jusqu'à 45% pour certains moteurs¹¹⁴ (bien que non vérifié), une grande partie des pertes se situe dans le circuit de refroidissement (25%) ainsi que dans les gaz d'échappement (25%). La chaleur perdue dans l'eau de refroidissement peut ainsi être utilisée en hiver pour chauffer les occupants. Sur un moteur diesel

¹¹³ <https://www.gettyimages.ch/detail/foto/thermal-image-of-bus-on-city-street-stock-fotografie/146593955>

¹¹⁴ <https://www.bus.man.eu/ch/fr/bus-urbains/man-lions-city-hybrid/technique/Moteur-et-boite-de-vitesses.html>

développant 250 kW à pleine charge, les pertes dans le circuit d'eau peuvent théoriquement atteindre 62.5 kW, soit plus que l'énergie nécessaire pour chauffer le bus.

Ce n'est pas le cas pour les bus électriques, qui doivent faire appel à un chauffage additionnel, lequel consomme bien sûr beaucoup d'énergie. On parle ici de puissances de l'ordre de 40 kW pour chauffer les passagers, un chiffre conséquent qui, couplé à une température extérieure faible synonyme de diminution de la capacité des batteries, peut se révéler problématique. En effet, en hiver l'énergie dévolue au chauffage peut être aussi importante que l'énergie nécessaire à la traction. Sur toute une année ce chiffre tombe à 20%, mais reste très élevé. En été, du fait de la différence de température moins importante entre l'intérieur et l'extérieur du véhicule qu'en hiver, l'on a besoin de moins d'énergie pour garantir le confort des passagers. Autre avantage des systèmes de confort électriques, il est possible de définir plus facilement des stratégies de fonctionnement, afin d'économiser au maximum l'énergie. Mais pour le refroidissement du bus, autant sur un moteur thermique classique qu'un électrique, l'utilisation d'un compresseur de climatisation électrique et donc à régime variable permettrait d'économiser et de mieux gérer ce refroidissement, comparativement à un système pulsé.

Il est généralement très difficile de savoir dans quelles circonstances se sont déroulées les mesures faites par les constructeurs permettant de publier les chiffres qu'ils mentionnent, mais ce qui est sûr c'est que l'impact des auxiliaires ne peut être ignoré dans le bilan global.

Finalement, les chauffeurs ont une grande responsabilité dans la consommation énergétique des bus. Une diminution de la consommation de l'ordre de 10 à 15% est possible en adoptant une conduite optimale.

Le tableau six résume l'évaluation du critère « consommation énergétique » pour l'ensemble des technologies.

Technologie	Appréciation
Trolleybus conventionnel	5
Trolleybus à batterie	5
Bus à batterie conventionnel	5
Bus à batterie à recharges rapides	5
Diesel	2
Gaz naturel	1
Hybride diesel/électrique	3
Hybride hydrogène/électrique	3

Tableau 6 : évaluation du critère de consommation énergétique

4.2 Nuisances

4.2.1 Bruit

Le bruit est un critère très important pour plusieurs types d'utilisateurs de la voie publique :

- Intérieur : les passagers du bus et le conducteur ou la conductrice (bien que moins dérangé puisque le moteur se situe en principe à l'arrière du bus)
- Extérieur : les personnes habitant ou se trouvant à proximité de routes empruntées par les bus

Il faut ici se concentrer uniquement sur les éléments qui diffèrent selon les technologies. Le moins bon élève est bien sûr le diesel, puisque son moteur est source de fortes nuisances sonores, en particulier au démarrage

et dans les montées, où il a besoin de toute sa puissance. Il existe de nombreux moyens de réduire le bruit de ces bus, grâce notamment à l'ajout de tôles anti-bruit sur le moteur, ou à un système d'échappement revu¹¹⁵.

En incitant les conductrices et conducteurs de bus diesel à une conduite plus douce, notamment au travers de cours « d'éco-conduite », il est possible non seulement de réduire les nuisances sonores grâce à une conduite plus coulée, mais également d'améliorer le confort des passagers (moins de mouvements brusques).

De l'autre côté du classement se trouvent les bus faisant appel à la technologie électrique pour se déplacer, et les bus à hydrogène. Le bus à batteries à recharges rapides de type TOSA ne produit en effet que 60 dBA au démarrage¹¹⁶, contre plus de 70 dBA pour un diesel, soit une réduction perçue par l'utilisateur de 50%. Le bruit que fait l'installation de recharge située aux arrêts doit être pris en compte également avec la technologie batterie à recharges rapides. Etant donné la forte puissance de charge nécessaire au « biberonnage », ces armoires électriques sont dotées de ventilateurs afin d'en refroidir les composants internes, ce qui diffuse un bruit de soufflerie pouvant incommoder les personnes habitant autour de ces stations lorsque le bus se charge. Ce point négatif peut se révéler particulièrement coûteux s'il n'est pas bien anticipé en amont.

Les bus circulant au gaz naturel offrent une légère amélioration au niveau du bruit par rapport aux bus diesel¹¹⁷, mais peuvent également être perçus comme bruyants¹¹⁸.

En revanche, du fait du faible bruit des bus électriques et des trolleybus, l'utilisateur tourne son attention sur tous les petits bruits intérieurs, claquements, bruits de plastiques, etc. ce qui impose aux fabricants de porter plus d'attention à la finition du bus afin de ne pas perdre la bonne impression laissée aux usagers par l'absence de bruit de moteur. Revers de la médaille de ces véhicules silencieux, les usagers dans les hyper-centres ne peuvent plus entendre le véhicule venir dans leur dos si ce dernier ne possède pas un signal sonore permettant de signaler sa présence (un « bip » intermittent par exemple, pouvant se révéler agaçant pour les riverains).

Lors de travaux sur la route d'un trolleybus, celui-ci doit alors « dé-percher » et utiliser son moteur auxiliaire, qui fut autrefois une génératrice diesel extrêmement bruyante ayant la fâcheuse tendance à énerver les riverains. Bien qu'il en subsiste encore quelques exemplaires, ces génératrices sont à présent remplacées par des batteries, permettant ainsi de conserver le confort et le silence habituel du trolleybus.

Il faut encore distinguer les bus tout-électrique des hybrides diesel/électrique qui eux n'utilisent la propulsion électrique qu'au démarrage – et en particulier en montée – ce qui permet d'éviter le gros des nuisances. Ils peuvent également couper le moteur thermique avant l'arrivée aux arrêts. Le problème pour les bus hybrides est le bruit du moteur diesel, car celui-ci est de taille légèrement réduite par rapport à un bus 100% diesel, et de ce fait, a une plage de fonctionnement différente qui se traduit par un désagrément sonore plus important.

Au surplus certains bus doivent disposer d'aération supplémentaires pour refroidir les composants complexes d'un bus hybride diesel/électrique. En revanche, un avantage certain des bus hybrides de type « parallèle » par rapport aux bus diesels est la possibilité qu'ils ont de couper le moteur diesel aux arrêts de bus, permettant ainsi de réduire nettement le bruit vis-à-vis des habitants et personnes à proximité immédiate des arrêts¹¹⁹.

Faire le choix aujourd'hui d'acquérir des bus réputés bruyants peut constituer un risque stratégique, au cas, vraisemblable, où les réglementations locales relatives au bruit routier viendraient à se renforcer à l'avenir.

¹¹⁵ http://document.environnement.brussels/opac_css/elecfile/Bru_27.PDF?langtype=2060

¹¹⁶ <https://www.ge.ch/document/5978/telecharger>

¹¹⁷ https://www.mercedes-benz.ch/content/switzerland/mpc/mpc_switzerland_website/fr/home_mpc/bus/home/new_buses/models/regular_service_busses/citaro_ngt/facts/economy/economically.html

¹¹⁸ <http://www.bienpublic.com/grand-dijon/2011/11/12/bus-au-gaz-contre-bus-hybride-le-prix-du-silence>

¹¹⁹ <http://www.bruit.fr/images/stories/pdf/assises-2014/laurent-bleandonu.pdf>

Le tableau sept résume l'appréciation donnée pour le critère « bruit » pour l'ensemble des technologies.

Technologie	Appréciation
Trolleybus conventionnel	5
Trolleybus à batterie	5
Bus à batterie conventionnel	5
Bus à batterie à recharges rapides	4
Diesel	1
Gaz naturel	1
Hybride diesel/électrique	2
Hybride hydrogène/électrique	4

Tableau 7 : évaluation du critère de bruit

4.2.2 Pollution

La pollution est un critère bien sûr très important. Elle est régie par des réglementations européennes précises, entre autres pour les véhicules diesels qui doivent répondre aux normes Euro pour poids lourds, bus et cars. Ces valeurs sont exposées dans le tableau huit.

Norme	Application	NO _x	CO	HC	Particules
		[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]
Euro 0	01/10/1990	14.4	11.2	2.4	-
Euro I	01/10/1993	9	4.9	1.23	0.36
Euro II	01/10/1996	7	4	1.1	0.15
Euro III	01/10/2001	5	2.1	0.66	0.13
Euro IV	01/10/2006	3.5	1.5	0.46	0.02
Euro V	01/10/2009	2	1.5	0.46	0.02
Euro VI	01/01/2014	0.4	1.5	0.13	0.01

Tableau 8 : normes anti-pollution pour moteurs diesel lourds

L'émission de particules est un sujet en lui-même de par sa complexité. Sans trop entrer dans les détails, les particules peuvent être classées en différentes catégories selon leur taille, parmi lesquelles :

- **PM₁₀** : taille de moins de 10 µm, restent bloquées à hauteur des voies aériennes.
- **PM_{2.5}** : taille de moins de 2.5 µm, parviennent jusqu'aux alvéoles pulmonaires.

Il existe d'autres tailles autrement plus dangereuses (pouvant traverser la paroi des bronches et se retrouver dans le sang), telles que les PM₁ et PM_{0.1}. Bien que l'on note une régression des grosses particules de type PM₁₀ ces dernières années dans l'air, le fait de pulvériser le diesel avec de plus en plus de pression dans la chambre de combustion entraîne l'augmentation de particules plus fines et donc plus dangereuses.

Les gaz d'échappement des moteurs diesel ont été classés en catégorie 1 (cancérogène avéré pour l'Homme) par le Centre International de Recherche sur le Cancer en juin 2012¹²⁰ déjà. Ce constat rend vital de se préoccuper de ce problème, même si l'émission de particules de type PM₁₀ ou PM_{2.5} liées au trafic routier ne représentait que 10% des émissions totales de particules en 2009¹²¹. Ce d'autant plus que la norme Euro VII n'est pas encore à l'ordre du jour (certains parlent de son arrivée à l'horizon 2020-2021).

Mais il n'y a pas seulement les particules qui sont concernées, puisque les oxydes d'azotes (NO_x) sont également extrêmement dangereux pour l'humain. En effet, le monoxyde d'azote (NO) contribue à la formation d'ozone (O₃), qui entraîne des problèmes respiratoires. Le dioxyde d'azote (NO₂) quant à lui est

¹²⁰ <http://www.cancer-environnement.fr/550-Particules-diesel.ce.aspx>

¹²¹ <http://www.cancer-environnement.fr/356-Particules-dans-lair.ce.aspx>

encore plus dangereux. Sachant que les véhicules (et en particulier les diesels) participent pour 50%¹²² de l'émission totale des oxydes d'azote en France, c'est un problème qui ne peut être ignoré.

Le récent scandale automobile de Volkswagen a en outre accentué la pression politique exercée sur le processus d'abandon de cette technologie. Ceci, malgré le fait que les véhicules lourds produisent nettement moins d'oxydes d'azote que les voitures, selon des valeurs normalisées au kilomètre¹²³.

Les bus à hydrogène ne recrachent que de la vapeur d'eau, et les bus électriques ne produisent aucune émission polluante « directe ». Il faut bien sûr regarder au-delà du seul véhicule afin de pouvoir juger de la pollution globale du système, puisqu'à quoi bon disposer de bus électriques si l'électricité est produite à partir de vieilles usines à charbon. C'est « l'énergie grise » dont les gens commencent à prendre de plus en plus conscience. Malheureusement, l'énergie consommée en Suisse dépend grandement de là où l'on se trouve, de même que la part d'énergie renouvelable fournie dans le mix électrique par exemple. Mais de façon générale on peut dire qu'en Suisse l'énergie est de source relativement propre, comparativement à d'autres pays développés.

Les bus fonctionnant au gaz naturel produisent plus de CO₂ qu'un bus diesel Euro VI à faible régime moteur, mais en contrepartie ils rejettent moins de polluants, notamment 95% moins de particules, et 50%¹²⁴ de NO_x. Ici aussi les chiffres sont contradictoires, puisque certains parlent d'économies de CO₂ de l'ordre de 20⁶⁰ ou 25%¹²⁵.

Il n'y a pas que les particules qui posent problème, mais également les rejets de CO₂. Les pays s'exposent à des amendes de plusieurs dizaines de millions de francs¹²⁶ par année en cas de dépassement du seuil autorisé par l'Union Européenne sur leur consommation globale. Ici encore, il ne s'agit pas seulement de tenir compte de la pollution du bus, mais de l'ensemble de la chaîne, depuis la fabrication jusqu'à la roue. La figure 17 ci-dessous illustre les émissions de CO₂ pour les bus du puits à la roue, et rejoint ce qui a été montré au point 2.4 et 4.1.3.

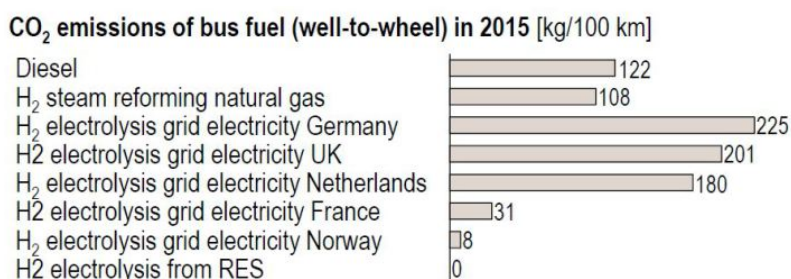


Figure 17 : exemples d'émissions de CO₂ des bus en fonction du carburant¹²⁷

Il faut convenir que les bus représentent un faible pourcentage du total des émissions de CO₂ du secteur des transports en Suisse, ce qui n'enlève rien au fait qu'il est nécessaire d'agir, non seulement en raison des avantages cités dans ce rapport concernant la consommation et la pollution ramenée par passager, mais également en raison des objectifs de report modal de la voiture individuelle vers les transports publics.

¹²² <http://www.linternaute.fr/auto/guide-pratique-auto/1409008-nox-qu-est-ce-que-c-est-quel-danger/>

¹²³ theguardian.com/environment/2017/jan/06/diesel-cars-are-10-times-more-toxic-than-trucks-and-buses-data-shows

¹²⁴ <http://www.gaz-mobilite.fr/img/files/guide-bus-gnv-ademe-grdf.pdf>

¹²⁵ https://www.encyclo-ecolo.com/Gaz_Naturel_de_Ville%2C_GNV

¹²⁶ <http://www.leparisien.fr/environnement/ville-durable/bus-electriques-ecologiques-mais-pour-le-moment-non-rentables-05-08-2015-4989527.php>

¹²⁷ http://ec.europa.eu/regional_policy/blog/detail.cfm?id=11

On constate aussi dans le tableau huit que les rejets de CO₂ ne sont pas limités, contrairement aux voitures de tourisme par exemple. Cette situation avantage donc clairement le diesel.

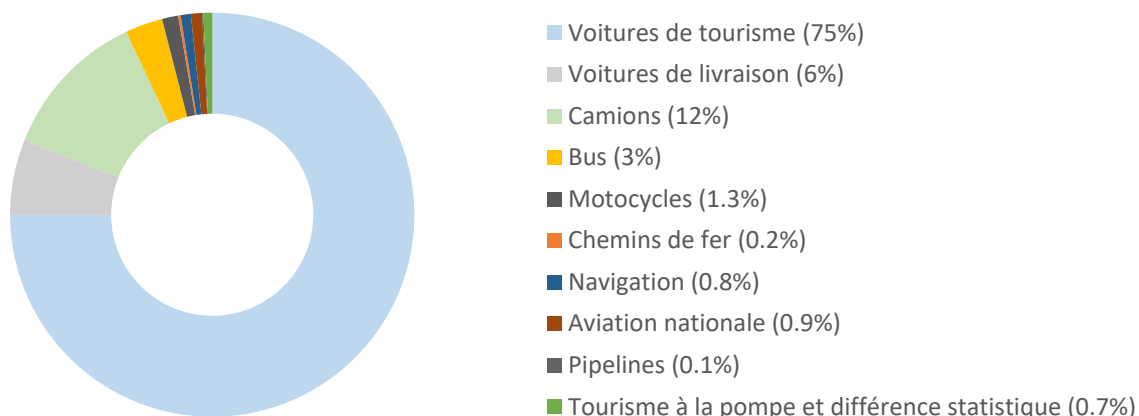


Figure 18 : émissions de CO₂ selon le moyen de transport en 2016 sans l'aviation internationale¹²⁸

Le tableau neuf résume l'évaluation du critère « préservation de la qualité de l'air ».

Technologie	Appréciation
Trolleybus conventionnel	5
Trolleybus à batterie	4
Bus à batterie conventionnel	3
Bus à batterie à recharges rapides	4
Diesel	1
Gaz naturel	3
Hybride diesel/électrique	2
Hybride hydrogène/électrique	5

Tableau 9 : évaluation du critère de préservation de la qualité de l'air

4.2.3 Impact visuel

L'impact visuel d'une technologie est un paramètre « ingrat », puisque c'est un point où ne pas avoir d'impact est considéré comme normal, et un impact négatif considéré comme très dérangeant.



Figure 19 : vue de la place Bel-Air à Genève avec les nombreux caténaires¹²⁹

Partant de ce postulat, le pire élève est le trolleybus, avec les caténaires installées partout sur sa route. Qu'ils soient fixés aux façades d'immeubles ou sur des poteaux construits à cet effet, ils sont inesthétiques et source

¹²⁸ bfs.admin.ch/bfs/fr/home/statistiques/mobilite-transport/accidents-impact-environnement/impact-environnement.html

¹²⁹ <http://www.rando-saleve.net/acces.html>

de désagrément, spécialement dans les hyper-centres où la forêt de câbles impacte négativement le champ visuel des personnes extérieures au bus. A prendre en compte également la difficulté potentielle pour les pompiers d'intervenir dans des zones denses en caténaires, comme à Genève (figure 19).

Il faut souligner que le fait d'avoir cette signalisation forcée de l'itinéraire du bus par les caténaires pourrait augmenter la fréquentation des trolleybus, puisque les passants perçoivent directement la direction vers laquelle ils peuvent aller en empruntant ce moyen de transport. Grâce à une communication efficace, il serait possible de mettre en évidence le fait que l'électricité transmise par les caténaires provient de sources « vertes » afin entre autres d'accentuer l'intérêt d'utiliser les transports publics plutôt que sa voiture personnelle.

En revanche, il est de plus en plus compliqué de pouvoir poser des caténaires, les oppositions des riverains étant de plus en plus fortes et coûteuses à lever. Loin est le temps où une poignée de main suffisait à obtenir un accord auprès des propriétaires pour attacher une ligne à la façade d'un immeuble. Les coûts d'opposition et de dédommagements font maintenant partie intégrante du budget (non négligeable) d'une ligne de trolleybus.

Il en va de même pour les trolleybus à batterie, puisque ceux-ci font directement appel aux caténaires existantes pour se recharger, mais peuvent néanmoins se déplacer sans sur de courtes distances. Afin de pallier au démantèlement des caténaires, le trolleybus à batterie est un excellent moyen de substitution, notamment dans l'hyper-centre où grâce à sa petite autonomie, il serait possible de complètement supprimer les places les plus denses en caténaires.

La technologie de bus souffrant le moins de problèmes visuels est celle faisant appel au moteur à combustion interne, à savoir le diesel ou gaz naturel. Ces bus étant alimentés uniquement au dépôt, ils peuvent donc se passer d'artifices sur leur parcours. Il en va de même pour le bus à hydrogène, qui peut se passer d'installation spécifique sur le parcours. De plus, avec les récentes normes antipollution, les diesels ne crachent plus réellement de grosse fumée noire comme ce fut le cas autrefois : l'impact visuel est donc nul.



Figure 20 : armoire électrique TOSA et système de recharge

Les autres technologies impactent le paysage à des degrés divers. Le bus électrique à recharges rapides fait intervenir un bras fixe de recharge à certains arrêts, qui pourrait néanmoins être intégré à un abribus ou faire l'objet de constructions artistiques afin de mieux l'intégrer. Un moyen plus discret serait le système de recharge par induction, ou grâce à un bras articulé dans le trottoir, à l'abri des regards¹³⁰. Les armoires

¹³⁰ <https://www.edda-bus.de/de/Historie.html>

électriques nécessaires à la recharge des bus ne peuvent pas forcément être enterrées, comme à Genève avec le bus TOSA (figure 20).

Le bilan global, assez prévisible, concernant le critère « impact visuel » est résumé dans le tableau 10.

Technologie	Appréciation
Trolleybus conventionnel	1
Trolleybus à batterie	2
Bus à batterie conventionnel	5
Bus à batterie à recharges rapides	4
Diesel	5
Gaz naturel	5
Hybride diesel/électrique	5
Hybride hydrogène/électrique	5

Tableau 10 : évaluation du critère d'impact visuel

4.3 Exploitation

4.3.1 Gamme de capacité

La capacité des bus varie bien sûr selon la technologie employée, puisqu'en fonction de celle-ci, l'espace occupé par le groupe motopropulseur sera différent du fait de l'emplacement de certains composants (source de carburant, auxiliaires, refroidissement, etc.). La masse de ce même groupe motopropulseur (ainsi que de ses éléments auxiliaires) joue un grand rôle dans la capacité du bus, puisque ce dernier doit respecter un poids maximum en fonction du nombre d'essieux notamment¹³¹.

Il faut également considérer la manière dont sont comptées les places dans le bus. Selon les normes utilisées, la capacité d'accueil est celle indiquée dans le tableau 11.

Type de bus	Capacité constructeur, 6 personnes /m2 debout [-]	Capacité confort, 3 personnes /m2 debout [-]
Minibus	15 à 35	15 à 25
Midibus	50 à 90	45 à 55
Standard	90 à 115	65 à 75
Articulé	140 à 160	90 à 100
Mégabus	200	135

Tableau 11 : norme de capacité

Le fait que les bus diesels soient présents depuis longtemps, et en raison d'une taille modérée du moteur et de son système de refroidissement, fait qu'ils disposent d'une grande offre permettant de couvrir tous les besoins allant des minibus transportant une dizaine de passagers à plus de 175 pour les doubles-articulés (valeurs constructeur).

Il en va de même pour les bus hybrides diesel/électrique, puisqu'il existe des versions de 18 mètres permettant de transporter 150 personnes¹³², et également des versions double-articulées permettant d'accueillir 200 passagers, notamment le lighTram de Hess¹³³ qui fut le premier bus en Europe à double articulation hybride de série. Il existe également des minibus permettant de transporter une vingtaine de personnes.

¹³¹ <https://www.iru.org/apps/infocentre-item-action?id=218&lang=fr>

¹³² <http://www.volvobuses.fr/fr-fr/our-offering/buses/volvo-7900-hybrid/specifications.html>

¹³³ <https://www.hess-ag.ch/prestations/bus/lightram.html?L=1>

Le trolleybus offre un plancher parfaitement plat, excepté pour les plus anciens, garantissant ainsi un maximum d'espace disponible dans la cabine pour les passagers debout. Grâce aux récents trolleybus à double articulation pouvant atteindre 25 m de long, la capacité en passagers se monte à 200 places (avec un tiers environ de places assises). Les plus petits trolleybus de chez Hess permettent de transporter 80 personnes au total, mais comme il est rare de voir une ligne prévue pour de faibles volumes de passagers équipée en trolleybus, l'attrait pour de telles gammes est donc relativement faible.

Le point faible des bus électriques a longtemps été l'impossibilité de transporter plus de 100 personnes, et encore moins 150 personnes. La gamme de capacité tend à s'élargir au fur et à mesure de l'évolution des batteries. En revanche, ils sont parfaitement adaptés aux bus de petites tailles et minibus. Ces derniers commençant même à bénéficier de la conduite autonome. Comme cela a également été mentionné, en réduisant la quantité de batterie disponible, les bus électriques peuvent transporter plus de passagers.

Les bus au gaz naturel et à hydrogène, bien qu'étant moins nombreux chez les constructeurs, parviennent également à couvrir une large gamme de capacité, puisqu'il existe des bus à hydrogène allant de 8 à 18 m permettant de transporter jusqu'à 125 passagers ou même 140 passagers.



Figure 21 : la complexité et le volume de l'équipement nécessaire au bus à hydrogène Phileas de 18 [m]¹³⁴

Scania a présenté en 2016¹³⁵ un prototype de bus au gaz naturel double-articulé de 26 m permettant de transporter jusqu'à 250 passagers, avant tout destiné à l'Amérique du Sud, ce continent étant plus consommateur de véhicule au gaz. Ce bus a effectué ses premiers tours de roue en mars 2018¹³⁶, mais il y a peu de chances de le voir chez nous, et reste à considérer plutôt comme une curiosité qu'autre chose.



Figure 22 : premier bus double-articulé au gaz naturel¹³⁷

¹³⁴ http://gofuelcellbus.com/project_uploads/APTS.pdf (site Web fermé; état: 06.03.2019)

¹³⁵ <https://www.scania.com/ch/fr/home/experience-scania/features/scania-unveils-first-bi-articulated-euro-6-gas-bus.html>

¹³⁶ <http://www.movilidadplus.co/bog/comenzo-rodar-bogota-primer-bus-biarticulado-gas-del-mundo/>

¹³⁷ <http://www.gaz-mobilite.fr/actus/scania-bus-gnv-bi-articule-gaz-naturel-1437.html>

On remarque donc qu'entre 50 et 120 passagers, la technologie n'a pas d'importance et qu'au-delà de ces limites, certaines solutions technologiques sont éliminées de la course à l'heure actuelle.

Le tableau 12 résume l'évaluation du critère « gamme de capacité » pour les technologies prises en compte.

Technologie	Appréciation
Trolleybus conventionnel	4
Trolleybus à batterie	3
Bus à batterie conventionnel	4
Bus à batterie à recharges rapides	2
Diesel	4
Gaz naturel	2
Hybride diesel/électrique	3
Hybride hydrogène/électrique	2

Tableau 12 : évaluation du critère de gamme de capacité

4.3.2 Disponibilité

La disponibilité d'un bus est liée dans son bilan global à son autonomie. La disponibilité est sa rapidité de mise en action, au travers principalement de son moyen de ravitaillement. Un bus peut en effet avoir une faible disponibilité, mais une grande autonomie, de sorte que ce désavantage n'a pas de grosse conséquence sur le fonctionnement normal du bus. A l'inverse, le bus qui possède une faible autonomie mais une grande disponibilité ne souffrira pas non plus extrêmement de ce point faible. Il existe deux grandes familles permettant de ravitailler un véhicule :

- Recharge à l'arrêt
 - Recharge de nuit : au dépôt, charge lente
 - Recharge ponctuelle : aux arrêts de bus, charge rapide
- Recharge en mouvement
 - Récupération : récupération d'énergie au freinage ou descente
 - Circulation : en utilisant les caténaires ou par induction

Nous ignorerons pour ce critère de disponibilité la charge par récupération d'énergie au freinage. La recharge en mouvement est bien sûr la recharge la plus intéressante du point de vue rentabilité et disponibilité, puisqu'elle n'oblige pas le bus à s'arrêter. Il existe à l'heure actuelle deux manières de le réaliser, soit en utilisant les caténaires existantes comme le fait le trolleybus à batterie, ou alors par induction, mais ce système est toujours en phase de développement¹³⁸.



Figure 23 : à quoi pourraient ressembler nos routes avec voies de charge dédiées aux bus par exemple¹³⁹

¹³⁸ <https://www.youtube.com/watch?v=M89LnPeJN8M>

¹³⁹ <https://www.razaautomovel.com/2015/08/reino-unido-aposta-em-auto-estradas-com-carregamento-wireless>

Le bus diesel a une nouvelle fois l'avantage dans le sens où il peut sans problème effectuer toute une journée de travail sans devoir revenir au dépôt. Quand bien même il devrait être ravitaillé, le remplissage ne prend que 3 [min] environ. Sa disponibilité est donc très élevée.

Le grand avantage de l'hydrogène par rapport aux autres moyens de propulsion alternatifs est sa rapidité de remplissage, quasiment équivalente à celle du diesel. Elle dépend principalement de la taille du compresseur qui doit comprimer l'hydrogène, et peut ne prendre que 3 à 4 min¹⁴⁰. On pourrait imaginer dans le cas où son autonomie ne permettrait pas d'effectuer toute une journée sans repasser par un ravitaillement de profiter d'une pause de la conductrice ou du conducteur à la moitié de son service pour recharger rapidement les réserves d'hydrogène du bus pour lui permettre d'effectuer le reste de sa journée.

Les bus à batterie à recharges rapides pratiquant la recharge ponctuelle aux arrêts voient leur niveau de charge diminuer au fur et à mesure du parcours, du fait des petites charges effectuées tous les trois ou quatre arrêts, et doivent donc effectuer une charge plus longue en fin de route de l'ordre de 3 à 5 min, ce qui pénalise quelque peu leur disponibilité, bien que ce temps de charge soit généralement inférieur au temps que passe le bus au terminus. Dans des situations critiques (station de charge en panne, important trafic, consommation d'auxiliaires élevée), le bus pourrait être mis en difficulté et pourrait être contraint de recharger ses batteries pendant plus longtemps ou même devoir rentrer au dépôt prématurément, pénalisant ainsi sa disponibilité.

Le gros point noir des bus à batterie conventionnels, est justement leur quantité de batteries. Leur nature même fait qu'ils doivent être chargés à l'arrêt au dépôt, donc de nuit. Cette charge est gourmande en énergie et en temps, ce qui fait que leur disponibilité est la plus mauvaise du groupe. Ceci pourrait quelque peu changer grâce à la recharge en route par induction, mais dans ce cas-ci ce type de bus perdrait encore plus son intérêt, puisqu'en réduisant sa masse de batterie du fait de la possibilité de les charger en route, son fonctionnement se rapprocherait alors d'un bus à batterie à recharges rapides auquel on instaurerait la recharge par induction.

En revanche, Hyundai¹⁴¹ en présentant leur bus Elec City, affirme qu'une heure seulement suffit à recharger entièrement les 256 kWh de batteries. Les améliorations dans la vitesse de recharge des bus électriques sont en effet intéressantes. Dans le cadre d'un minibus de 20 places ayant seulement 120 km d'autonomie, certains fabricants annoncent un temps de 30 min afin de recharger à 80% les batteries du bus.

Le trolleybus à batterie pratique déjà la charge en mouvement en se connectant aux caténaires existantes. Et de la même manière qu'un bus à batterie à recharges rapides, il n'embarque qu'une petite quantité de batterie qui ne nécessite pas une grande immobilisation du bus en fin de journée. Sa disponibilité est donc intéressante.

Le tableau 13 présente l'évaluation du critère « disponibilité » pour les technologies retenues.

Technologie	Appréciation
Trolleybus conventionnel	5
Trolleybus à batterie	3
Bus à batterie conventionnel	1
Bus à batterie à recharges rapides	3
Diesel	5
Gaz naturel	5
Hybride diesel/électrique	4
Hybride hydrogène/électrique	5

Tableau 13 : évaluation du critère de disponibilité

¹⁴⁰ <http://www.gaz-mobilite.fr/actus/ratp-bus-biogaz-paris-entretien-nicolas-cartier-bus-2025-1284.html>

¹⁴¹ <https://www.hyundai.news/eu/brand/hyundais-elec-city-the-future-of-public-transportation/>

4.3.3 Maturité technologique

Ici encore, ce domaine est particulièrement difficile à évaluer, tant les expériences sont nombreuses et différentes, que ce soit en profil d'exploitation, matériel, climat, etc. De la même manière, les constructeurs ne sont pas enclins à partager leurs déboires, de façon compréhensible.

La maturité technologique est définie par différents éléments : durée de vie du bus et de son infrastructure, facilité d'entretien et d'opération, expérience de l'entreprise de transport public avec cette technologie. La durée de vie étant indirectement liée à la fiabilité du matériel et donc à sa maturité technologique, elle est un bon indicateur, puisqu'une technologie non fiable sera généralement assez rapidement abandonnée par un exploitant afin de conserver une certaine rentabilité.

Le champion toutes catégories est sans doute le trolleybus, avec une durée de vie pouvant atteindre 25 ans. A Lausanne circulent toujours de nombreux Trolleybus NAW mis en service entre 1986 et 1990, soit il y a 30 ans. Sachant que les trolleybus coûtent en général le double (voir plus) de bus « standards », il convient de les amortir le plus longtemps possible. Leur technologie étant éprouvée depuis longtemps, ils sont peu susceptibles de subir des avaries.



Figure 24 : Trolleybus NAW à Lausanne¹⁴²

Les bus diesels et hybrides partagent une durée de vie comprise entre 10 et 15 ans, sachant que le bus hybride souffrira du changement de ses batteries à mi-chemin, tandis que le bus diesel pourra encore rouler pour autant que la réglementation reste stable et que le transporteur ne décide pas de mettre le bus au rebut malgré un bon fonctionnement, chose qui arrive régulièrement afin garder un parc de véhicules récent et donc attractif aux yeux des utilisateurs.

En revanche, et c'est chose normale avec toute nouvelle technologie, les bus faisant appel à des batteries souffrent de problèmes de jeunesse. Il s'agit aussi de mettre en évidence la durée de vie des batteries, inférieure à celle du bus de moitié, soit d'environ six ans. Mais en sollicitant moins ces batteries, il serait possible de les conserver pendant dix ans avec une bonne efficacité.

Avec les bus électriques, et en particulier avec les bus à recharges rapides, la fiabilité de l'infrastructure revêt une importance toute particulière, de même que la conduite du bus. Si la fiabilité de l'infrastructure ne répond pas aux exigences, le bus peut se trouver en difficulté ce qui va pénaliser son évaluation ici. De même, les chauffeurs ne maîtrisent pas forcément toutes les ficelles de la conduite d'un bus « alternatif », ce qui engendrera forcément des situations où il n'est plus possible d'assurer le service du bus, péjorant ainsi son résultat. Mais avec les années, les nouvelles technologies combleront leur désavantage, par l'arrivée également de nouveaux acteurs dans le domaine, que ce soit au niveau des fabricants de bus ou de composants par exemple, augmentant ainsi la concurrence et donc possiblement la qualité des éléments.

¹⁴² https://fr.wikipedia.org/wiki/Trolleybus_de_Lausanne

Les bus fonctionnant à l'hydrogène ont connu également des soucis au départ, mais les acteurs s'accordent à dire que c'est une technologie qui est à présent maîtrisée et ne souffre pas de plus de problèmes que les autres types de bus.

L'évaluation du critère « maturité technologique » est résumée dans le tableau 14.

Technologie	Appréciation
Trolleybus conventionnel	5
Trolleybus à batterie	3
Bus à batterie conventionnel	3
Bus à batterie à recharges rapides	2
Diesel	5
Gaz naturel	4
Hybride diesel/électrique	4
Hybride hydrogène/électrique	3

Tableau 14 : évaluation du critère de maturité technologique

4.3.4 Flexibilité

La flexibilité d'un type de bus est un mélange entre son autonomie et sa disponibilité. Un bus disposant d'une grande flexibilité pourra être amené par exemple à changer son itinéraire en cours de journée, ou à être affecté sur une autre ligne de façon hebdomadaire, etc. Un bus ayant une grande flexibilité sera donc utile à l'exploitant si ce dernier ne dispose pas d'une grande flotte, devant alors utiliser le bus pour différentes conditions d'exploitation. Il faut donc que le bus en question ait une certaine réserve d'autonomie, et ne soit pas trop contraignant à ravitailler.

Dans ce contexte, c'est le bus diesel qui est bien sûr le plus flexible. Son autonomie lui permet d'assurer un service complet sans repasser par la case dépôt, et le fait qu'il ne dépende pas de caténaires ou de stations de recharge fait qu'il peut être affecté à une multitude de possibilités. Sa rapidité de mise en action est également un point qui l'avantage.

A l'opposé se trouve le trolleybus, puisque sans caténaires il ne peut se déplacer. Il est donc le moyen de propulsion le moins flexible de la sélection, malgré une disponibilité immédiate qui se révèle ici inutile.

Dans la même lignée, le trolleybus à batterie et le bus à batterie à recharges rapides ne font pas beaucoup mieux, car même s'ils n'ont pas besoin de caténaires, ils sont dépendant à un moment donné d'un moyen de recharge, que ce soit des caténaires pour le premier, ou de stations de recharges rapides pour le second. Il est envisageable d'augmenter la capacité de la batterie embarquée afin d'augmenter l'autonomie dans le cas où ils devaient être affectés sur une nouvelle ligne de façon temporaire, mais cela a un coût.

Le bus à batterie conventionnel fait mieux, mais reste limité par son autonomie et sa faible disponibilité. Suivant le parcours, il ne pourra tout simplement pas assurer le service en continu. Malgré le fait qu'il ne nécessite pas de point de recharge en cours de route, il n'est pas un modèle de flexibilité.

Les bus fonctionnant au gaz naturel disposent d'une grande autonomie et n'ont pas besoin de se ravitailler en cours de route. Ils n'ont pas non plus de problème à arpenter les fortes pentes avec des puissances motrices équivalentes aux diesel, ce qui en fait un moyen de propulsion équivalant au diesel.

Ceci est également valable pour les deux types de bus hybrides analysés ici, le diesel/électrique et l'hydrogène/électrique. Malheureusement, l'hybride est généralement légèrement en retrait au niveau puissance, ce qui l'empêche d'être aussi flexible que le diesel ou le gaz naturel, par exemple. Ceci, malgré une disponibilité intéressante.

L'évaluation de ce critère de « flexibilité » est présentée dans le tableau 15.

Technologie	Appréciation
Trolleybus conventionnel	1
Trolleybus à batterie	2
Bus à batterie conventionnel	3
Bus à batterie à recharges rapides	2
Diesel	5
Gaz naturel	5
Hybride diesel/électrique	4
Hybride hydrogène/électrique	4

Tableau 15 : évaluation du critère de flexibilité

4.4 Usagers

4.4.1 Confort

Ce critère est assez facilement évalué, puisque tous les bus électriques propulsés par un moteur électrique sont la référence et possèdent un confort maximal. Il est en effet difficile de faire plus silencieux et plus souple lors du fonctionnement que ces bus.

L'idée étant que l'utilisateur soit le moins perturbé possible lors de son transport, on imagine dès lors clairement que le diesel fait figure de mauvais élève, puisqu'hormis les vibrations importantes, l'utilisateur doit faire face à des à-coups lors d'accélération ou de décélération dus à la transmission automatique, d'odeurs dans la cabine, de chaleur, et de bruit. Des désagréments amplifiés à mesure que l'utilisateur se trouve vers l'arrière du bus, proche du moteur.

Avec le bus au gaz naturel ces problèmes sont également présents. En réalité le problème principal vient du moteur thermique et de la transmission non-continue, problème qui n'existe pas avec les bus électriques.

L'hybride diesel/électrique fait mieux puisque suivant son architecture il peut se passer du diesel au démarrage, ce qui va améliorer le confort perçu des usagers. En revanche il garde les mêmes travers que le diesel lorsque le moteur est en route.

Le bus hybride hydrogène/électrique en revanche est particulièrement silencieux et agréable. Que ce soit du point de vue dynamique, puisque disposant de moteurs électriques, mais également du point de vue du bruit. L'absence d'odeur est également un plus, non seulement pour les passagers du bus, mais surtout pour les personnes extérieures au bus (piétons, cyclistes, animaux).

L'évaluation du critère « confort » est consignée dans le tableau 16.

Technologie	Appréciation
Trolleybus conventionnel	5
Trolleybus à batterie	5
Bus à batterie conventionnel	5
Bus à batterie à recharges rapides	5
Diesel	1
Gaz naturel	2
Hybride diesel/électrique	3
Hybride hydrogène/électrique	4

Tableau 16 : évaluation du critère de confort

4.4.2 Image

Bien entendu ici le diesel est à nouveau le plus mauvais élève. Son image auprès des usagers n'est pas bonne en raison de sa pollution, de son bruit, et globalement de sa vétusté ressentie. Les gens se sont habitués à cette technologie, mais à lire les avis du public dans les journaux, le bien-être ressenti lorsqu'un remplacement de cette technologie est effectué est réel. Il faut tout de même garder à l'esprit que les gens ont certainement peu d'égard à la technologie quand ils n'ont pas d'autre choix que de se rendre au travail en utilisant les bus.

L'hybride diesel/électrique souffre également d'un problème d'image en raison de la présence de son moteur diesel, mais grâce à sa motorisation additionnelle électrique, les usagers en ont une meilleure opinion. Le mot « hybride » étant en effet plus porteur auprès de la population que le mot « diesel ». Ici, un effort doit être fait sur le véhicule pour lui donner une meilleure apparence, plus « verte », notamment par un affichage ou décoration adapté, permettant aux gens d'avoir un meilleur sentiment en voyageant ou en voyant ces véhicules.

Il en va de même pour le gaz naturel, dont les usagers ne remarquent pas forcément la différence par rapport à un bus diesel et n'ont pas un ressenti spécialement favorable. A l'image de l'hybride diesel/électrique, il faut rendre le bus plus attractif visuellement, et bien que cela soit très souvent déjà fait dans une certaine mesure, il y a encore des efforts à faire de ce côté.



Figure 25 : mise en valeur d'un bus au biogaz naturel¹⁴³

Le trolleybus possède une bonne image auprès du public et est bien accepté par la population, même si son gros désavantage, les caténaires, pénalise son image, surtout auprès des touristes, souvent peu habitués à ce moyen de transport.

Les bus à batterie à recharges rapides, bien qu'étant apparus très récemment, ont également une très bonne image, ce d'autant plus qu'ils utilisent des fonctions supplémentaires pour les usagers, tel que : prise USB pour recharge de téléphone, réseau internet sans fil gratuit, etc. En revanche, en raison de leurs problèmes de jeunesse ils souffrent encore de mauvais articles de presse qui diffusent un mauvais sentiment auprès de la population. Néanmoins, ceci devrait bientôt appartenir au passé étant donné l'attractivité réelle de cette technologie et les progrès rapides effectués.

Similairement, les trolleybus à batterie possèdent également ces petits « plus » pour les usagers (wifi, USB, etc.). Leur image dégagée est similaire à celle des trolleybus. Les usagers ne remarquent pas de différence de fonctionnement avec un trolleybus conventionnel, ce qui est le but.

¹⁴³ <http://www.gaz-mobilite.fr/actus/bristol-premier-bus-biogaz-1684.html>

Le tableau 17 donne l'évaluation du critère « image ».

Technologie	Appréciation
Trolleybus conventionnel	5
Trolleybus à batterie	3
Bus à batterie conventionnel	3
Bus à batterie à recharges rapides	2
Diesel	5
Gaz naturel	4
Hybride diesel/électrique	4
Hybride hydrogène/électrique	3

Tableau 17 : évaluation du critère d'image

4.5 Economie

Cette catégorie est relativement difficile à évaluer de façon précise, puisque l'offre varie constamment. Il est néanmoins possible de tirer des tendances et ce que chaque technologie implique dans son implantation. Plusieurs paramètres entrent en ligne de compte pour le calcul des coûts :

- Achat du bus
- Achat infrastructure
- Maintenance

4.5.1 Coût d'achat véhicule

Ce coût unique dépend bien sûr du type de bus choisi, de sa taille, et des options, dont en voici un éventail :

Technologie	Modèle	Coût d'achat véhicule
		[kCHF]
Trolleybus	Conventionnel	1'100 – 1'300
Bus à batterie à recharges rapides	18 [m]	1'300
Diesel	10 [m]	300
	18 [m]	380 – 430
Gaz naturel	12 [m]	460
Hybride diesel/électrique	Standard	380 – 710
Hybride hydrogène/électrique	Standard	2'000

Tableau 18 : évaluation du critère du coût d'achat des bus

Il existe bien sûr une infinité de possibilités et de combinaisons, et il est évident que l'exploitant trouvera le prix exact des différents bus au travers d'un appel d'offre. Le coût d'achat d'un bus seul ne doit pas être le seul argument en faveur ou en défaveur d'une technologie par rapport à une autre. Il s'agit de prendre en compte les coûts d'entretien, mais également les coûts d'infrastructure, et la durée de vie de l'ensemble.

Les batteries d'un bus à batterie conventionnel ou à recharges rapides comptent pour une part pouvant atteindre 30% du prix total du bus, et ne doivent pas être ignorées dans l'étude commerciale, puisqu'il est possible de les louer ou de les acheter. On constate généralement que pour un bus électrique au prix de 700 kCHF, les batteries comptent pour environ 230 kCHF, alors que le prix de location est potentiellement d'environ 4000 CHF/mois, ce qui fait l'équilibre à 57 mois environ. La différence principale entre un bus diesel classique et un bus à batterie s'explique donc bien par les prix batteries. L'économie réalisée sur le carburant n'arrive pas encore à compenser la différence à l'achat en défaveur du bus électrique. Les batteries n'en sont encore qu'à leurs débuts et ne présentent pas une fiabilité ni une longévité exemplaire. Leur achat,

remplacement, et recyclage a un coût, qui devrait néanmoins diminuer avec le temps, au fur et à mesure que la technologie évolue.

L'évaluation du critère « coût d'achat véhicule » est résumée dans le tableau 19.

Technologie	Appréciation
Trolleybus conventionnel	2
Trolleybus à batterie	3
Bus à batterie conventionnel	2
Bus à batterie à recharges rapides	3
Diesel	5
Gaz naturel	4
Hybride diesel/électrique	4
Hybride hydrogène/électrique	1

Tableau 19 : évaluation du critère du coût d'achat véhicule

4.5.2 Coût d'achat infrastructure

Ici encore, c'est le diesel qui est le moins cher, puisqu'il n'a besoin que d'une pompe à carburant et d'un réservoir de stockage (tableau 20).

Technologie	Modèle	Coût d'achat infrastructure
		[kCHF]
Bus à batterie à recharges rapides	Station de recharge 50 [kW]	42 – 48
	Station de recharge 150 [kW]	120
	Station de recharge « flash »	195
	Station de recharge « dépôt »	290
	Équipement dépôt	220
Trolleybus	Ligne de contact, par kilomètre	350 – 1'000
	Sous-station	970
	Équipement dépôt	2'400

Tableau 20 : coûts d'achat infrastructure

La lourde infrastructure du trolleybus, couplée à un prix d'achat élevé, le rend difficilement rentable pour une seule ligne. En revanche, la mutualisation de lignes rend ce moyen avantageux.

Il en va de même pour le bus électrique à recharges rapides. Il faut tenir compte de la pose de lignes électriques et d'équipement de forte puissance pour les stations de recharge rapides. Dans le cadre du projet TOSA, un coût total de 30 millions¹⁴⁴ de francs divisés équitablement entre l'infrastructure et les véhicules (12 au total) montre le coût global d'un tel projet. L'équipement électrique nécessaire aux stations représente environ 67% du coût d'infrastructure, alors que les travaux de génie civil en particulier ne représentent que 10% du montant total. Mais par la suite il serait possible de mutualiser cette ligne pour réduire les coûts d'ensemble.

Le trolleybus à batterie est intéressant puisqu'il profite de l'installation (coûteuse) existante du trolleybus, lui permettant ainsi de s'affranchir de coûts élevés d'infrastructure.

Il faut garder en tête aussi que les aménagements nécessaires pour certains types de bus sont difficiles à estimer. La mise aux normes d'un dépôt, la construction d'une station de ravitaillement en gaz naturel, etc. sont d'autant d'éléments qu'il convient à l'exploitant d'évaluer de son côté et auxquels ce guide ne peut donner une réponse satisfaisante.

¹⁴⁴ <https://www.ge.ch/document/projet-loi-11720-credit-investissement-deploiement-technologie-tosa-ligne-pilote-transports-publics-genevois/telecharger>

L'évaluation du critère « coût d'achat infrastructure » est indiquée dans le tableau 21.

Technologie	Appréciation
Trolleybus conventionnel	1
Trolleybus à batterie	4
Bus à batterie conventionnel	3
Bus à batterie à recharges rapides	2
Diesel	5
Gaz naturel	3
Hybride diesel/électrique	4
Hybride hydrogène/électrique	2

Tableau 21 : évaluation du critère du coût d'achat infrastructure

4.5.3 Coût d'usage

Un avantage majeur du bus diesel par rapport à ses rivaux est la subvention importante du carburant par la Confédération. Mais encore plus intéressant est le prix du gaz naturel, qui est 30% moins élevé que celui du diesel. Il ne faut pas non plus perdre de vue la consommation des bus, définie précédemment dans ce rapport, dans le calcul du coût lié au carburant.

Ici encore, les coûts d'usage sont propres à chaque bus, il est dès lors difficile de comparer de façon pertinente les différentes technologies. Par exemple, un bus électrique possède des coûts d'usage relativement faibles, alors que pour un bus diesel, il faudra penser notamment à remplacer la boîte de vitesses pendant sa vie, ainsi que d'autres composants onéreux d'usure. Les révisions et services sont également à prendre en compte dans le calcul. Les plans d'entretiens sont fournis par le fabricant du bus. Par ailleurs, à l'intérieur même d'une technologie, certaines marques produisent des bus nécessitant moins d'entretien.

Le tableau 22 indique quelques estimations des coûts d'usage :

Technologie	Modèle	Coût d'usage
		[CHF/km]
Diesel	12 [m]	0.5
	18 [m]	0.9 – 1.2
Hybride diesel/électrique	-	0.7
Gaz naturel	12 [m]	1.2
Trolleybus	18 [m] articulé	1 – 1.4

Tableau 22 : coûts d'usage des bus

L'évaluation du critère « coût d'usage » est consignée dans le tableau 23.

Technologie	Appréciation
Trolleybus conventionnel	3
Trolleybus à batterie	3
Bus à batterie conventionnel	2
Bus à batterie à recharges rapides	3
Diesel	4
Gaz naturel	3
Hybride diesel/électrique	4
Hybride hydrogène/électrique	2

Tableau 23 : évaluation du critère du coût d'usage

4.6 Résumé de l'évaluation

Le résumé des différents critères évalués dans ce chapitre pour les toutes les variantes technologiques retenues est présenté dans les représentations « radar » ci-dessous :

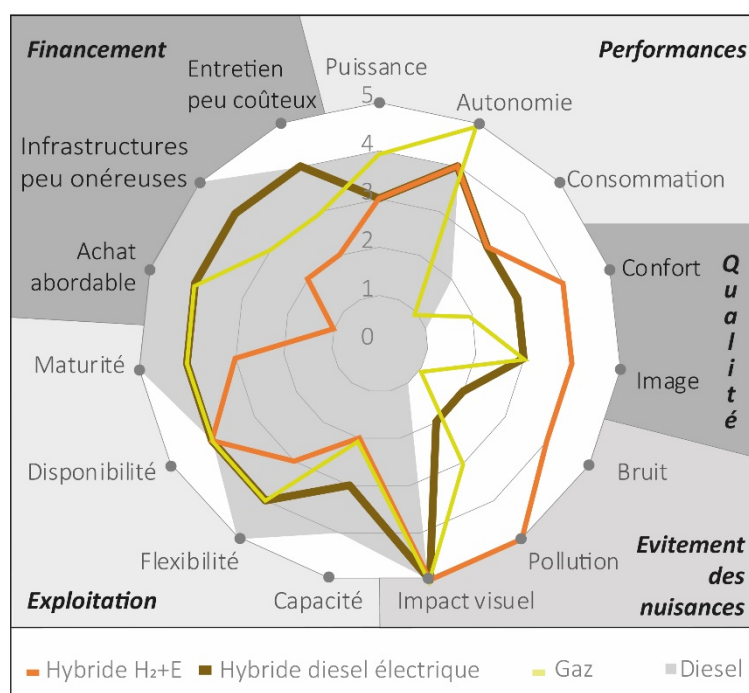


Figure 26 : représentation de l'évaluation technologies hybrides et gaz selon critères du chapitre 4

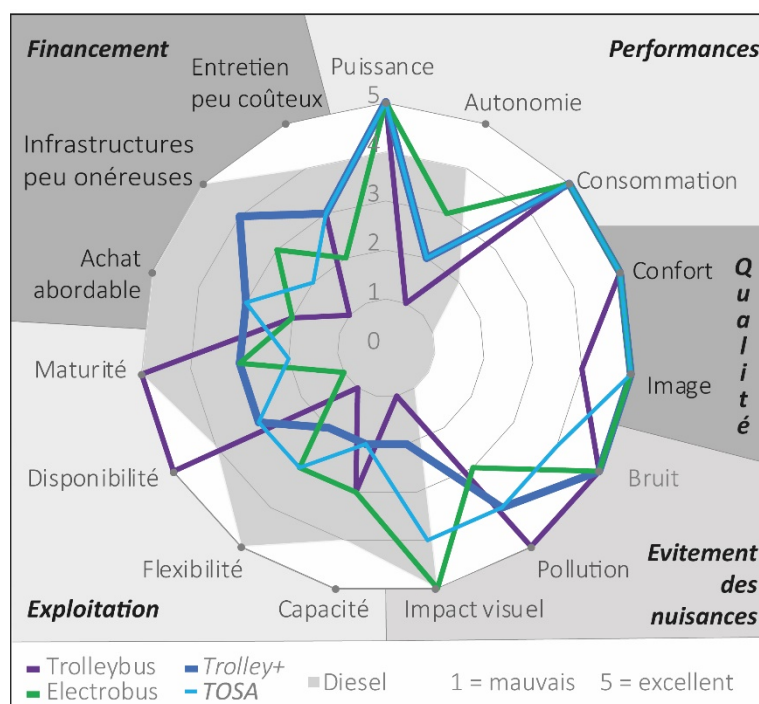


Figure 27 : représentation des technologies électriques selon critères du chapitre 4

De façon générale, on constate que l'on se heurte à des compromis. Le plus flagrant et intuitif est qu'il est difficile de choisir un moyen de propulsion économique, sans perdre en qualité ou en nuisances. Ce point est sujet à changer dans les années à venir, mais on constate que l'entreprise de transport public doit fournir un effort

financier afin de faire profiter aux usagers de conditions supérieures à un bus diesel. Mais sitôt le pas franchi, les avantages sont intéressants.

L'aspect financier, qui reste le nerf de la guerre, doit être évalué à long terme, sur toute la durée de vie du produit, car c'est souvent là que les technologies alternatives, ou « propres », tirent leur épingle du jeu.

Dans l'ensemble, les technologies alternatives offrent des solutions intéressantes et variées, adaptées aux différentes conditions de fonctionnement possible, ce qui est un point positif. La polyvalence de ces solutions n'est toutefois pas assez nette pour pouvoir définir une solution universelle : l'évaluation des critères énoncés dans ce chapitre montre de grandes disparités dans les scores obtenus. Le chapitre suivant va permettre d'identifier les technologies pertinentes en fonction des différents scénarios, ou profils d'utilisation du réseau de bus.

5. Scénarios étudiés

Afin de donner des exemples concrets d'application de ces technologies alternatives, il est intéressant de poser des scénarios d'utilisations pertinents pour les différents bus et de les évaluer. Sur cette base, il est possible de dégager les options les plus intéressantes. Il s'agit ici de définir un besoin, et d'identifier les technologies qui y répondent le mieux.

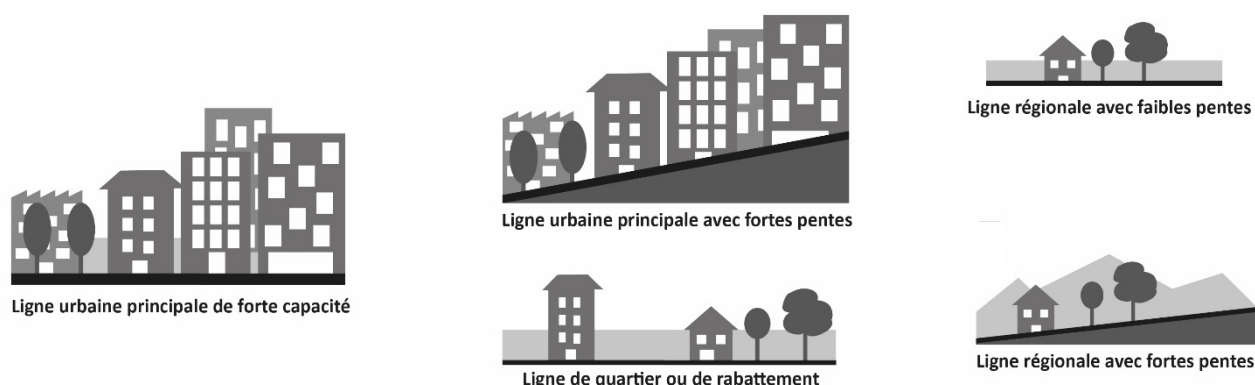


Figure 28 : illustration des scénarios étudiés

Les graphiques des résultats figurent en annexe à ce rapport.

5.1 Ligne urbaine grande capacité

Ce scénario est censé représenter une ligne passant au travers du centre d'une grande ville, Genève par exemple, et faisant appel à des « mégabus », au milieu d'une circulation dense. Voici les besoins de ce scénario :

- Très grande capacité
- Puissance nécessaire standard
- Disponibilité importante
- Autonomie peu importante selon le tissu urbain traversé
- Impact visuel important
- Pollution et bruit minimum

Pour commencer, l'importance d'un impact visuel réduit va automatiquement mettre de côté le trolleybus, et la pollution ainsi que les désagréments vont de leur côté enlever le diesel des options possibles. Le fait qu'il faille transporter plus de 160 personnes influence le choix de manière vitale, puisque l'on dépasse la fourchette de certaines technologies comme l'hybride hydrogène/électrique, ou le gaz naturel. Il convient alors de privilégier plutôt les bus permettant de transporter un maximum de personnes, comme les double-articulés. La disponibilité importante requise met hors-jeu le bus tout-électrique, en raison de son trop grand temps de charge nocturne. Il n'existe de toute manière aucun « mégabus » tout-électrique.

Si la ville dispose déjà de caténaires, le choix le plus judicieux est le trolleybus à batterie. Ce dernier peut transporter un maximum de personnes grâce à sa double-articulation possible, n'a pas besoin d'un grand temps de charge nocturne, et n'impacte pas plus la perception visuelle que le trolleybus existant. Il serait même possible de démanteler une partie des caténaires dans certains lieux sensibles afin de soulager visuellement le paysage. La pollution et le bruit sont minimum, d'où un avantage supplémentaire.

Si la ville ne dispose pas de caténaires, le bus permettant de répondre à ce scénario le mieux possible à l'heure actuelle est alors le bus hybride diesel/électrique double-articulé. Ce choix peut paraître surprenant, mais la

capacité nécessaire dans ce scénario est très contraignante. L'inconvénient du diesel est ici fortement diminué grâce à la partie électrique, mais idéalement une combinaison hybride gaz naturel/électrique serait mieux adaptée. Malheureusement l'offre en capacité disponible ne permet pas non plus de répondre efficacement à ce besoin. En revanche, dès qu'il existera des bus électriques à recharges rapides de très grande capacité, c'est cette technologie qui devrait l'emporter largement face à l'hybride. Ces bus sont prévus pour fin 2018, mais plus probablement plus pour 2019, comme cela a été mentionné précédemment.

Le tableau 24 indique les deux meilleures options possibles pour ce premier scénario.

Choix A	Choix B
Trolleybus à batterie	Hybride diesel/électrique

Tableau 24 : recommandation scénario 1

5.2 Ligne urbaine en pente

Afin de simuler une situation telle que celle de Lausanne, ce scénario fera appel à une route à forte dénivellation, avec une capacité légèrement réduite, toujours en milieu urbain. En voici les caractéristiques :

- Grande capacité (120 à 140 personnes)
- Puissance nécessaire élevée
- Disponibilité importante
- Impact visuel important
- Pollution et bruit minimum

Ici, la nécessité d'un bus double-articulé n'existe plus. L'hybride diesel/électrique n'est plus à l'ordre du jour en raison de son manque de puissance fatal dans les fortes pentes. De même, le moteur diesel et le gaz naturel ne sont toujours pas envisagés du fait de leur bruit et de leur pollution, incompatibles avec une circulation en ville de nos jours. Une fois encore, le choix va dépendre de l'existence ou non de caténaires, puisqu'ici le moyen de propulsion choisi est électrique, en raison de la forte puissance instantanée nécessaire. Par conséquent, le trolleybus à batterie est à nouveau préféré si des caténaires existent déjà.

Si des caténaires n'existent pas, alors le bus à batterie à recharges rapides est le meilleur choix. Il faut également oublier le bus tout-électrique puisque l'offre en bus articulés est pour ainsi dire inexistante, pour les raisons expliquées au point 3.1.3. C'est tout le contraire donc pour le bus à recharges rapides puisque ce dernier profite de sa légèreté pour transporter un maximum de personnes.

Il faut également prendre en compte l'hybride hydrogène/électrique. S'il est envisageable de créer ou d'utiliser une installation existante de fabrication d'hydrogène en utilisant des énergies renouvelables (comme le solaire ou l'hydraulique par exemple), ce moyen pourrait concurrencer le bus à batteries à recharges rapides, grâce à sa grande disponibilité, à son silence de fonctionnement, et à l'absence d'émissions polluantes. Néanmoins, l'évolution moins rapide que prévu de cette technologie et sa complexité, impliquent un risque technologie supérieur, et surtout au niveau financier. De même, la puissance moteur n'est à l'heure actuelle pas encore suffisante pour de fortes pentes, même si, comme cela a été mentionné au point 4.1.1 les fabricants travaillent sur des piles à combustibles de plus fortes puissances.

Les deux options possibles pour ce deuxième scénario sont indiquées dans le tableau 25.

Option A	Option B
Trolleybus à batterie	Bus à batterie à recharges rapides

Tableau 25 : recommandation scénario 2

5.3 Ligne urbaine de rabattement

Les conditions ici sont tout autres, puisque l'on parle d'une ligne de type minibus de campagne avec les caractéristiques suivantes :

- Petite capacité (20 à 30 personnes)
- Rayon d'action moyennement important
- Pollution et bruit moyennement important

Dans ce cas de figure, les gros véhicules sont automatiquement à écarter, à savoir le trolleybus et son homologue à batterie. Similairement, le bus électrique à recharges rapides n'existe pas pour le moment en version minibus. Le problème majeur des minibus électriques est leur faible autonomie, allant de 60 à 120 km. Si le kilométrage journalier nécessaire à l'exploitation de la ligne est inférieur à l'autonomie du minibus, alors clairement il est intéressant de privilégier ce moyen de transport. On peut également imaginer comme application des transports scolaires de courtes distances.

Le diesel est ici à son avantage grâce à son importante autonomie et sa grande flexibilité. Les minibus au gaz naturel sont rares, mais si leur approvisionnement en carburant peut être mis en place de façon financièrement intéressante, leur grande autonomie en ferait le parfait candidat face au diesel.

L'hybride hydrogène/électrique est ici extrêmement intéressant. Son autonomie identique voire même supérieure au diesel est parfaitement exploitée¹⁴⁵. Seul le coût pourrait ne pas en faire l'option choisie.

Le tableau 26 présente les deux options possibles pour ce troisième scénario.

Option A	Option B
Hybride hydrogène/électrique	Gaz naturel

Tableau 26 : recommandation scénario 3

5.4 Ligne de campagne

Ce scénario figure une circulation en campagne sur des distances importantes, mais sur un terrain relativement plat.

- Capacité moyenne (80 personnes)
- Puissance nécessaire moyenne
- Rayon d'action important (environ 300 km)
- Pollution et bruit moyennement important

Du fait de la nature de ce scénario, les caténaires sont à proscrire, par conséquent le trolleybus et le trolleybus à batterie sont directement hors-jeu. Pour ce qui est du bus à recharges rapides, il pourrait être envisageable si une version non-articulée était disponible, malheureusement ce n'est pas encore le cas. Il est clair que le bus diesel ou au gaz naturel pourraient parfaitement répondre à ce scénario, mais étant donné qu'il existe d'autres moyens de propulsion qui le sont également, il ne serait pas judicieux, dans une vision d'avenir, de miser sur ce moyen. Dans un même registre, le bus hybride diesel/électrique pourrait répondre aussi à ce besoin, mais en campagne le nombre d'arrêts est limité, et ceux-ci sont assez espacés, ce qui diminue l'intérêt d'un bus qui base son fonctionnement sur la récupération d'énergie au freinage.

Le bus électrique trouve enfin un sens ici. Son autonomie intéressante sur un parcours pas trop accidenté lui permet d'assurer le service tout au long de la journée sans interruption. Le fait qu'il ait une grosse réserve de

¹⁴⁵ <http://www.automobile-propre.com/breves/hyundai-h350-fuel-cell-minibus-hydrogene/>

puissance est également un avantage car la campagne regorge de terrains accidentés. Son silence le rend particulièrement attractif dans un environnement calme comme la campagne, au contact des petits villages et de la nature.

Le bus hybride hydrogène/électrique est ici encore à son avantage. En effet, la gamme de capacité disponible entre dans les critères du scénario, la puissance également, de même que l'autonomie. Le fait qu'il ne rejette que de la vapeur d'eau est également un gros point positif à la campagne. Seul le coût pourra retenir un exploitant de miser sur cette technologie. D'autant plus que le taux de couverture des charges de ces lignes de campagne est faible.

Les deux options possibles pour ce quatrième scénario sont indiquées dans le tableau 27.

Option A	Option B
Electrique	Hybride hydrogène/électrique

Tableau 27 : recommandation scénario 4

5.5 Ligne de montagne

Afin de simuler les conditions d'un parcours de montagne caractéristique de ceux que l'on peut trouver en Valais ou aux Grisons, on fait appel ici à des bus standards de 12 mètres de longueur, dont voici les caractéristiques retenues :

- Capacité moyenne (80 personnes)
- Puissance nécessaire élevée
- Rayon d'action important (plus de 400 km)
- Impact visuel important
- Pollution et bruit moyennement important
- Climat hivernal marqué

Ici encore l'argument principal est l'autonomie. Le bus doit être capable de parcourir de relativement longues distances sans ravitailler, et le terrain montagneux implique une puissance instantanée importante pour vaincre les dénivellations.

Le bus électrique à recharges rapides n'est clairement pas adapté à l'heure actuelle pour ce besoin, car il est difficilement imaginable de construire des stations de recharge rapprochées dans des coins isolés, avec tout ce que cela implique au point de vue logistique et en travaux de génie civil. De même, la capacité demandée ainsi que l'impact visuel empêchent le trolleybus et le trolleybus à batterie de répondre à ce besoin. Le bus hybride diesel/électrique n'est pas non plus adapté, en raison de sa faible puissance disponible. Idem pour le bus tout-électrique qui ne peut pas répondre à ce besoin, car son autonomie n'est pas suffisante. Le fait qu'il existe une contrainte supplémentaire avec le climat ne fait que renforcer l'incapacité des bus électriques en raison de la dégradation des performances avec la température. L'hybride hydrogène/électrique n'est également pas adapté à ce scénario à l'heure actuelle, en raison de son manque de puissance. Mais son autonomie importante pourrait lui permettre, à condition que la technologie évolue, de pouvoir répondre à ce scénario.

Reste alors le diesel et le gaz naturel. Si l'approvisionnement en gaz est possible, alors ce moyen devrait être privilégié tant il est moins polluant que le diesel, malgré les normes Euro VI qui ont permis au diesel de devenir relativement « propre ». Le gaz naturel jouit également d'une meilleure image auprès du public, et en utilisant du BioGNV, l'impact environnemental pourrait être réduit davantage. Pourquoi ne pas organiser la récupération et le recyclage des déchets des villages traversés pour fabriquer localement le carburant

nécessaire aux bus desservant ces localités ? Un bon moyen de rentabiliser au maximum l'exploitation de ce type de bus tout en apportant quelque chose d'intéressant à la collectivité publique.

A défaut, le bus diesel reste toujours la référence dans ce scénario grâce à son autonomie, sa facilité d'utilisation et son coût.

Le tableau 28 indique les deux options possibles pour ce dernier scénario.

Option A	Option B
Gaz naturel ou BioGNV	Diesel

Tableau 28 : recommandation scénario 5

6. Transition énergétique

Pour de multiples raisons, la transition énergétique vers l'utilisation d'énergies renouvelables et propres ou tout du moins l'abandon d'énergies fossiles est un défi majeur de notre société, et plus particulièrement au niveau des transports. Comme cela a été démontré dans cette étude, il est possible de migrer vers de nouvelles technologies. Malheureusement de nombreux obstacles retiennent toujours les entreprises, donc certains sont présentés ici. Cette liste est bien sûr non exhaustive.

6.1 Obstacles

6.1.1 Coûts

Les coûts sont un élément qui revient souvent comme argument en défaveur des moyens de propulsion alternatifs, et c'est normal. Une nouvelle technologie a besoin de temps pour se développer et se démocratiser, afin de faire baisser les coûts. Le coût d'achat des bus notamment est souvent mis en avant, mais il faut tenir compte de sa durée de vie et de ses coûts de maintenance, et pas seulement du coût initial.

6.1.2 Durée de vie des batteries d'un bus électrique

Il existe un réel problème de longévité des batteries. La perte d'autonomie avec le temps est un problème majeur pour les entreprises de transport, car le bus ne répond plus au cahier des charges initial, ce qui implique qu'il ne peut plus assurer toutes les dessertes journalières, ou qu'il ne peut simplement plus effectuer le parcours prévu de A à B.

6.1.3 Matière première, recyclage, et transport

Un problème éthique concerne l'extraction de la matière première nécessaire aux batteries et à leur recyclage. Il est connu de tous que la manière dont sont extraits les éléments (polluants) des batteries ne respecte très souvent jamais les Droits de l'Homme. Quelle est donc la responsabilité des entreprises et à un autre degré des usagers qui, en utilisant ces transports, cautionnent tacitement potentiellement le travail d'enfants ou l'esclavage ?

Un autre problème concerne la logistique, avec une augmentation croissante du nombre de batteries à recycler. Peu de centre de recyclage existent actuellement, et la Suisse est souvent contrainte d'exporter ses déchets en France, notamment. Ces batteries pèsent extrêmement lourd, leur transport implique l'utilisation de poids-lourds polluants. Tous ces éléments sont à garder en tête concernant l'adoption d'un bus à batterie.

6.1.4 Politique

Le pouvoir politique peut dans certains cas poser problème à une transition énergétique. Cela peut se traduire par un manque de volonté, ou par des mauvais choix imposés aux entreprises de transport. Il faut néanmoins affirmer que dans la majorité des cas les politiciens ont conscience du besoin de trouver des solutions au problème de la mobilité « propre ».

Ils font face à de nombreux dilemmes, notamment celui de la volonté de proposer une mobilité propre, couplée à une bonne efficacité énergétique, le tout à un prix intéressant et supportable sur le court terme. Ces éléments sont souvent antagonistes et viennent se mêler à d'autres intérêts tels que l'indépendance énergétique, ou la santé publique.

6.1.5 Risques et sécurité

Avec les nouvelles technologies, il existe de nouveaux risques, par exemple liés à l'hydrogène ou aux batteries. Ces risques peuvent concerner aussi bien les usagers ou les intervenants sur ces véhicules.

6.1.6 Flexibilité et fiabilité

Les moyens de propulsion alternatifs peinent à l'heure actuelle à concurrencer le diesel qui reste la référence pour une question de flexibilité, et potentiellement de fiabilité. Le bus diesel peut en effet être ravitaillé le matin et effectuer toute une journée sans interruption. Cette flexibilité permet de s'affranchir de bus supplémentaires. De même, la fiabilité d'un bus diesel n'est plus à prouver, ce n'est pas forcément le cas des autres technologies.

6.1.7 Législation concernant les trolleybus à batterie

Un point noir important freinant la transition énergétique pour les entreprises ayant choisi les trolleybus à batterie se trouve dans la loi. Celle-ci dit qu'une ligne de trolleybus peut être prolongée sans caténaires et desservie par des trolleybus à batterie, seulement si le tronçon rajouté ne dépasse pas 50% de la ligne électrifiée.

6.1.8 Manque de connaissances

Il existe parmi les décideurs un manque de connaissances et d'information concernant les technologies alternatives au diesel et leurs implications. Bien des études ont été effectuées, mais souvent les municipalités et les petites entreprises de transport n'ont pas toutes les cartes en main.

6.2 Propositions

6.2.1 Coûts

Il serait possible de prévoir ou d'augmenter les subventions publiques pour encourager les moyens de propulsion alternatifs. Une solution moins coûteuse pour l'Etat serait plutôt de pénaliser les moyens polluants au travers de taxes ou de pénalités, comme c'est le cas dans certaines villes avec les voitures polluantes qui sont bannies des hypercentres. Il faudrait également par exemple réduire les réductions et rétrocessions actuellement accordées aux carburants fossiles afin de diminuer leur intérêt.

Afin de faire baisser les coûts d'achats des bus, les différentes entreprises de transports publics pourraient se coordonner encore mieux sur leurs appels d'offre et leurs commandes, afin de bénéficier d'une plus grande standardisation et de rabais de flotte. Dans le même esprit, pourquoi pas mutualiser les stocks de pièces afin d'éviter l'achat coûteux d'une grande quantité de pièces détachées à l'achat des bus.

6.2.2 Durée de vie des batteries d'un bus électrique

Il s'agit de trouver des arrangements avec les fabricants des batteries pour, par exemple, échanger ses batteries après cinq à six ans, à moindre coût. Cela permettrait de conserver l'autonomie initiale, tout en profitant de l'évolution de la technologie des batteries avec les années. En effet, après cinq ans, le fabricant sera peut-être en mesure de proposer de meilleures batteries. Il existe déjà des contrats possibles avec les fabricants portant sur une garantie de performance moyennant un forfait mensuel¹⁴⁶.

Afin d'économiser les batteries, il est aussi possible de moins décharger la batterie lors de son utilisation. On parle ici de son état de charge. Travailler dans une zone de 70 à 100% permet en effet d'augmenter sa durée de vie par rapport à des cycles de décharge plus profonds. Le revers de la médaille est qu'il faut du coup une plus grande batterie pour conserver la même capacité en travailler sur une plage plus petite, mais c'est un paramètre à étudier lors du choix des batteries.

¹⁴⁶ https://www.volvobuses.be/content/dam/volvo/volvo-buses/markets/french/Fact_sheet_Hybrid_Battery_Contract_ServicePortfolio_FR_2015_00719.pdf

6.2.3 Matière première et recyclage des batteries problématique

Concernant la problématique des matières premières, il est nécessaire d'en chercher un approvisionnement validé par un organisme éthiquement reconnu et respecté. Cas échéant, un label suisse pourrait être envisagé, sous le patronage de la Confédération.

Pour ce qui concerne le recyclage des batteries, il est nécessaire de le rendre plus attractif dans notre pays, par exemple grâce à des arrangements avec des sociétés de recyclage. Il s'agit ici d'éviter que les batteries finissent dans les cours d'eau de pays pauvres. Le traitement au sein du pays du problème du recyclage permettrait ainsi de garantir que les produits toxiques seront traités avec soin et respect pour l'environnement. Cette activité liée aux nouvelles technologies énergétiques pourrait aussi générer des emplois axés sur une demande appelée à se développer fortement avec l'arrivée des bus électriques. Ici encore, il serait facilement possible de valoriser cet aspect auprès du public, qui est très réceptif à cet égard.

Une autre possibilité est de donner une seconde vie aux batteries, par exemple dans les maisons individuelles (pour panneaux solaires, « Smart Grid », etc.) ou dans des grandes entreprises. Une batterie qui a perdu 30% de sa capacité ne sera plus utile pour un bus, mais pourra sans problème encore être utilisée comme le fait la Poste en réutilisant dans un bâtiment des batteries ayant perdu trop de capacité pour être encore utilisées sur leurs scooters ou triporteurs¹⁴⁷.

6.2.4 Politique

Des débats de fond doivent être organisés entre les différents acteurs du milieu, afin d'accélérer la transition énergétique. Un plan d'action au niveau national devrait être entrepris, en disposant de connaissances approfondies, et visant des prises de décision concertées. Chaque agglomération a ses spécificités, mais les choix technologiques et énergétiques concernent toutes les entreprises de transport, qui ont un grand rôle à jouer dans cette transition.

Secondairement, des mesures imposées par l'OFT pourraient être mises en place afin d'inciter les entreprises de transports publics à se séparer des bus à carburants fossiles. A l'heure actuelle il n'y a pour ainsi dire aucune pression réelle contrairement à certains pays voisins. Bien au contraire, par la rétrocession des taxes, la Confédération, qui va à l'encontre des objectifs de la SE 2050 récemment avalisée par le peuple, poursuit une politique obsolète dans ce domaine.

Si la Confédération devait décider de cesser d'exempter les TP de l'impôt sur les huiles minérales et de la surtaxe sur les carburants, elle devrait leur verser une indemnité supérieure afin de leur donner les moyens de payer ces nouveaux impôts. Mais alors que les indemnités proviennent de la Confédération et des Cantons, l'impôt est uniquement fédéral. Dans l'hypothèse où les entreprises de transport concessionnaires ne pourraient pas se faire rembourser l'impôt, la Confédération encaisserait la totalité de l'impôt tout en ne continuant à payer qu'une partie de l'indemnité car cette dernière est partagée entre Confédération et cantons. Ainsi, une non-rétrocession des taxes pourrait pousser les cantons à électrifier les bus, mais les conduirait peut-être à combattre tout changement.

6.2.5 Sécurité

La sécurité des passagers et du personnel implique une application stricte et systématique des normes existantes, et cas échéant l'adaptation aux nouvelles normes, avec la mise en place d'un système de contrôle. Les normes ISO sont unanimement respectées dans les milieux industriels et permettent une gestion efficace des risques.

¹⁴⁷ <https://www.post.ch/fr/notre-profil/entreprise/responsabilite/une-deuxieme-vie-pour-les-batteries-des-scooters-de-la-poste>

L'application des normes de sécurité implique par exemple de garder une distance plus grande entre les véhicules lors de leur stockage au dépôt, ce qui accroît l'espace nécessaire au stockage des bus. Ceci doit être pris en compte au moment de la transition vers des alternatives au diesel.

Il est nécessaire en parallèle de sensibiliser les utilisateurs au fonctionnement des bus liées à une technologie qui véhicule une image de danger (hydrogène, gaz), et informer sur le dispositif mis en place pour limiter les risques.

6.2.6 Flexibilité et fiabilité

L'argument de bus manquant de fiabilité en raison de leur moyen de propulsion est souvent exagéré. Bien sûr, comme avec toute nouvelle technologie, des soucis de jeunesse sont là. Mais des bus de nouvelle génération circulent bien dans de nombreux pays avec succès comme cela a été mentionné dans l'état de l'art, et les récentes expériences en Suisse ainsi que les témoignages recueillis démontrent que la « phase de test » concernant les nouvelles technologies est passée. Les entreprises de transport se situent maintenant plus dans une phase d'étude de marché et d'appel d'offre, mais ne savent pas comment s'orienter. Ce constat est d'ailleurs à l'origine de la présente étude.

6.2.7 Législation concernant les trolleybus à batterie

Cette situation doit être résolue rapidement, car plus le temps avance, et en raison de l'évolution de la technologie des batteries, plus les batteries vont voir leur autonomie augmenter, ce qui va rendre d'autant plus difficile le respect de 50% d'électrification maximum de la ligne par caténaires, et donc réduire l'intérêt des entreprises à effectuer une transition énergétique vers cette technologie.

En effet, passé ces 50%, un trolleybus à batterie serait considéré comme un trolleybus, nécessitant une nouvelle homologation. Il convient de garantir la séparation légale adéquate de ces deux technologies.

6.2.8 Manque de connaissances

Ce rapport et le guide pratique devraient permettre d'aider les acteurs du marché à prendre les bonnes décisions. Il faudrait néanmoins approfondir ce travail, comme cela est détaillé dans la conclusion de ce rapport.

Les experts interviewés lors des entretiens ont clairement exprimé le besoin de pouvoir recourir à une information impartiale et à des outils permettant de prendre les bonnes décisions.

7. Conclusion

7.1 Constats

Il n'existe pas encore de solution universelle à la problématique du remplacement du moteur thermique diesel comme mode de propulsion des bus de transport public. Les technologies présentes sur le marché ou en voie de l'être offrent un intérêt variable selon les situations des lignes et des réseaux de transport. La présente étude identifie plusieurs situations-types (que nous avons appelées scénarios) et pour chacune d'elles évalue les atouts et les handicaps propres aux différentes familles technologiques.

Le moteur diesel constitue encore aujourd'hui la technologie la moins coûteuse et la plus éprouvée. La motivation des entreprises qui expérimentent d'autres modes de propulsion tient donc à d'autres arguments, comme l'image ou la volonté d'initier la transition énergétique. Anticipant une évolution du cadre politique, juridique et économique qu'elles sentent venir mais ne connaissent pas, les entreprises tâtonnent et peinent à fixer leur stratégie de flotte, qui nécessite pourtant des choix portant conséquence des années plus tard.

Heureusement, diverses technologies alternatives arrivent désormais à maturité et permettront dans un avenir proche de s'affranchir du diesel. Des obstacles existent à la transition énergétique dans ce domaine, largement détaillés dans les chapitres précédents.

Afin d'accélérer le transfert vers les modes de propulsion alternatifs au diesel, il serait nécessaire, d'une part, de prendre en compte les émissions de CO₂ dans les normes d'émissions applicables au bus. D'autre part, il serait bienvenu d'étendre la taxe sur le CO₂ aux carburants (et en extension aux transports) et non plus seulement aux combustibles fossiles.

Enfin, tant que les autorités commandant les prestations de transport n'assortissent aucune exigence concernant l'abandon des bus diesel aux contrats de prestations, il sera difficile aux entreprises seules d'assumer la transition vers les modes de propulsions alternatifs. Cette recherche a prouvé la difficulté d'opérer les justes choix technologiques, il semble donc évident que les études, projets et in fine, les décisions doivent être assumées collectivement par les collectivités et les entreprises de transport public.



Figure 29 : projet bus électrique en site propre¹⁴⁸

¹⁴⁸ <http://www.leparisien.fr/espace-premium/seine-et-marne-77/bus-metro-tram-gares-voici-les-nouveautes-pour-vos-transports-06-10-2016-6178811.php>

7.2 Pour une analyse méthodique des cas réels

Le constat principal à partager est que la diversité des situations d'offre, des profils d'exploitation, des conditions préexistantes des réseaux de transports public, mène inévitablement à des solutions devant être envisagées au cas par cas pour remplacer les bus diesel. Toutefois, ce travail a mené à l'établissement des profils types, clairement plus adaptés à certaines technologies plutôt qu'à d'autres.

Le tableau suivant résume les recommandations pour les différentes conditions d'exploitation étudiées :

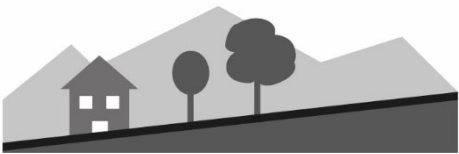
Profil d'exploitation	Caractéristiques principales	Options recommandées
 Ligne urbaine principale de forte capacité	Très grande capacité Disponibilité importante Impact visuel important Pollution et bruit minimum	Trolleybus à batterie Hybride diesel/électrique
 Ligne urbaine principale avec fortes pentes	Grande capacité Puissance nécessaire élevée Disponibilité importante Impact visuel important Pollution et bruit minimum	Trolleybus à batterie Bus à batterie à recharges rapides
 Ligne de quartier ou de rabattement	Petite capacité	Hybride hydrogène/électrique Gaz naturel (év. Électrique)
 Ligne régionale avec faibles pentes	Capacité moyenne Rayon d'action important	Electrique Hybride hydrogène/électrique
 Ligne régionale avec fortes pentes	Capacité moyenne Rayon d'action important	Gaz naturel ou BioGNV Diesel

Tableau 29 : résumé des recommandations en fonction des conditions d'exploitation

7.3 Perspectives

Un guide pratique complète le présent rapport. Ce guide, pensé à l'usage des managers des entreprises de transport, vise à renseigner de manière simple les décideurs politiques sur les technologies adaptées aux différents contextes.

S'il comble un manque immédiat, le guide pratique devrait ultérieurement être accompagné d'un outil interactif et évolutif, pouvant en permanence être mis à jour en fonction des avancées techniques et de l'évolution des coûts, par exemple. Un tel outil d'aide à la décision n'existe pas à l'heure actuelle.

Enfin nous recommandons de constituer une « task-force » de conseil personnalisé en collaboration avec la Commission Technique et Exploitation Bus Bus (CTEB) – commission technologie et exploitation bus – de l'UTP, qui pourrait se déplacer dans différentes villes afin de rencontrer les décideurs, d'étudier la situation, et de suggérer des solutions sur-mesure adaptées à l'entreprise de transport, aux autorités, et aux usagers. Composée de quelques acteurs clefs susceptibles de faire évoluer le domaine, cette task-force aurait également pour mission de capitaliser les connaissances et de produire des recommandations à l'adresse des pouvoirs publics et des entreprises de transport public.

8. Annexes

8.1 Comparaison technologies

8.1.1 Hybrides

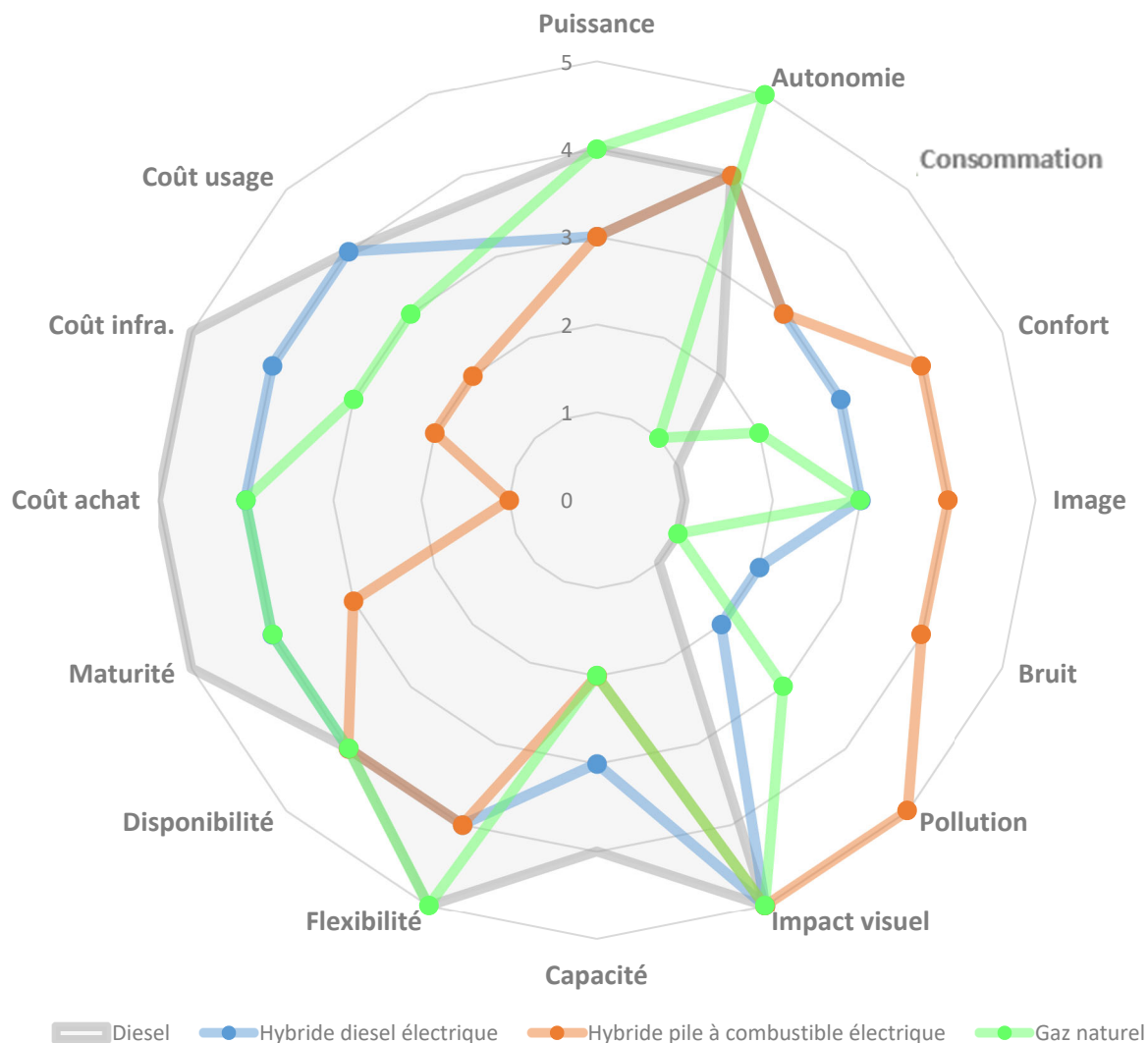


Figure 30 : comparaison technologies hybrides, gaz naturel, et diesel selon critères du chapitre 4

8.1.2 Electriques

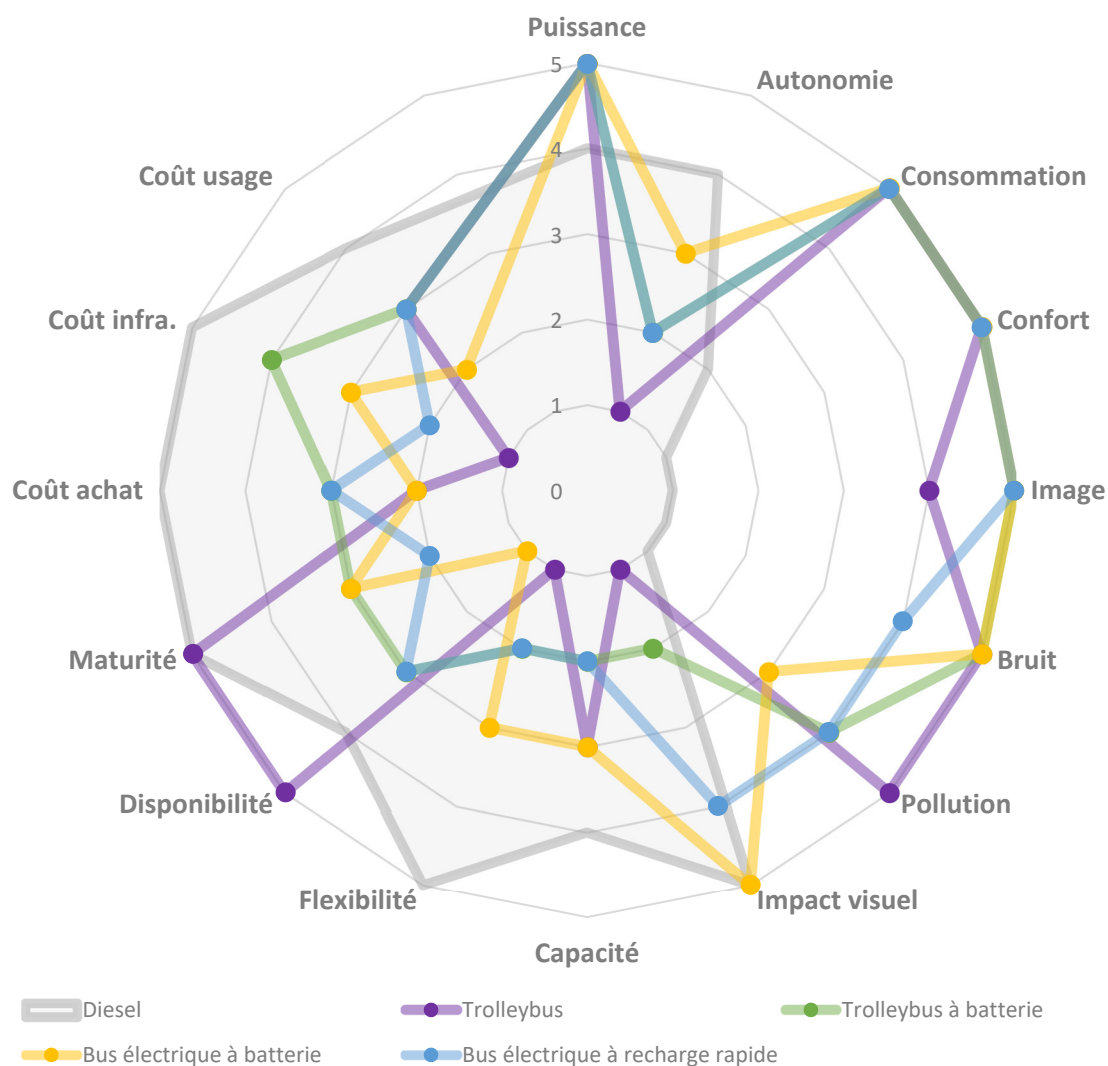


Figure 31 : comparaison technologies électriques et diesel selon critères du chapitre 4

8.2 Poster

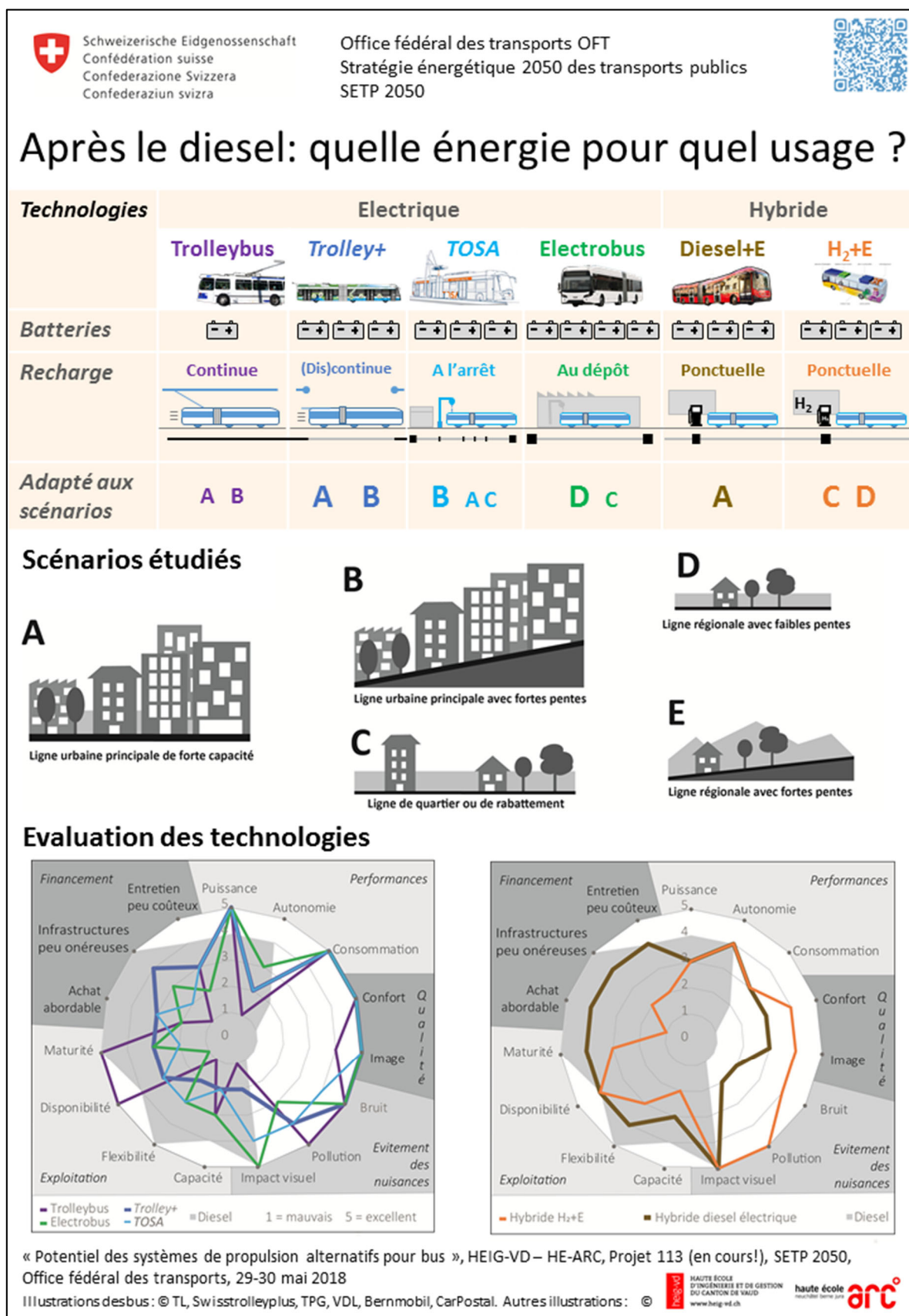


Figure 32 : poster pour le colloque de l'UTP en 2018

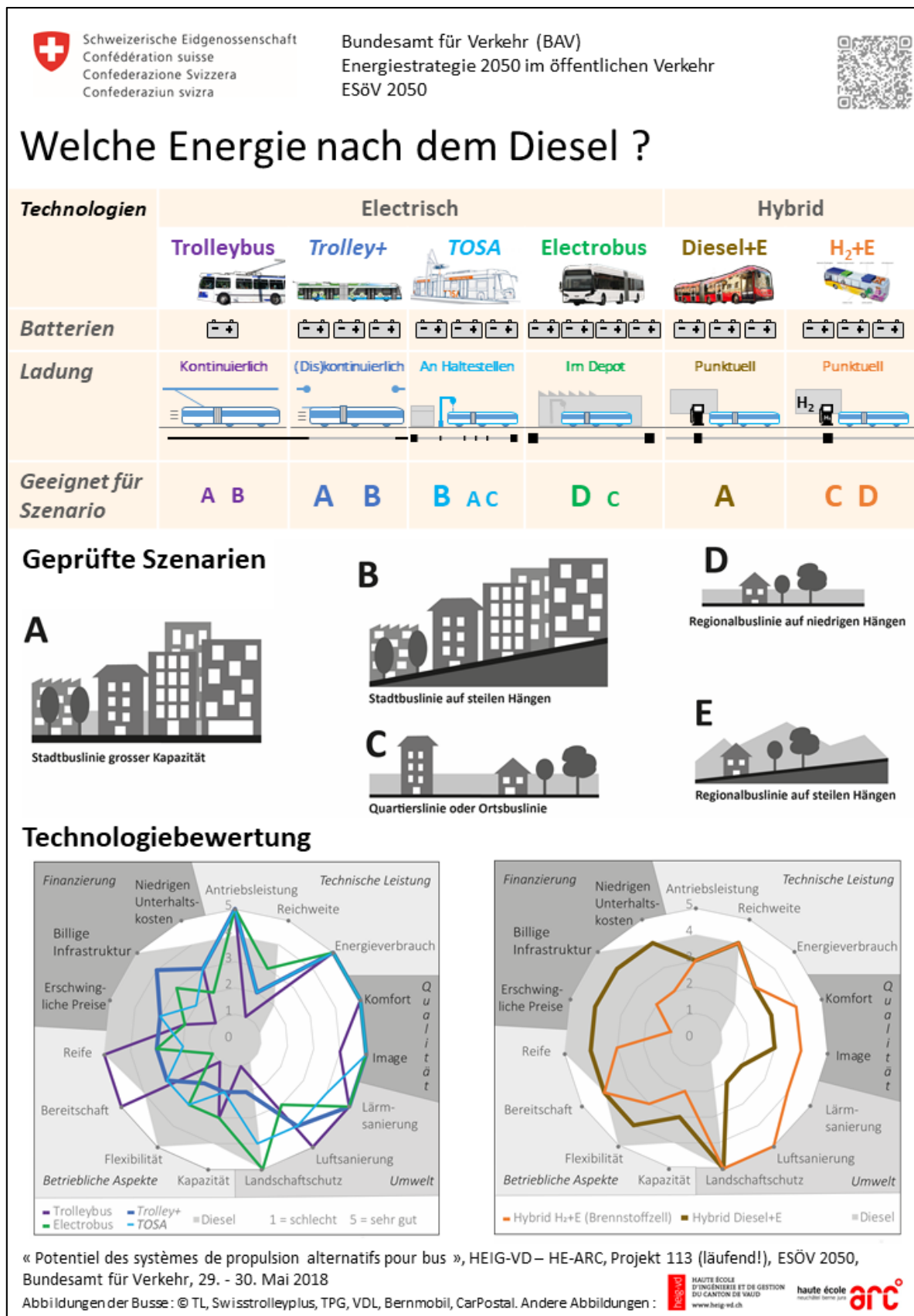


Figure 33 : poster (version en allemand) pour le colloque de l'UTP en 2018