



Office fédéral de l'énergie OFEN

Exploitation des bus équipés de systèmes de propulsion à énergies non fossiles : estimation du potentiel de réduction des émissions de CO₂ et possibilités d'encouragement

Étude de base

Rapport final
Zurich/Berne, 12 octobre 2020

Matthias Lebküchner, Hans-Jörg Althaus, Anne Greinus, Cornelia Graf, Brian Cox, Silvan Köppel

Impressum

Exploitation des bus équipés de systèmes de propulsion à énergies non fossiles : estimation du potentiel de réduction des émissions de CO2 et possibilités d'encouragement

Étude de base

Avec correction de la figure 31 à la page 118

Rapport final

Zurich/Berne, 12 octobre 2020

3422a_E-Bus-BFE_Schlussbericht_final_20201012.docx

Commanditaire

Office fédéral de l'énergie OFEN

Transports efficaces sur le plan énergétique

La présente étude a été financée par le programme « *Mise en œuvre de la Stratégie énergétique 2050 dans les transports publics - SETP 2050* » de l'Office fédéral des transports OFT.

Gestion de projet

Roberto Bianchetti, OFEN

Auteurs

Matthias Lebküchner, Hans-Jörg Althaus, Anne Greinus, Cornelia Graf, Brian Cox, Silvan Köppel

INFRAS, Binzstrasse 23, 8045 Zurich

Tél. +41 44 205 95 95

zuerich@infras.ch

Groupe de suivi

Roberto Bianchetti, OFEN

Christoph Schreyer, OFEN

Delphine Morlier, OFEN

Elena Burri, OFEN

Andrea Müller, OFT

Markus Liechti, OFT

Tristan Chevroulet, OFT

Walter Josi, OFT Nicolas

Schmidt, OFEV

Philipp Hallauer, OFEV

Isabel Scherrer, ARE

Kilian Constantin, UTP

Patrick Ruggli, CDCTP

Paul Schneeberger, OSR

Dominik Saner, CarPostal

Roman Zürcher, OER

David Sorg, VBZ

Olivier Augé, TPG

Ralf Kollegger, Engadin Bus

Andrea Vezzini, BFH

Table des matières

Impressum	2
Table des matières	3
Zusammenfassung	6
Résumé	19
Compendio	33
1.Mission et marche à suivre	46
2.Analyse de la situation des lignes de bus diesel en Suisse	47
Réponse et échantillon de l'enquête auprès des entreprises de transport	47
Indicateurs de la flotte	49
Indicateurs de ligne	54
3.Systèmes de propulsion et développements futurs	56
Terminologie / Définitions	56
Systèmes de propulsion	57
3.2.1. Sélection des options à envisager	57
3.2.2. Bus à batterie	59
3.2.2.1. Bus rechargés au dépôt	60
3.2.2.2. Bus alimentés par biberonnage statique	61
3.2.2.3. Bus à charge combinée	62
3.2.2.4. Bus alimentés par biberonnage dynamique (IMC, trolleybus à batterie)	63
3.2.3. Bus à piles à combustible	63
3.2.4. Bus hybrides et hybrides plug-in	64
3.2.5. Comparaison des coûts des véhicules	66
3.2.6. Comparaison des aspects environnementaux de la production de véhicules	67
Potentiels d'application technique en Suisse	69
4.Analyse d'impact	74
Procédure et critères	74
Études de cas	77
4.2.1. Vue d'ensemble	77
4.2.2. Définition des études de cas du trafic local	79
4.2.3. Définition des études de cas du trafic régional du Plateau	81
4.2.4. Définition des études de cas du trafic régional – région de montagne	84
Coûts	86
4.3.1. Résultats pour le trafic local	86
4.3.2. Résultats pour le trafic régional du Plateau	94
4.3.3. Résultats pour le trafic régional d'une région de montagne	98
4.3.4. Bus hybrides	101
Écologie	102
4.4.1. Émissions de gaz à effet de serre	102

4.4.2.	Consommation d'énergie primaire	104
4.4.3.	Émissions locales de polluants atmosphériques	106
4.4.4.	Émissions de bruit	108
	Coûts d'évitement du CO ₂	108
	Autres critères	111
	Besoins en alimentation électrique pour les bus à batteries	114
	Principales conclusions – résumé	114
5.	Cadre réglementaire, financement des transports publics et possibilités de financement	119
	Remarques préliminaires	119
	Conditions cadres actuelles ainsi que financement et subventions en Suisse	121
5.2.1.	Cadre réglementaire des entreprises de transport et financement des transports publics	121
5.2.2.	Mesures d'encouragement nationales et autres instruments de financement fédéraux	130
5.2.3.	Conditions-cadres cantonales et sélection de mesures d'encouragement communales	138
5.2.4.	Conclusion intermédiaire	158
	Regard sur l'étranger	164
5.3.1.	Cadre juridique européen (directive sur les véhicules propres)	164
5.3.2.	Études de cas à l'étranger	165
5.3.3.	Options d'achat et possibilités de financement	172
5.3.4.	Conclusion intermédiaire	176
6.	Synthèse	177
	Potentiel des bus sans fossile et surcoûts	177
	Besoins de financement et instruments de financement	186
	Conclusion	195
Annexe		197
A1	Contexte des batteries pour l'électromobilité	197
A1.2	Recyclage ou « seconde vie » des batteries en fin de vie	202
A1.3	Aspects environnementaux et criticité des matières premières	204
A2	Contexte sur les piles à combustible	215
A3	Contexte sur les carburants renouvelables	217
A3.1	Biocarburants	217
A3.2	Carburants synthétiques	219
A4	Contexte sur le bruit des bus conventionnels et électriques	221
A5	Hypothèses pour le calcul des coûts A5.1. Hypothèses générales	225
A5.2	Hypothèses de coût des bus	226
A5.3	Hypothèses de coûts pour l'infrastructure de recharge	227
A6.2	Besoin en énergie	230
A6.3	Facteurs d'émission	232
A7	Résultats détaillés sur le calcul des coûts	233

A8 Hypothèses sur le mix de bus à batteries pour l’extrapolation des coûts supplémentaires	242
Répertoire des illustrations	246
Répertoire des tableaux	249
Littérature	252

Zusammenfassung

Auftrag und Vorgehen

Fossilfreie Antriebstechnologien könnten den öffentlichen Busverkehr in der Schweiz umwelt- freundlicher machen. Heute stehen im öffentlichen Verkehr rund 5'500 Dieselsebusse im Einsatz. Davon fahren etwa zwei Drittel auf Regionallinien und ein Drittel im Ortsverkehr. Die heute teilweise hohen Mehrkosten gegenüber Dieselsebussen erschweren jedoch die Umstellung auf umweltfreundlichere Antriebe. Aus Sicht der Energie- und Klimapolitik ist die Förderung von fossilfrei angetriebenen Bussen im öffentlichen Busverkehr zu begrüssen. Der Ersatz von Dieselsebussen würde dadurch wesentlich beschleunigt und der ÖV würde eine Vorbildfunktion ein- nehmen. Heute sind jedoch weder Kosten noch Nutzen einer Förderung verlässlich zu beziffern. Deshalb sollen belastbare Grundlagen zum Einsatz- und CO₂-Reduktionspotenzial von Bussen mit alternativen Antrieben geschaffen werden, als Basis für den Postulatsbericht 19.3000 «Nichtfossilen Verkehrsträgern im öffentlichen Verkehr auf Strassen zum Durchbruch verhelfen».

Die vorliegende Grundlagenstudie zeigt unter Berücksichtigung des technologischen Fortschritts auf, welche fossilfreien Antriebsoptionen sich im öffentlichen Busverkehr aus technologischer Sicht eignen und welche Kosten und welcher Umweltnutzen damit verbunden sind. Daraus abgeleitet werden heutige bzw. zukünftige Mehrkosten gegenüber den Dieselsebussen. Weiter zeigt die Studie, wieweit sich diese Mehrkosten mit den bestehenden Rahmenbedingungen und Fördermöglichkeiten im bestellten ÖV finanzieren lassen. Daraus abgeleitet wird der Finanzierungsbedarf zur verstärkten Förderung fossilfreier Antriebstechnologien. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Dieselsebusse heute rund 2% der CO₂-Emissionen des Verkehrs in der Schweiz ausmachen. Allfällige Fördermechanismen sollten daher einfach und effizient gehalten sein.

Welche fossilfreien Antriebsoptionen für den öffentlichen Busverkehr?

In einer Auswirkungsanalyse wurden unter der Prämisse «fossilfrei» Elektrobussen sowie Busse mit Verbrennungsmotoren, die mit Biotreibstoffen (Biodiesel und Biogas) angetrieben werden, untersucht und mit dem konventionellen Dieselsebus Euro 6 verglichen. Bei den Elektrobussen wurden einerseits Batteriebusse mit verschiedenen Ladekonzepten¹ und andererseits Brennstoffzellenbusse berücksichtigt.

¹ Depotlader: Busse mit grossen Batterien, die über Nacht während mehreren Stunden im Depot laden.

Gelegenheitslader statisch: Busse mit kleinen Batterien, die im Stillstand, typischerweise an Endhaltestellen, während mehreren Minuten laden.

Gelegenheitslader dynamisch, auch Batterietrolleybus genannt: Busse, die teilweise am Oberleitungsnetz fahren und während dieser Zeit eine Batterie, die auch fahrleitungsloses Fahren ermöglicht, laden.

Aus ökologischer Sicht weisen die Batterie-Busse klare Vorteile auf, sowohl bei den Treibhausgasemissionen und beim Primärenergiebedarf als auch bei den lokalen Luftschadstoffen und beim Lärm in den Quartieren. Emissionsseitig bewegen sich die positiven Effekte bei den lokalen Umweltbelastungen im Orts- und im Regionalverkehr in ähnlichen Grössenordnungen. Hinsichtlich der Betroffenheit sind jedoch die Effekte beim Ortsverkehr grösser als beim Regionalverkehr.

Der mit Wasserstoff betriebene Brennstoffzellenbus schneidet bzgl. Treibhausgasemissionen und lokaler Luftschadstoffe ähnlich ab wie die Batteriebusse. Er weist aber einen sehr hohen Primärenergiebedarf auf, weil einerseits die Herstellung von Wasserstoff energieintensiv ist und andererseits die Umwandlung von Wasserstoff in Strom in der Brennstoffzelle mit grossem Energieverlust verbunden ist.

In Batteriebussen sind im Vergleich zu Dieselnissen mehr potenziell kritische Materialien verbaut. Die relevantesten sind Lithium, Kobalt, Graphit und Seltene Erden. Die ersten drei sind vor allem in den Batterien enthalten, Seltene Erden vorwiegend in den Elektromotoren. Mit den heute bekannten Recyclingverfahren können diese Materialien zu fast 100% zurückgewonnen werden. Bei Busbatterien ist davon auszugehen, dass aufgrund des in der Batterie gespeicherten Materialwerts ein Recycling am Lebensende tatsächlich stattfinden wird. Trotzdem kann bei wachsendem Bestand an Batteriefahrzeugen (v.a. im PW-Bereich) die Nachfrage nach diesen kritischen Materialien so stark steigen, dass sich langfristig Knappheiten ergeben werden. Da all diese Materialien in Elektrofahrzeugen aber substituierbar sind, werden Optionen bestehen, mit allfälligen Knappheiten umzugehen.

Die Biotreibstoffe weisen zwar einen geringeren Primärenergiebedarf als die Elektrobusse auf, weil der Energieinhalt der Abfälle, aus denen die hier betrachteten Biotreibstoffe hergestellt wurden, aufgrund einer methodischen Setzung in der Ökobilanz nicht mitgezählt wird. Sie haben aber ein geringeres Treibhausgas-Reduktionspotenzial (Biogas) als Elektrobusse und bringen gegenüber Dieselnissen keine massgebenden Verbesserungen bei den lokalen Luftschadstoffemissionen und beim Lärm (Biogas und Biodiesel).

Kostenmässig ist zu unterscheiden nach der kurzfristigen Situation und den absehbaren Entwicklungen. Ebenso sind die preislichen Rahmenbedingungen relevant, die zum Teil auch von regulatorischen Festlegungen abhängen (z. Bsp. Mineralölsteuer-Rückerstattung). Unter den heutigen Rahmenbedingungen sind die Batteriebusse kurzfristig noch vergleichsweise teuer und die Einsatzpotenziale für zweckmässige Einsätze beschränkt (v.a. für den Depotlader mit noch ungenügenden Reichweiten pro Ladung). Längerfristig haben die Batteriebusse aber das Potenzial, je nach Einsatzbedingungen und Annahmen zur Batterie-Lebensdauer, die kostengünstigsten Optionen zu werden. Positiv zugunsten der Batteriebusse würde sich auch die Aufhebung der Mineralölsteuer-Rückerstattung auswirken, die heute die Dieselnisse begünstigt.

Kurzfristig stellen die Biotreibstoffe tendenziell die günstigsten Optionen dar. Fraglich ist jedoch, ob in einer Übergangsphase, bis die Vorteile der Batterie-Busse voll zum Tragen kommen, auf diese Optionen umgeschwenkt werden soll. Denn hierfür wären Biodiesel- und Biogastankstellen zu errichten sowie Werkstattanpassung und Personalumschulungen für eine Übergangstechnologie erforderlich. Gegen Biotreibstoffe spricht auch die beschränkte Verfügbarkeit insbesondere für in der Schweiz hergestellte Biotreibstoffe. CH-Biodiesel aus gebrauchtem Speiseöl (Used Cooking-Oil) dürfte beispielsweise nicht für alle ÖV-Busse der Schweiz ausreichen und könnte somit höchstens auf einzelnen Linien eine Option darstellen. In diesem Zusammenhang stellt sich deshalb auch die Frage, ob aus einer über den öffentlichen Verkehr hinausgehenden Gesamtsicht eine Verwendung von Biotreibstoffen in Bereichen im Vordergrund stehen soll, wo andere Alternativen für eine Reduktion der Treibhausgasemissionen zurzeit noch fehlen, zum Beispiel im Langstrecken-Strassengüterverkehr, in der Hochseeschiffe oder im Flugverkehr. Analoges gilt auch für Plug-in-Hybridbusse mit Biotreibstoffen.

Aus einer Gesamtbetrachtung über Kosten und Umweltnutzen sollen folglich Elektrobusse als fossilfreie Alternative zu den Dieselnissen im Fokus stehen, dies bereits kurz-/mit- telfristig, allerdings nur für aus Kostensicht zweckmässige Einsätze. Längerfristig wird sich aufgrund der absehbaren Entwicklungen bei den Batteriebussen, sowohl in technischer Hinsicht als auch bzgl. Kosten, das Potenzial für zweckmässige Einsätze sowohl im Orts- als auch im Regionalverkehr stark erhöhen. Damit sinken auch die kurzfristig vergleichsweise hohen CO₂-Vermeidungskosten der Elektrobusse deutlich auf Werte unter 200 CHF pro Tonne CO₂. Bei einer Aufhebung der Mineralölsteuerrückerstattung sinken sie – unter idealen Einsatzbedingungen – sogar gegen Null. Im Zusammenhang mit den vor allem kurzfristig noch hohen CO₂-Vermeidungskosten ist zu berücksichtigen, dass Elektrobusse, im Gegensatz zu mit Biotreibstoffen angetriebenen Bussen, helfen, weitere externe Kosten in den Bereichen Lärm und Luftschadstoffe zu vermeiden, die zusammen rund drei Mal so hoch sind wie die Klimakosten des Verkehrs (INFRAS & Ecoplan 2019). Die Mehrkosten sollen daher nicht nur in Bezug zur CO₂-Reduktion betrachtet werden.

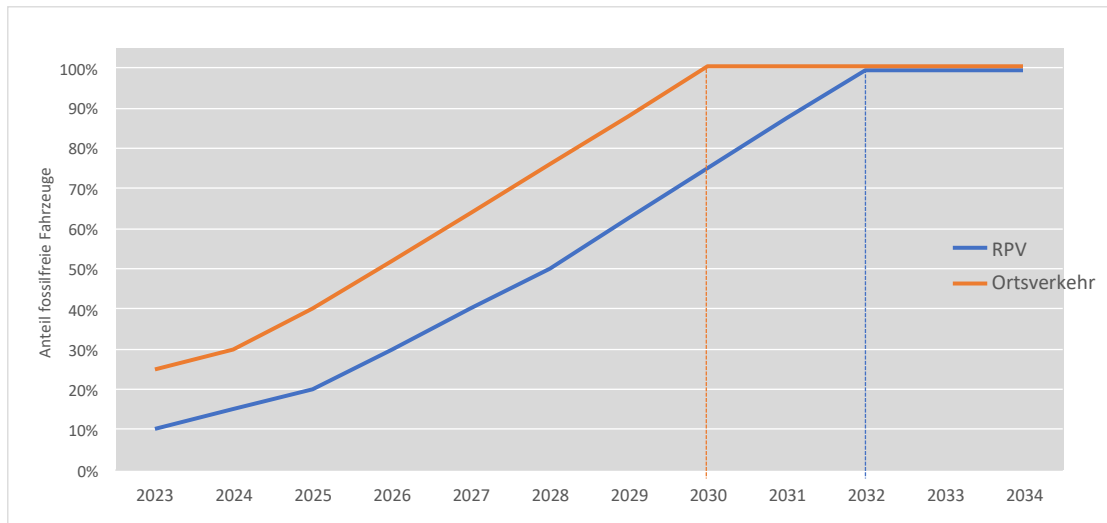
Welche E-Bus-Optionen – Batterietrolleybus, Depotlader, Gelegenheitslader statisch oder auch der Brennstoffzellenbus, wenn bspw. grosse Einsatzreichweiten über 400-500 km pro Tag erforderlich sind – im Vordergrund stehen, hängt jeweils von den spezifischen Umfeldbedingungen einer Linie oder eines Liniennetzes. Dies kann bzw. soll auch nicht in dieser Grundlagenstudie vorgegeben werden.

Potenzial für Batteriebusse und Mehrkosten

Rein technisch wäre es möglich, bei den anstehenden Ersatzbeschaffungen jeweils sämtliche Fahrzeuge durch fossilfreie Busse zu ersetzen (im Folgenden als Szenario «maximal» bezeichnet). Die Batteriebusse sind heute jedoch noch vergleichsweise teuer. Sie werden deshalb kurzfristig noch in vielen Einsatzfeldern aus wirtschaftlicher Sicht als nicht zweckmässig beurteilt. Einerseits sind die Fahrzeuge und Batterien auf dem Markt generell noch teuer. Andererseits wären aufgrund noch zu geringer Reichweiten (beim Depotlader) oder ungenügender Wendezeiten zum Nachladen am Linienende (Gelegenheitslader statisch) zusätzliche Fahrzeuge gegenüber dem Dieselbusbetrieb erforderlich.

Vor allem aus Kostenüberlegungen, aber auch aufgrund entsprechender Vorlaufzeiten für die Beschaffung der Fahrzeuge, die Herrichtung der Ladeinfrastrukturen und die Schulung des Personals ist es kurz-/mittelfristig nicht zweckmässig bzw. realistisch, bei den anstehenden Busersatzbeschaffungen in den nächsten Jahren sämtliche Dieselbusse durch Batteriebusse zu ersetzen. Deshalb wurde – in Anlehnung an aktuelle E-Busstrategien von Transportunternehmen – ein «realistisches» Szenario für die Umstellung von Diesel- auf Batteriebusse definiert. Dieses wurde für den Orts- und Regionalverkehr (OV, RPV) unterschiedlich angesetzt mit der Überlegung, dass die Umstellung im Ortsverkehr schneller verlaufen wird als im RPV, weil im Orts- bzw. Agglomerationsverkehr aufgrund kürzerer Linien, i.d.R. wenig anspruchsvoller Topografie und teilweise bereits bestehender Oberleitungsinfrastruktur bessere Voraussetzungen bestehen. Die folgende Grafik zeigt, welche Annahmen bei diesem sog. Szenario «realistisch» in Bezug auf die Anteile, welche bei den anstehenden Busersatzbeschaffungen durch Batteriebusse ersetzt werden, unterstellt sind. Beim Ortsverkehr gehen wir bereits kurzfristig von Anteilen zwischen 25% bis 50% aus, beim RPV von 10% bis 30%. Bei diesem Szenario werden v.a. grössere Transportunternehmen, welche bereits Pilotversuche mit Batteriebussen durchführen und E-Bus-Strategien formuliert haben, aber auch kleinere, innovative TUs mitziehen. Beim Ortsverkehr werden demnach ab ca. 2030 sämtliche Ersatzbeschaffungen durch Batteriebusse erfolgen, beim Regionalverkehr zwei Jahre später ca. im Jahr 2032.

Abbildung Z-1: Anteil Batteriebusse an den neu zu beschaffenden Fahrzeugen für das Szenario «realistisch»



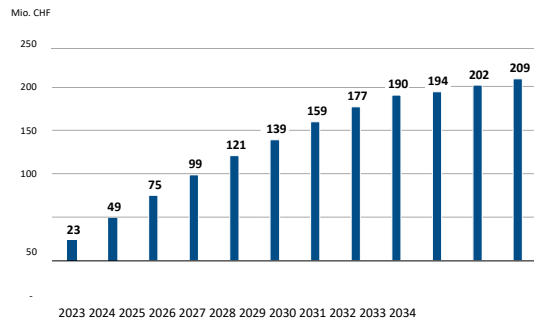
Lesebeispiel: Im Jahr 2023 werden von den Bussen im RPV, welche neu zu beschaffen sind, 10% durch Batteriebusse und 90% durch konventionelle Diesel- oder Diesel-Hybridbusse ersetzt. Dieser Anteil nimmt von Jahr zu Jahr zu. Ab dem Jahr 2032 werden jeweils sämtliche neu zu beschaffenden Busse durch Batteriebusse ersetzt. Im Ortsverkehr werden im Jahr 2023 bereits 25% der neu zu beschaffenden Busse durch Batteriebusse ersetzt. Der Zeitpunkt, ab welchem jeweils sämtliche Fahrzeuge durch Batteriebusse ersetzt werden, liegt bereits im Jahr 2030.

Grafik INFRAS. Quelle: Eigene Annahmen

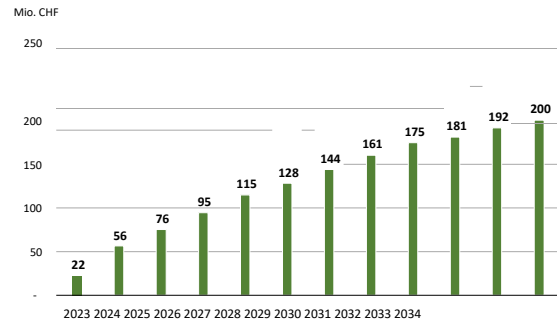
Zwischen 2023 und 2034 wären folglich im RPV rund 1'900 Fahrzeuge oder rund 50%, im Ortsverkehr knapp 1'300 Fahrzeuge oder rund 70% der Gesamtflotte zu ersetzen. Die folgende Abbildung Z-2 zeigt die für den Regionalverkehr und den Ortsverkehr resultierenden Mehrkosten für die TU für die beiden Szenarien «maximal» und «realistisch» unter den aktuellen Rahmenbedingungen mit Mineralölsteuer-Rückerstattung. Bei den Elektrobussen ist dabei eine Lebensdauer der Fahrzeuge von 12 Jahren (wie bei Dieselbussen) und einer Lebensdauer der Batterien von 6 Jahren unterstellt. Für die Gelegenheitsladerbusse mit mehreren Ladezyklen pro Tag sind die 6 Jahre Batteriebensdauer realistisch angesetzt. Für die Depotladerbusse mit grossen Batterien und i.d.R. *einem* Ladezyklus pro Tag handelt es sich hingegen um eine konservative Annahme; bei diesen Bussen ist eine Batteriebensdauer von gegen 12 Jahren durchaus realistisch. Längere Lebensdauern bei Elektrofahrzeugen und Batterien verringern grundsätzlich die Mehrkosten gegenüber Dieselbussen.

Abbildung Z-2: Jährliche Mehrkosten bei Umstellung von Dieselbussen auf Batteriebusse (Grobschätzung)

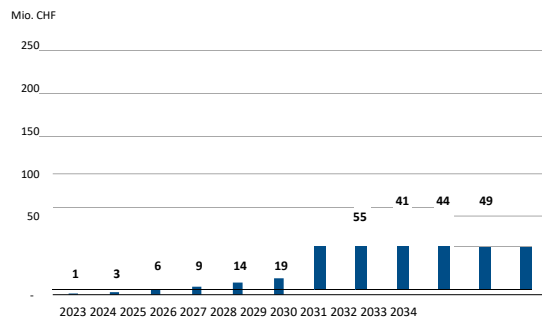
Regionalverkehr (RPV) Szenario «maximal»



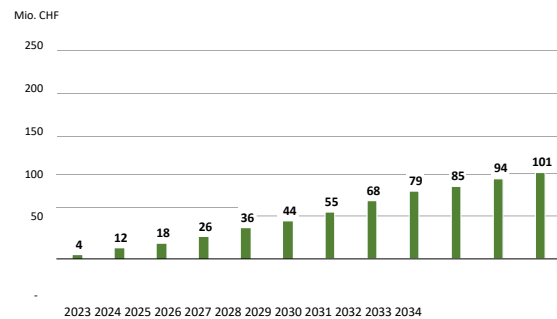
Ortsverkehr Szenario «maximal»



Szenario «realistisch»



Szenario «realistisch»



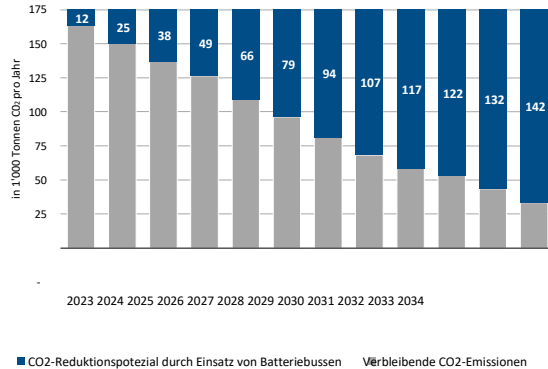
Grafik INFRAS.

CO₂-Reduktionspotenzial mit Batteriebussen

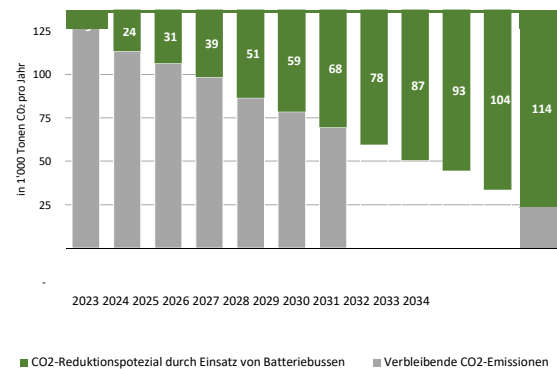
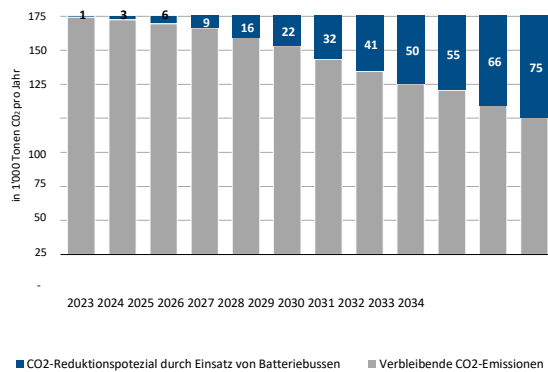
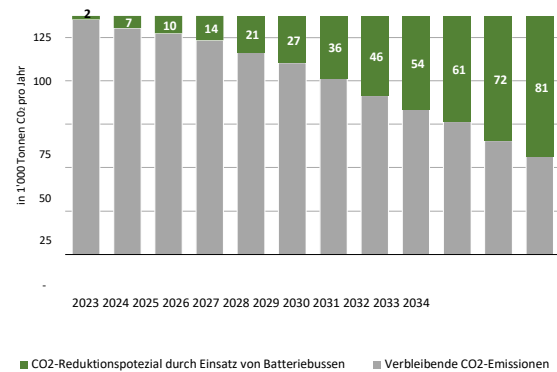
Abbildung Z-3 zeigt das CO₂-Reduktionspotenzial im Regional- und Ortsverkehr für die beiden Szenarien. Im Szenario «maximal» beträgt dieses im Jahre 2034, wenn sämtliche Dieselbusse auf Batteriebusse umgestellt sind, ein Reduktionspotenzial von 80–85%. Beim Szenario «realistisch» liegt im Regionalverkehr das Reduktionspotenzial im Jahr 2034, wenn rund die Hälfte der Dieselbusse auf fossilfreie Busse umgestellt sind, bei 40–45%. Im Ortsverkehr sind im Jahr 2034 rund 70% der Dieselbusse auf Batteriebusse umgestellt. Das entsprechende CO₂-Reduktionspotenzial liegt in der Grössenordnung von 60%.

Abbildung Z-3: CO₂-Reduktionspotenzial einer Umstellung von Dieseldieseln auf Batteriebusse**Regionalverkehr (RPV)**CO₂-Emissionen 2019 aller Dieseldieseln: 175'000 t/a

Szenario «maximal»

**Ortsverkehr**CO₂-Emissionen 2019 aller Dieseldieseln: 135'000 t/a

Szenario «maximal»

**Szenario «realistisch»****Szenario «realistisch»**

Grafik INFRAS.

Regulatorische Rahmenbedingungen, ÖV-Finanzierung und Förderinstrumente

Zusätzlich zur (ordentlichen) Finanzierung und Bestellung des Orts- und Regionalverkehrs durch Bund, Kantone und Gemeinden spielen bestehende Fördermassnahmen aktuell eine eher untergeordnete Rolle. Sie fokussieren v.a. auf elektrisch angetriebene Fahrzeuge (Tabelle Z-1). Biodiesel- und Biogas-Busse werden heute v.a. im Rahmen der ÖV-Bestellung finanziert. Neuartige Lösungen und Innovationen im Sinne der F&E sowie Innovationen im ÖV (BAV) und des P-D-L-Programms (BFE) sind im Hinblick auf die Marktdurchdringung nicht relevant. Das Programm für den Agglomerationsverkehr (ARE) finanziert v.a. infrastrukturseitige Massnahmen und nur in Ausnahmefällen die Beschaffung von Fahrzeugen. Das Instrument CO₂-Kompensationspflicht Treibstoffimporteure mit dem Kompensationsprojekt «Elektro- und Hybridbusse» ist das einzige ergänzende Instrument bzw. Programm auf nationaler Ebene, welches zusätzlich zur ÖV-Finanzierung die Mehrkosten von fossilfreien oder -armen Fahrzeugen finanziell fördert, wobei die Zusätzlichkeit erfüllt sein muss und sich die TU die CO₂-Kompensation nicht an-rechnen lassen können.

Zuständigkeiten, Förderumfang und Geltungsbereich variieren bei den bestehenden Finanzierungsmöglichkeiten und Fördermassnahmen. Auch die Prozesse folgen unterschiedlichen Gesetzmässigkeiten. Die ordentliche ÖV-Finanzierung und das das Programm für den Agglomerationsverkehr (PAV) sind regelmässig laufende Prozesse, wobei diese i.d.R. alle zwei bzw. vier Jahre beginnen. In der ordentlichen ÖV-Finanzierung sind alle drei Ebenen der Gebietskörperschaften involviert, wobei den Kantonen eine zentrale Rolle zukommt. Zusätzliche Fördermassnahmen auf kantonaler und kommunaler existieren nur in einzelnen Fällen. Die Situation ist entsprechend komplex.

Tabelle Z-1: Finanzierung bzw. Fördermöglichkeiten von Fahrzeugen und Antriebstechnologien

	E-Depotla- der	E-Gelegen- heitslader	Batterie- Trolleybus	E-Bus mit Brenn- stoffzelle	Biodiesel- Bus	Biogas-Bus
Ordentliche ÖV-Finanzierung						
F&E sowie Innovationen im ÖV aus RPV-Kredit (ab 2022)*						
P-D-L-Programm*						
Programm Agglomerationsver- kehr (PAV)**						
CO ₂ -Kompensationspflicht Treibstoffimporteure, mycli- mate Kompensationsprojekt «Elektro- und Hybridbusse»						
Kommunale Förderung Fahr- zeug + Ladeinfrastruktur (Bsp. Stromsparerfonds/ewz)						

* Es werden zwar keine Antriebstechnologien ausgeschlossen, die Fördermöglichkeiten haben jedoch an Bedeutung verloren (fehlender Innovationscharakter von neuen Investitionen).

** Mitfinanzierung von Oberleitungen, Ladestationen und Mehrkosten für die Beschaffung von Fahrzeugen (v.a. E-Fahrzeuge als Gelegenheits-/Depotlader), sofern diese zu Einsparungen der Infrastrukturkosten für Oberleitungen für Trolleybusse führen, möglich (Art. 17a Abs. 2^{bis} MinVG).

Tabelle INFRAS.

Da der ÖV öffentlich bestellt und finanziert wird, stellt sich die grundsätzliche Frage, inwiefern es zusätzliche Fördermassnahmen braucht oder ob im Rahmen des Bestellprozesses (und auch im Rahmen der strategischen Zielsetzungen der i.d.R. öffentlichen Unternehmen) die Umstellung auf bzw. Durchdringung mit fossilfreien Fahrzeugen im ÖV gefördert werden kann. Den Kantonen, welche die RPV-Bestellung koordinieren und oft im Ortsverkehr mitfinanzieren, kommt eine zentrale Rolle zu. Kantonale Strategien und Konzepte für einen fossilfreien, energieeffizienten ÖV können die Durchdringung fördern. Gleichzeitig müssen hierfür aber auch die entsprechenden finanziellen Mittel seitens Bund, Kantonen und Gemeinden zur Verfügung stehen.

Rund ein Drittel der Kantone hat aktuell eine Strategie für einen fossilfreien, energieeffizienten ÖV. In zwei Kantonen ist eine Strategie in Vorbereitung. In fast allen Kantonen können die Mehrkosten für fossilfreie, energieeffiziente Busse im Rahmen der ordentlichen ÖV-Finanzierung grundsätzlich finanziert werden oder werden bereits mitfinanziert. Inwieweit hierfür die notwendigen finanziellen Mittel künftig zur Verfügung stehen, kann nicht beurteilt werden und war nicht Gegenstand der Studie. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass die jeweilige finanzielle Situation in den Kantonen und Gemeinden sehr unterschiedlich ist.

Das RPV-Bestellverfahren und das Qualitätsmesssystem im RPV (als Basis für Zielvereinbarungen) berücksichtigt heute keine Umweltziele. Vorgaben zur Beschaffung – wie dies der Europäische Rechtsrahmen (Clean Vehicle Directive) vorsieht – gibt es im RPV nicht. Neu wird je- doch die Beschaffung von alternativ angetriebenen Bussen im RPV vorab zu genehmigen sein. Auf kantonaler Ebene gibt es vereinzelt Beschaffungsvorgaben (z.B. im ÖV-Gesetz von Basel-Stadt). Generell ist die Zusätzlichkeit (Additionalität) von Fördermassnahmen und ÖV-Finanzierung zu beachten. Werden Vorgaben betreffend der Umweltstandards der zu beschaffenden Busse seitens der Besteller gemacht, kann die Zusätzlichkeit im Rahmen von Kompensationsprojekten wie das Programm «Hybrid- und Elektrobus» des Instruments der CO₂-Kompensationspflicht Treibstoffimporteure nicht mehr als nachgewiesen gelten. Dieses nationale Förderinstrument könnte entsprechend an Bedeutung verlieren.

Mit der Mineralölsteuerrückerstattung für KTU als indirekte Finanzhilfe besteht gleichzeitig ein bedeutender Fehlanreiz im Hinblick auf die Umstellung auf fossilfreie Busse. Die Rückerstattungen an KTU machen heute durchschnittlich rund 70 Mio. CHF pro Jahr aus.

Folgerungen zum Potenzial für Batteriebusse und Mehrkosten

Eine kurzfristige vollständige Umstellung der Dieselbusflotte auf Batteriebusse wäre zwar rein technisch möglich, ist jedoch angesichts des technologischen Stands weder im Orts- noch im Regionalverkehr aus wirtschaftlicher Sicht zweckmässig und sinnvoll. Die Batteriebusse sind unter den heutigen Rahmenbedingungen noch vergleichsweise teuer. Und die Depotlader lösen wegen noch ungenügender Reichweiten einen höheren Fahrzeugbedarf mit entsprechenden Folgekosten aus. Weil davon auszugehen ist, dass die verfügbaren Finanzmittel von Bund, Kantonen und Gemeinden für den öffentlichen Verkehr beschränkt sind, geht es v.a. kurz-/mittel-fristig auch um eine Umweltnutzenoptimierung zwischen Angebotsausbau (mit dem Ziel, die Verlagerung von privatem Personenverkehr auf den öffentlichen Verkehr weiter zu fördern) und dem Einsatz von Elektrobusen. Die Investition in eine Umstellung auf Elektrobusse darf nicht dazu führen, dass die bestehenden ÖV-Angebote (oder Angebotsausbauten) kannibalisiert werden. Die investierten Mittel müssen folglich zusätzlich zur bestehenden Finanzierung des öffentlichen Verkehrs eingesetzt werden.

Mit dem skizzierten «realistischen» Szenario, welches dieser Nutzenoptimierungsüberlegung Rechnung trägt, liessen sich im Zeitraum 2023 und 2034 im RPV rund 50% der heutigen Dieselbusse oder ca. 1'900 Fahrzeuge durch Batteriebusse ersetzen. Im Ortsverkehr könnten im selben Zeitraum rund 70% oder 1'300 Fahrzeuge auf fossilfreie Elektrobusse umgestellt werden.

Die Mehrkosten gegenüber den Dieselbussen im «realistischen» Szenario bewegen sich im RPV kurzfristig in einer Grössenordnung bis 20 Mio. CHF pro Jahr und steigen bis ins Jahr 2030 auf rund 40–50 Mio. CHF pro Jahr weiter an, unter der Annahme, dass die Mineralölsteuerrück-erstattung für die Dieselbusse weiterhin stattfindet.

Die Mehrkosten im Ortsverkehr im «realistischen» Szenario bewegen sich kurzfristig zwischen 10 und 40 Mio. CHF pro Jahr und steigen bis 2030 gegen 100 Mio. CHF pro Jahr an, so-fern weiterhin die Mineralölsteuerrück-erstattung gilt.

Folgerungen zum Finanzierungsbedarf und Förderinstrumente

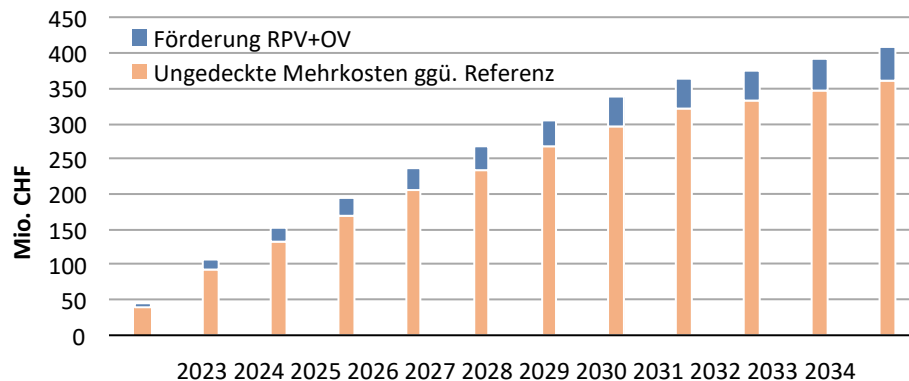
Werden die Mehrkosten der Batteriebusse gegenüber den Dieselbussen (Referenz) mit und ohne Mineralölsteuerrück-erstattung für KTU ausgewiesen, so zeigt sich eine grosse Differenz. Die Mineralölsteuerrück-erstattung für KTU ist eine indirekte Finanzhilfe für fossilbetriebene Fahrzeuge und stellt aus klimapolitischer Sicht einen finanziell bedeutsamen Fehlanreiz dar. Eine Aufhebung der Mineralölsteuerrück-erstattung würde bei gleichbleibenden ÖV-Tarifen und gleichbleibendem Angebot den finanziellen Bedarf aus Sicht der TU und der ÖV-Besteller (Bund, Kantone, Gemeinden) zunächst erhöhen, setzt aber Anreize für eine beschleunigte Durchdringung, da die Aufhebung der Mineralölsteuerrück-erstattung die Kostendifferenz eines Batteriebusse gegenüber einem Dieselbus deutlich reduzieren würde.

Soll die Marktdurchdringung von Batteriebussen entsprechend dem realistischen Szenario erfolgen, sind die finanziellen Mittel der KTU zu erhöhen, insbesondere dann, wenn die Mineralölsteuerrück-erstattung bestehen bleibt und dadurch die Referenztechnologie Dieselbus weiterhin begünstigt wird. Die KTU könnten zur Finanzierung der Mehrkosten die Tarife und damit die Einnahmen erhöhen. Tarifierhöhungen können jedoch unerwünschte modale Verlagerungen zur Folge haben. Klima- und verkehrspolitisch ist dies nicht erwünscht, war jedoch nicht Gegen- stand dieser Studie bzw. des Postulats.

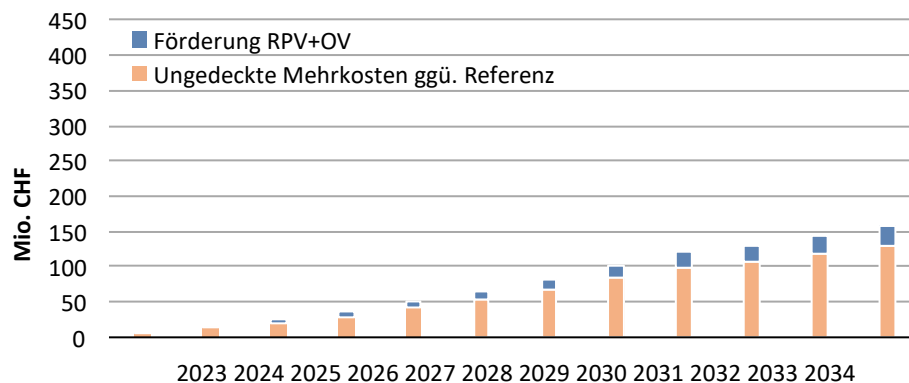
Die bestehenden nationalen Förderinstrumente (CO₂-Kompensationspflicht Treibstoffimporteure sowie Mittel aus dem Programm für den Agglomerationsverkehr PAV) können bisher einen verhältnismässig kleinen Teil des zusätzlichen Finanzierungsbedarfs decken (Abbildung Z-4). Hierbei sind Wechselwirkungen zwischen den Förderprogramm und der ordentlichen ÖV- Finanzierung durch Bund, Kantone und Gemeinden zu berücksichtigen. Das Instrument CO₂- Kompensationspflicht Treibstoffimporteure fördert die Umstellung auf Hybrid- und Elektrobusse, wenn diese nicht ohnehin vorgegeben ist (z.B. aufgrund gesetzlicher Vorgaben). Bundesbeiträge aus dem PAV werden beispielsweise nur an Massnahmen gezahlt, die nicht ohnehin vom Bund mitfinanziert werden (z.B. Ortsverkehr).

Abbildung Z-4: Entwicklung der durch Förderbeiträge gedeckten sowie ungedeckten Mehrkosten (myclimate/KliK + PAV) für RPV+OV (inkl. Mineralölsteuerrückstattung KTU)

Szenario «maximal»



Szenario «realistisch»



KTU: Konzessionierte Transportunternehmen, OV: Ortsverkehr, PAV: Programm Agglomerationsverkehr, RPV: Regionaler Personenverkehr

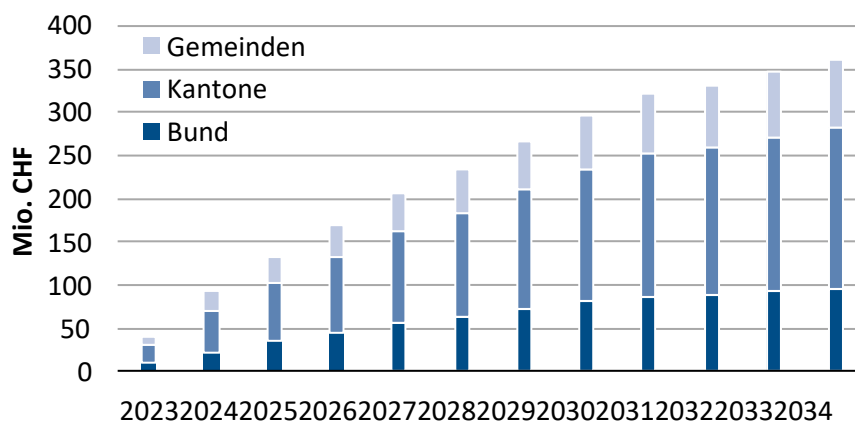
Grafik INFRAS. Quelle: eigene Schätzungen.

Würde die Finanzierung der ungedeckten Mehrkosten über die ordentliche ÖV-Finanzierung und Bestellung gemäss der heutigen Aufteilung (Bund, Kantone, Gemeinden) erfolgen, würden insbesondere die Kantone zusätzlich finanziell belastet, da sie sowohl den RPV als auch den Ortsverkehr mitfinanzieren (Abbildung Z-5). Im realistischen Szenario und unter Berücksichtigung der heutigen Mineralölsteuerrückstattung würde dies für den Zeitraum 2023–2034 kumulativ ein finanzieller Mehrbedarf von rund 125 Mio. Franken für den Bund, 395 Mio. Franken für die Kantone und rund 240 Mio. Franken für die Gemeinden bedeuten.

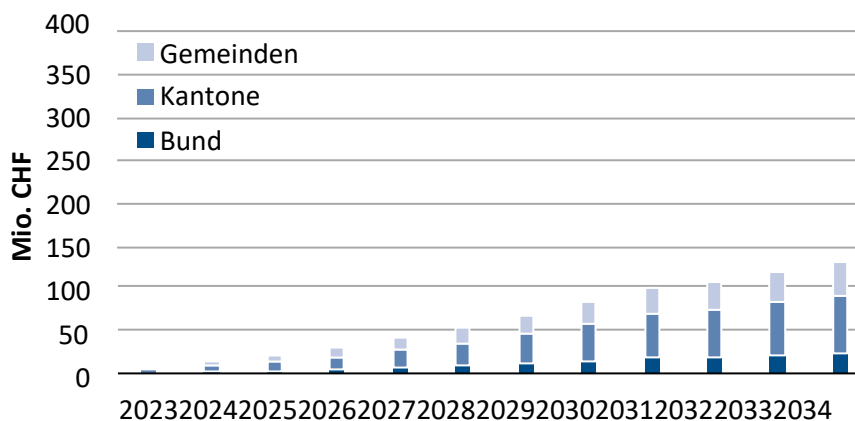
Der Wegfall der Mineralölsteuer würde zwar die Kostendifferenz von Dieselnbussen zu fossilfreien Bussen minimieren, für den ungedeckten Finanzierungsbedarf aus Sicht der ordentlichen ÖV-Finanzierung hat dies jedoch keinen direkten Einfluss. Die Mehrkosten für Dieselnbuse aufgrund des Wegfalls der Mineralölsteuerrückstellung würde ebenfalls zu einem Anstieg des ungedeckten Finanzierungsbedarfs führen. Die höheren Einnahmen aus der Mineralölsteuer (inkl. Zuschlag) des Bundes sind mehrheitlich zweckgebunden und würden nicht automatisch zu einer Erhöhung der Bundesmittel für den RPV führen. Kantone und Gemeinden erhielten keine zusätzlichen Einnahmen zur Deckung von Mehrkosten im ÖV. Aufgrund der aktuellen Situation (Einnahmehausfälle aufgrund Corona) stellt sich die Frage, ob die zusätzlichen finanziellen Mittel insbesondere ab 2024 zur Verfügung gestellt werden können, um die geschätzten Mehrkosten zu finanzieren.

Abbildung Z-5: Mögliche Aufteilung Finanzierungsbedarf gemäss der ordentlichen ÖV-Finanzierung (RPV+OV), inkl. Mineralölsteuerrückstellung

Szenario «maximal»



Szenario «realistisch»



OV: Ortsverkehr, RPV: Regionaler Personenverkehr

Grafik INFRAS. Quelle: eigene Schätzungen.

Zusätzliche Fördermöglichkeiten des Bundes können die Marktdurchdringung erhöhen. Dabei sollten sich die Förderbeiträge an den Investitionsmehrkosten als auch den Kosten pro reduzierter Tonne CO₂ orientieren. Ob und welche zusätzlichen Finanzierungsinstrumente aus Sicht des Bundes geeignet sind, ist letztendlich eine politische Entscheidung und entsprechend Teil des auf der Grundlagenstudie basierenden Postulatsberichts.

Résumé

Mandat, méthodologie

Les systèmes de propulsion sans énergie fossile permettent de rendre les transports publics par bus plus écologiques. Actuellement, les transports publics suisses comptent une flotte de quelque 5'500 bus, dont deux tiers desservent des lignes régionales et un tiers des lignes locales. Toutefois, les surcoûts, dont certains sont élevés aujourd'hui par rapport aux bus diesel, rendent plus difficile le passage à des systèmes de propulsion plus respectueux de l'environnement. Sous l'angle de la politique énergétique et climatique, l'encouragement de bus se passant de carburants fossiles dans les transports publics est à saluer ; en accélérant le remplacement des bus diesel, les transports publics donnent l'exemple. Toutefois, il est actuellement impossible de chiffrer de manière fiable tant les coûts que l'efficacité d'une telle transition. Il convient donc dans un premier temps de produire des données de base pertinentes qui permettent d'évaluer le potentiel d'économie d'émission de CO₂ des bus à propulsion à énergie non fossile ; ces chiffres servent de base au présent rapport relatif au postulat 19.3000 *Encourager le passage des véhicules de transport public aux énergies propres*.

La présente étude met en évidence les options en matière de systèmes de propulsion à énergie non fossile dans le domaine des transports publics (TP) par bus ; elle se fonde sur l'état actuel des connaissances techniques et présente leurs coûts ainsi que leurs apports pour l'environnement. Ces données permettent de calculer le surcoût actuel et futur de tels bus par rapport aux bus diesel. L'étude présente également les mécanismes de financement du surcoût des offres de TP commandées dans les conditions actuelles et en tenant compte d'instruments financiers potentiels. Les ressources financières requises pour une meilleure promotion des moteurs sans énergie fossile ont été calculées sur la base de ces données. Rappelons que les bus diesel sont aujourd'hui responsables de 2 pour cent du CO₂ émis par les transports en Suisse et constituent la principale source de CO₂ du secteur des transports publics. Les éventuels mécanismes de financement doivent par conséquent être simples et efficaces.

Quels types de moteurs sans énergie fossile pour les transports publics par bus ?

Une analyse d'impact placée sous la devise « sans énergie fossile » a comparé les performances des bus électriques et des bus à moteur à combustion alimentés par des biocarburants (diesel bio, biogaz) à celles des bus diesel conventionnels de type Euro 6. L'analyse des bus électriques portait sur des modèles à batterie avec différents modes de chargement et sur des bus équipés d'une pile à combustible.

Du point de vue écologique, les bus à batterie l'emportent largement, tant en termes d'émissions de gaz à effet de serre qu'en termes de consommation d'énergie primaire, de concentration de polluants atmosphériques au niveau local et d'émissions de bruit sur les trajets parcourus. En termes d'émissions, la concentration de polluants atmosphériques émise par le trafic local et régional est comparable ; toutefois, le nombre de personnes concernées par les polluants émis par les transports locaux est plus important.

Le bilan du bus équipé d'une pile à combustible alimentée à l'hydrogène est comparable à celui du bus à batterie pour ce qui est des émissions de gaz à effet de serre et de la concentration de polluants émis au niveau local ; il présente toutefois une consommation d'énergie primaire très élevée car la fabrication d'hydrogène est énergivore et, de plus, la transformation d'hydrogène en courant électrique à l'intérieur de la pile s'accompagne de pertes d'énergie massives.

En comparaison avec les bus diesel, la construction des bus à batterie nécessite davantage de matières premières critiques, notamment du lithium, du cobalt, du graphite ainsi que des terres rares ; les trois premiers entrent dans la composition des batteries alors que les terres rares sont utilisées dans les moteurs électriques. Les processus de recyclage actuels permettent de réutiliser la quasi-totalité de ces matières. La valeur de ces matières premières est telle qu'on peut admettre qu'un tel recyclage aura réellement lieu au terme de la durée de vie des piles utilisées dans les bus. Toutefois, l'augmentation du nombre des véhicules à batterie et plus particulièrement des voitures de tourisme risque de provoquer une augmentation telle de la demande de ces matières premières critiques, qu'on risque une pénurie. Ces matières premières étant toutes substituables dans les véhicules électriques, des options se développeront et permettront d'éviter le problème de pénurie.

La consommation d'énergie primaire des biocarburants est moins élevée que celle des bus électriques, car l'énergie des déchets qui sont à l'origine de ces biocarburants n'est pas prise en compte dans le présent écobilan en raison d'une décision méthodologique. Toutefois, le potentiel de réduction des gaz à effet de serre (biogaz) est inférieur à celui des bus électriques et leur taux d'émission de bruit et de polluants au niveau local n'est guère moins élevé que celui des bus diesel (biogaz et biodiesel).

² Bus rechargés au dépôt : équipés de batteries à forte capacité, à recharger de nuit au dépôt

Bus alimentés par biberonnage : équipés de petites batteries, rechargés à l'arrêt pendant quelques minutes, typiquement au terminus.

Trolleybus à batterie: partiellement entraînés par le courant des caténaires et qui chargent en même temps une batterie qui permet de se déplacer sans caténaire.

Au niveau des coûts, il convient de faire une distinction entre les évolutions à court terme et celles à moyen terme, ainsi que de prendre en compte les facteurs qui ont un impact sur le coût et qui dépendent en partie du cadre réglementaire (p. ex. remboursement de l'impôt sur les huiles minérales). Dans les conditions qui prévalent actuellement, les bus à batterie restent relativement coûteux et leur potentiel d'utilisation est limité (notamment pour les véhicules qui se chargent uniquement au dépôt et qui ont une autonomie insuffisante par charge). À moyen et à long terme, les bus à batterie pourraient bien devenir la variante la moins coûteuse en cas d'utilisation appropriée et de mise au point de batteries à durée de vie plus longue. La suppression du remboursement de l'impôt sur les huiles minérales, qui favorise aujourd'hui les bus diesel, permettrait, elle aussi, de favoriser les bus à batterie.

À court terme, ce sont les bus à biocarburants qui présentent la solution la plus avantageuse économiquement. Il faut toutefois se demander s'il est judicieux d'opter en faveur de cette solution durant la période de transition nécessaire aux bus à batterie pour déployer tout leur potentiel. Les biocarburants nécessitent l'installation de stations-service de biogaz et de biodiesel, l'adaptation des ateliers d'entretien ainsi qu'une reconversion du personnel pour cette technologie de transition. Leur disponibilité limitée, surtout en Suisse, représente un autre argument en défaveur des biocarburants. Le biodiesel suisse fabriqué à partir d'huiles de cuisson usagées ne suffit pas à alimenter toute la flotte des bus de TP en Suisse ; il représente une option pour des lignes isolées. Il faut donc aussi se demander si, au-delà de l'utilisation dans les TP, il serait judicieux de miser sur les biocarburants dans les domaines où les carburants alternatifs, qui permettraient de réduire les émissions de gaz à effet de serre, manquent encore, comme par exemple dans le cas des transports routiers de marchandises à longue distance, de la navigation maritime et des transports aériens. Cette question se pose aussi pour les bus hybrides plug-in à biocarburants.

Le bilan financier et écologique montre qu'à court et à moyen terme et dans des contextes d'exploitation appropriés, les bus électriques constituent la solution alternative sans énergie fossile à privilégier par rapport aux bus diesel d'un point de vue économique. À long terme, les développements escomptés des bus à batterie, tant en termes de technologie que de coûts, augmenteront considérablement le potentiel de déploiement approprié dans les transports locaux et régionaux, abaissant les coûts encore relativement élevés, à court terme, de lutte contre le CO₂ des bus électriques au-dessous de 200 francs par tonne de CO₂. La suppression du remboursement de l'impôt sur les huiles minérales permettrait pratiquement de ramener à zéro la différence de coûts entre les bus électriques et les bus Diesel, sous réserve de conditions d'exploitation idéales. Les coûts liés à la lutte contre les émissions de CO₂ restent élevés, à court terme du moins.

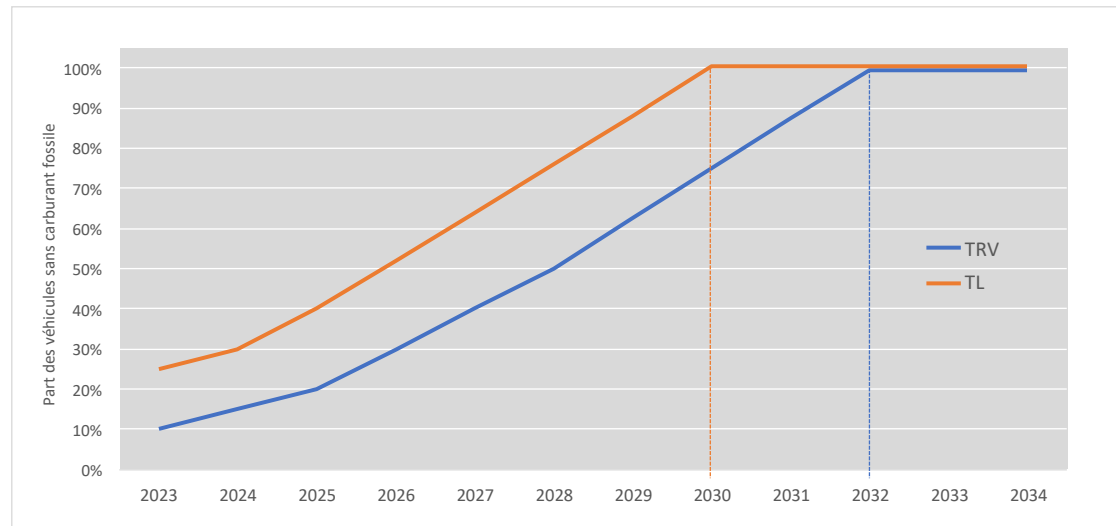
Il faut se rappeler à cet égard que les bus électriques, contrairement aux bus à biocarburants, contribuent à réduire les coûts externes tiers liés au bruit et aux polluants atmosphériques, dont le coût total est trois fois plus élevé que les coûts externes liés à la lutte contre le réchauffement climatique (INFRAS & Ecoplan 2019). Les surcoûts doivent donc tenir compte de tous les facteurs en jeu et non seulement de la réduction du CO₂.

Le choix du type de bus électrique dépend des conditions spécifiques de la ligne ou du réseau considéré : à batterie, à recharger au dépôt, à chargement par biberonnage statique ou encore équipé d'une pile à combustible si une autonomie journalière de 400 à 500 kilomètres est requise. La présente étude exclut les situations particulières.

Le potentiel des bus à batterie et les coûts supplémentaires

Techniquement, il est parfaitement envisageable de remplacer tout véhicule conventionnel par un bus sans consommation d'énergie fossile, une option que nous désignerons par l'appellation « scénario maximal ». Toutefois, les bus à batterie restent une option relativement coûteuse et à court terme, des contraintes économiques freinent donc l'achat de tels véhicules : d'une part, tant le véhicule lui-même que les batteries coûtent cher sur le marché ; d'autre part, la faible autonomie des bus rechargés au dépôt ou le temps d'attente trop court au terminus pour recharger les bus par biberonnage nécessitent l'acquisition d'un nombre plus grand de véhicules en comparaison avec des bus diesel.

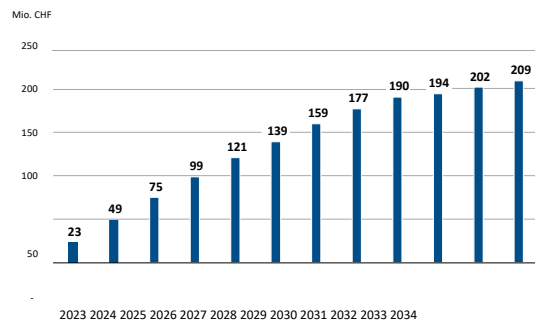
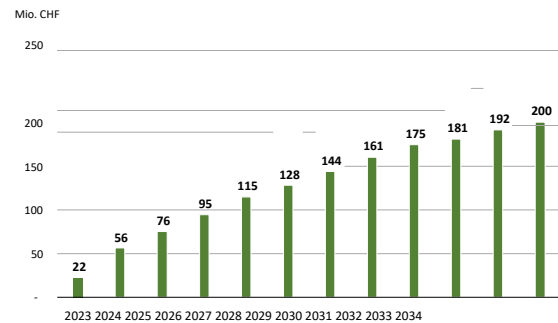
Le surcoût, le délai d'acquisition plus long des véhicules, la mise en place des infrastructures de charge et la formation du personnel : autant de facteurs qui, cumulés, rendent peu réaliste et judicieux le remplacement systématique des bus diesel par des bus à batterie durant les années à venir. En nous appuyant sur les stratégies des entreprises de transport (ET) en matière de bus électriques, nous avons donc élaboré un scénario « réaliste » de conversion aux bus à batterie, avec des variantes pour le trafic local et le trafic régional (TL, TRV) qui tiennent compte du fait que la conversion pourra se faire plus aisément dans le cas du TL que du TRV : généralement, en trafic local, les lignes sont plus courtes, la topographie est moins exigeante et souvent, des caténaires existent déjà pour les trolleybus. Le graphique ci-après présente les hypothèses jugées réalistes en termes de remplacement de bus existants par des bus à batterie. À court terme, nous nous basons sur un taux de remplacement de 25 à 50 pour cent dans le trafic local et de 10 et 30 pour cent en trafic régional. Ce scénario vise avant tout les grandes entreprises de transport, qui disposent déjà d'une stratégie d'acquisition de bus électriques et qui en font rouler dans des projets pilotes ; il vise également les entreprises plus petites, mais innovantes. Selon notre hypothèse, la totalité des bus de TL remplacés à partir de 2030 le sera par des bus à batterie ; ce sera également le cas des entreprises de TRV à partir de 2032 environ.

Fig. Z-1: La part de bus à batterie lors de l'acquisition de nouveaux véhicules (scénario « réaliste »)

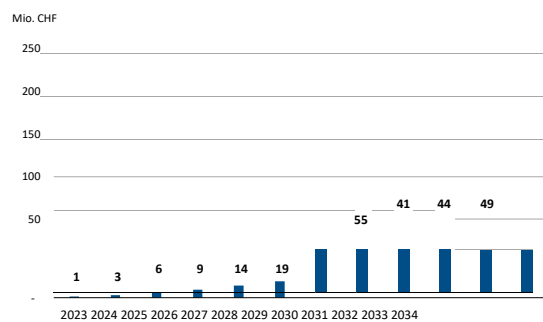
Exemple : en 2023, 10 pour cent des bus acquis pour le trafic régional seront à batterie et 90 pour cent des véhicules conventionnels à diesel ou hybride diesel-électrique. Cette proportion changera progressivement pour atteindre, en 2032, 100 pour cent de nouvelles acquisitions à batterie. En trafic local, 25 pour cent des bus remplacés seront à batterie et en 2030, ce sera le cas de la totalité des remplacements.

Graphique : INFRAS. Source : hypothèses INFRAS.

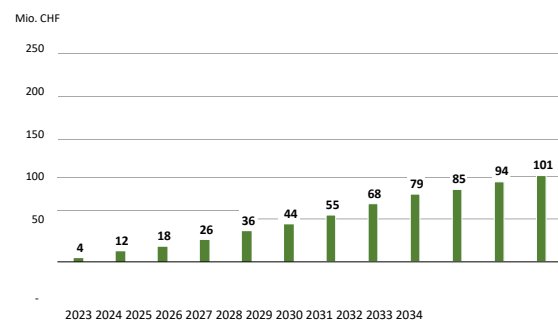
Selon le graphique ci-dessus, quelque 1'900 véhicules, c'est-à-dire la moitié de la flotte de TRV, sera remplacée tout comme quelque 1'300 véhicules ou 70 pour cent de la flotte de TL. Le graphique Z-2 ci-après illustre le coût supplémentaire encouru par les entreprises de transport de TRV et de TL dans le cas des scénarios « maximal » et « réaliste » compte tenu du cadre réglementaire en place, qui comprend le remboursement de l'impôt sur les huiles minérales. L'hypothèse se base sur un cycle de vie de douze ans pour les bus électriques (comme pour les bus diesel) et de six ans pour les batteries ; cette durée de six ans pour les batteries des bus alimentés par biberonnage, avec plusieurs cycles de chargement par jour, est réaliste. Dans le cas des bus rechargés au dépôt, équipés de grosses batteries chargées durant la nuit, cette hypothèse est prudente ; un cycle de vie de douze ans est parfaitement réaliste. Des cycles de vie plus longs des bus électriques et des batteries réduisent le surcoût par rapport aux bus diesel.

Figure Z-2 : surcoût annuel de la conversion aux bus à batterie (estimation sommaire)**Trafic régional (TRV)**
Scénario « maximal »**Trafic local (TL)**
Scénario « maximal »

Scénario « réaliste »



Scénario « réaliste »



Graphique : INFRAS.

Le potentiel de réduction des émissions de CO₂ des bus à batterie

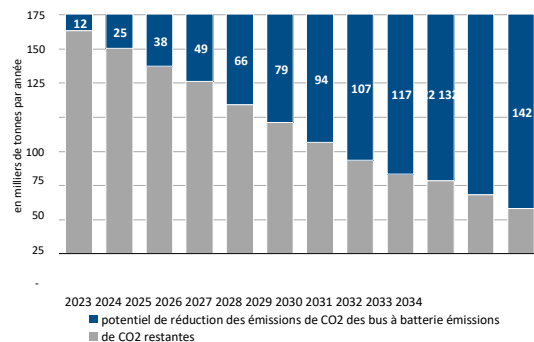
La figure Z-3 montre le potentiel de réduction des émissions de CO₂ en trafic local et régional. Dans le cas du scénario « maximal », ce potentiel est de 80 à 85 pour cent d'ici à 2034, après le remplacement de tous les bus diesel par des bus à batterie. Le scénario « réaliste » prévoit un potentiel de réduction de 40 à 45 pour cent d'ici à 2034, après remplacement de la moitié de la flotte diesel par des bus sans énergie fossile dans le trafic régional ; ce potentiel est de 60 pour cent dans le trafic local, après remplacement de 70 pour cent des bus diesel.

Figure Z-3: potentiel de réduction des émissions de CO₂ après remplacement des bus diesel par des bus à batterie

Trafic régional (TRV)

Émissions de CO₂ de tous les bus diesel en 2019 :
175'000 t/a

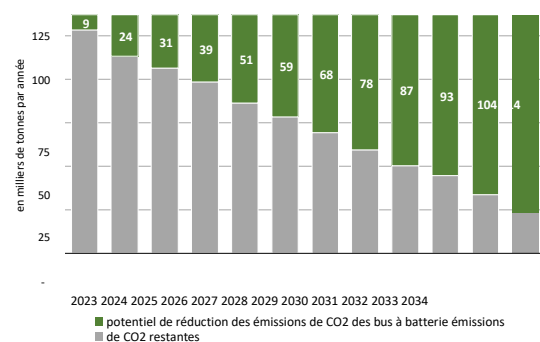
Scénario « maximal »



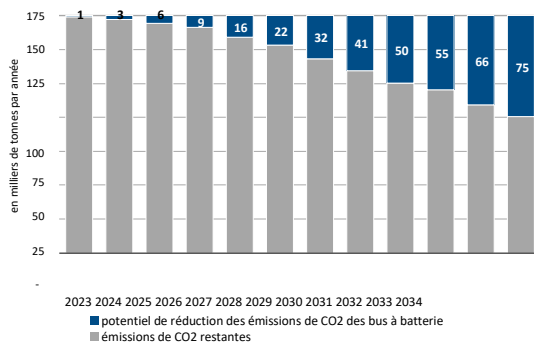
Trafic local (TL)

Émissions de CO₂ de tous les bus diesel en 2019 :
135'000 t/a

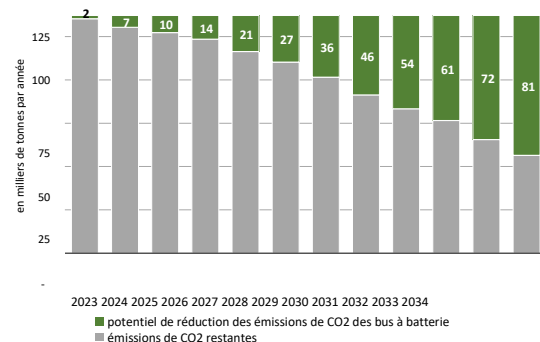
Scénario « maximal »



Scénario « réaliste »



Scénario « réaliste »



Graphique : INFRAS.

Cadre réglementaire, financement des TP, instruments de financement

Actuellement, le financement des transports locaux et régionaux est essentiellement assuré par les commanditaires, soit la Confédération, les cantons et les communes. Les instruments de financement complémentaires jouent un rôle mineur et se concentrent sur les véhicules électriques (cf. tableau no 21). Les bus à biocarburants ou à biogaz sont avant tout financés par le biais des commandes par les entreprises de TP. Les innovations proposées qui découlent de la recherche et développement et celles qui sont proposées dans le domaine des TP (OFT) et du programme P+D+L (OFEN) n'ont pas d'impact sur le marché. Le programme en faveur du trafic d'agglomération (ARE) finance avant tout les mesures qui touchent l'infrastructure et seulement à titre exceptionnel l'acquisition de véhicules.

L'instrument de la compensation des émissions de CO₂ par les importateurs de carburants et son projet « Bus électriques et hybrides » est le seul instrument/programme complémentaire au niveau national qui finance le surcoût produit par l'utilisation de véhicules sans énergie fossile ou peu gourmands en énergie fossile, pour autant qu'il s'agisse d'une mesure complémentaire ; les ET ne peuvent pas porter à leur crédit la compensation des émissions de CO₂.

Les organes responsables des instruments de financement et des mesures d'encouragement ainsi que le volume des aides et le domaine de validité varient, tout comme la gestion des processus. Le financement ordinaire des TP et le programme en faveur du trafic d'agglomération obéissent à des cycles réguliers, de deux à quatre ans. Le financement ordinaire des TP implique les trois niveaux de l'État, les cantons jouant un rôle central. Les mesures supplémentaires de soutien au niveau cantonal et communal sont rares. La situation est donc complexe.

Tableau Z-1 : instruments de financement ou de promotion de véhicules et de systèmes de propulsion

	Bus élec- trique chargé au dépôt	Bus élec- trique chargé par biberon- nage	Trolleybus à batterie	Bus à pile à combus- tion	Bus à bio- diesel	Bus à biogaz
Financement ordinaire des TP						
R&D et innovations TP financés par le crédit TRV (dès 2022)*						
Programme P+D+L*						
Programme trafic d'agglomération**						
Compensation des émissions de CO ₂ par les importateurs de car- burants ; projet de compensa- tion <i>myclimate</i> « Bus électriques et hybrides »						
Encouragement véhicules et in- frastructure de charge par les communes (p. ex. encourage- ment véhicules + infrastructure de charge, tels que le fonds d'économies d'électricité [Stromsparfonds] de la Ville de Zurich)						

* Aucun type de propulsion n'est exclu, mais les possibilités de soutien sont en baisse (caractère non innovateur des nouveaux investissements)

** Possibilité de cofinancement de caténaires, de stations de charge et de surcoûts occasionnés lors de l'achat de véhicules (avant tout véhicules électriques rechargés au dépôt et par biberonnage), pour autant que ces surcoûts entraînent une baisse des frais d'infrastructures (caténaires de trolleybus) (art. 17a, al.2^{bis} LUMin).

Tableau : INFRAS.

Les TP étant commandés et financés par les collectivités publiques, il faut se demander si des mesures de soutien supplémentaires sont nécessaires ou si l'adoption systématique des véhicules sans carburants fossiles ne pourrait pas être encouragée dans le cadre du processus de commande ainsi que dans le cadre des objectifs stratégiques des entreprises, généralement publiques. Un rôle essentiel revient, dans ce contexte, aux cantons qui coordonnent la commande de prestations de TRV et qui les cofinancent fréquemment via le TL. Les stratégies et concepts cantonaux pour un système de TP sans fossiles et efficace sur le plan énergétique peuvent favoriser la pénétration. Mais dans le même temps, la Confédération, les cantons et les communes doivent fournir les moyens financiers nécessaires.

Aujourd'hui, un tiers des cantons dispose d'une stratégie en faveur de TP sans carburants fossiles et aux performances énergétiques élevées ; deux cantons supplémentaires préparent une telle stratégie. La quasi-totalité des cantons a la possibilité de cofinancer le surcoût des bus sans énergie fossile et aux performances énergétiques élevées dans le cadre du financement ordinaire des TP ; certains d'entre eux le font déjà. Il n'est pas possible d'anticiper si les ressources financières requises figureront dans les budgets futurs, un aspect qui n'est pas traité dans la présente étude. On peut admettre que la situation financière des différents cantons et communes est très hétérogène.

La procédure actuelle de commande des TRV et le système de mesure de la qualité de TRV (comme base de conventions d'objectifs) ne comprend aucun objectif environnemental ; elle ne connaît aucune prescription en matière d'acquisitions comparable à la réglementation européenne (Clean Vehicle Directive). Seule innovation en vue : désormais, l'acquisition de bus à système de propulsion à énergies non fossiles pour les TRV est soumise à approbation préalable. Certains cantons connaissent des directives en matière d'acquisition (p. ex. la loi sur les TP de Bâle-Ville). De manière générale, le principe de l'additionnalité des mesures d'encouragement et du financement des TP doit être respecté. Si le mandat émet des critères écologiques pour les bus à acquérir, il n'est plus possible de prouver l'additionnalité dans le cadre de projets de compensation, tels que le programme « Bus hybrides et électriques » de l'instrument de la compensation des émissions de CO₂ par les importateurs de carburants ; par conséquent, cet instrument d'encouragement qui intervient au niveau national pourrait perdre de son importance.

Le remboursement de l'impôt sur les huiles minérales dont bénéficient les entreprises de transport concessionnaires suisses constitue une aide financière indirecte et une incitation inopportune qui freine la conversion aux énergies non fossiles ; actuellement, ces entreprises se voient en moyenne restituer quelque 70 millions de francs chaque année.

Conclusions à propos du potentiel des bus à batterie et de leur surcoût

Techniquement possible à court terme, la conversion de la flotte des bus diesel en flotte de bus à batterie n'est toutefois pas judicieuse compte tenu de l'état d'avancement technique, ni dans le trafic local, ni dans le trafic régional. Les bus à batterie restent relativement coûteux et les modèles à recharger au dépôt ont une autonomie relativement faible qui nécessite une multiplication des véhicules et par conséquent des dépenses. En partant de l'hypothèse que les ressources financières que la Confédération, les cantons et les communes affectent aux transports publics sont limitées, il s'agit, à court et à moyen terme, de parvenir à une optimisation écologique, entre développement de l'offre (encouragement du transfert de la mobilité individuelle vers les transports publics) et recours aux bus électriques. Les investissements liés à la conversion aux bus électriques ne doivent en aucun cas conduire à une cannibalisation des offres actuelles ou prévues de TP. Ces investissements doivent se faire en plus des ressources financières allouées aux transports publics.

Le scénario « réaliste » esquissé ci-dessus, basé sur l'utilisation optimale des ressources, prévoit le remplacement de la moitié des bus diesel actuels (env. 1'900 véhicules) qui assureront les TRV entre 2023 et 2034. Durant la même période, quelque 70 pour cent des véhicules qui assurent les TL, soit 1'300 véhicules, pourront être remplacés par des bus électriques.

Dans le scénario « réaliste », le surcoût par rapport aux bus diesel s'élève à 20 millions de francs par année à court terme pour culminer à quelque 40 millions d'ici à 2030, pour autant que le remboursement de l'impôt sur les huiles minérales soit maintenu pour les bus diesel.

Dans ce même scénario réaliste, ce surcoût est de 10 à 40 millions de francs par année pour les transports locaux et pourra atteindre jusqu'à près de 100 millions de francs vers 2030, toujours en partant de l'hypothèse d'un remboursement de l'impôt sur les huiles minérales.

Conclusions à propos des ressources financières requises et des instruments d'encouragement

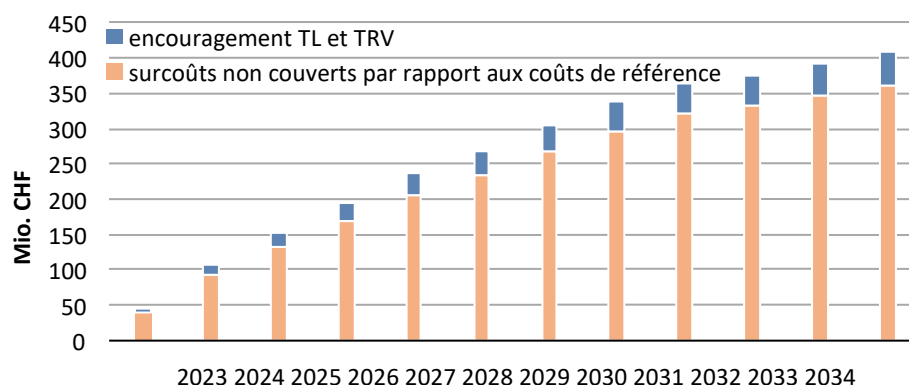
On constate que l'acquisition de bus à batterie représente pour les entreprises un surcoût considérable par rapport aux bus diesel (référence), que l'impôt sur les huiles minérales soit remboursé ou non. Le remboursement de cet impôt représente une aide financière indirecte pour les entreprises, qui sont ainsi incitées à privilégier les véhicules à carburant fossile ; du point de vue de la protection du climat, cette disposition est contre-productive. Si l'impôt sur les huiles minérales n'était plus remboursé, à tarifs et offre TP inchangés, les ET et les commanditaires de l'offre de TP (Confédération, cantons, communes) auraient besoin de ressources financières supplémentaires à court terme ; en revanche, cette mesure inciterait à une conversion rapide aux véhicules sans carburants fossiles, car la suppression du remboursement de l'impôt sur les huiles minérales réduirait clairement le surcoût des bus à batterie par rapport aux bus diesel.

Si la progression des bus à batterie sur le marché devait intervenir selon le scénario « réaliste », il faudrait augmenter les moyens financiers des entreprises de transports concessionnaires, en particulier si le remboursement de l'impôt sur les huiles minérales subsistait et continuerait de privilégier le bus diesel comme technologie de référence. Pour financer le surcoût, les entreprises pourraient augmenter leurs recettes au moyen d'une hausse des tarifs. Toutefois, une telle hausse risque de provoquer un transfert modal nocif pour le climat et la politique des transports ; cet aspect ne figurait toutefois pas à l'agenda de la présente étude ou du postulat qui est à son origine.

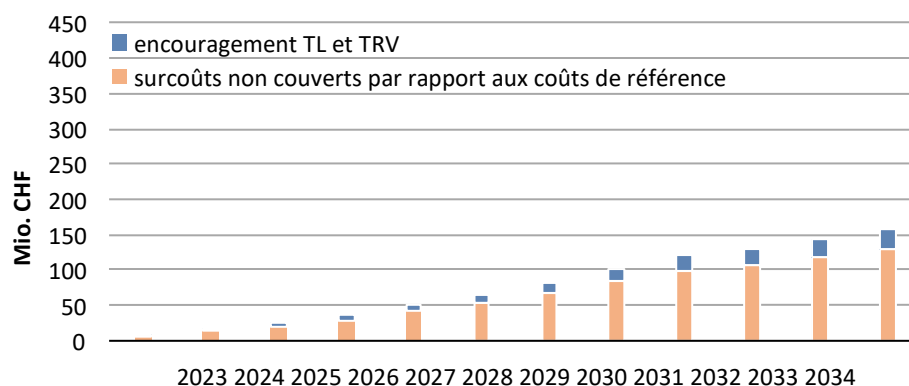
Les instruments d'encouragement nationaux (obligation de compenser les émissions de CO₂ par les importateurs de carburants, ressources du programme en faveur du trafic d'agglomération) ne couvrent qu'une partie relativement faible des ressources supplémentaires qui sont requises (fig. Z-4). Il convient de prendre en compte les interactions entre programmes d'encouragement et financement ordinaire des TP par les collectivités publiques. L'instrument de compensation des émissions de CO₂ par les importateurs de carburants favorise la conversion aux bus hybrides et électriques si elle n'est pas déjà prévue (p. ex. dans les dispositions légales). Le fonds en faveur du trafic d'agglomération de la Confédération est, par exemple, réservé aux mesures qui ne sont pas cofinancées d'office par la Confédération (p. ex. transports locaux).

Figure Z-4 : évolution des surcoûts couverts ou non par les instruments de soutien (myclimate/KliK + programme en faveur du trafic d'agglomération) dans le domaine des transports locaux et régionaux (y c. remboursement de l'impôt sur les huiles minérales aux entreprises de transports concessionnaires)

Scénario « maximal »



Scénario « réaliste »



TL: trafic local, TRV: trafic régional de voyageurs

Graphique : INFRAS. Source : estimations INFRAS.

Si le financement des surcoûts non couverts était assuré par les modalités de financement ordinaires des TP et des commandes, selon la clé de répartition actuelle entre Confédération, cantons et communes, les cantons se retrouveraient face à une charge financière supplémentaire élevée, car ils participent déjà au financement du trafic local et du trafic régional (fig. Z-5).

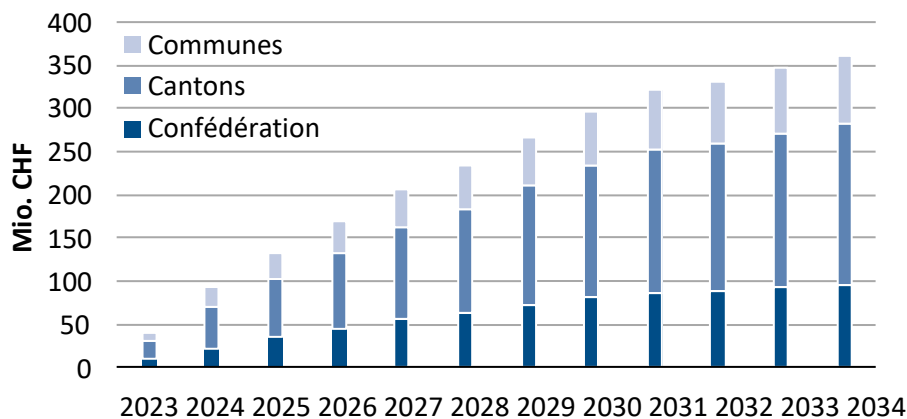
Dans le scénario « réaliste », qui inclut le remboursement de l'impôt sur les huiles minérales, le surcoût total cumulé entre 2023 et 2034 s'élèverait à 125 millions de francs pour la Confédération, à 395 millions de francs pour les cantons et à 240 millions de francs pour les communes.

Si cet impôt n'était plus remboursé, la différence de coût entre les bus diesel et les bus sans carburant fossile serait moins grande.

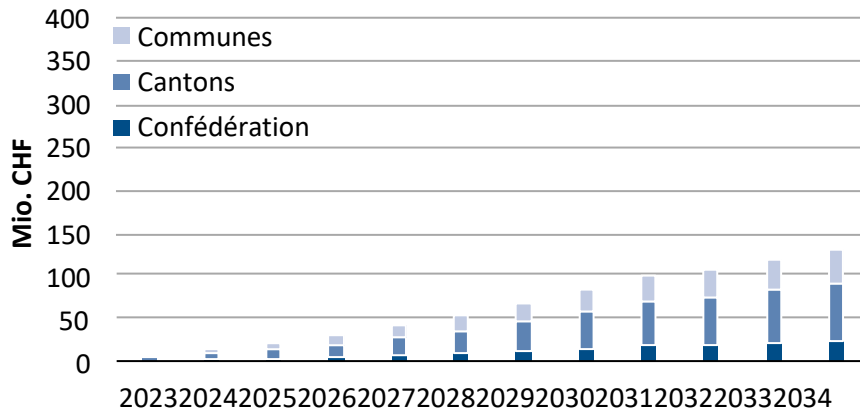
Cette mesure est pourtant sans effet direct sur les besoins nécessaires au financement des bus électriques. Le surcoût de l'exploitation des bus diesel, du fait de la suppression du remboursement de l'impôt sur les huiles minérales, provoquerait lui aussi une hausse des besoins financiers non couverts. L'affectation des revenus supplémentaires issus de l'impôt sur les huiles minérales (supplément compris) est obligatoire et ne permettrait donc pas d'accroître les ressources de la Confédération destinées aux transports publics régionaux. Les cantons et les communes ne recevraient pas de recettes supplémentaires pour couvrir le surcoût des TP. Compte tenu de la situation actuelle (perte de recettes dues au coronavirus), on peut se demander si les moyens supplémentaires pour financer les surcoûts prévus seront effectivement disponibles à partir de 2024.

Figure Z-5 : option de ventilation des besoins financiers selon les modalités ordinaires de financement des TP (TL et TRV), y c. remboursement de l'impôt sur les huiles minérales.

Scénario « maximal »



Scénario « réaliste »



TL: trafic local, TRV: trafic régional de voyageurs

Graphique : INFRAS. Source : estimations INFRAS.

Des instruments d'encouragement supplémentaires de la Confédération sont en mesure de faciliter la généralisation des bus à batterie sur le marché. Le calcul des aides devrait tenir compte à la fois des investissements requis et du coût de la réduction d'émissions de CO₂ (en tonnes). La pertinence d'instruments supplémentaires de financement créés par la Confédération et la nature de ces instruments relèvent de décisions politiques et découlent du rapport relatif au postulat basé sur la présente étude de base.

Compendio

Mandato e procedimento

Le tecnologie di propulsione non fossile potrebbero rendere più ecologici i trasporti pubblici (TP) su strada in Svizzera. Oggi nei TP vengono impiegati circa 5 500 bus a diesel, di cui due terzi nel traffico regionale viaggiatori (TRV) e un terzo nel traffico locale (TL). Tuttavia il passaggio a veicoli a propulsione più ecologica è penalizzato dai costi supplementari, tuttora in parte elevati, rispetto ai bus a diesel. Sotto il profilo energetico e climatico la promozione dei bus a propulsione non fossile nei TP va accolta con favore; la sostituzione dei bus a diesel risulterebbe così notevolmente più rapida e i TP costituirebbero un esempio da seguire. Attualmente non è però possibile quantificare in modo affidabile né i costi né i benefici di un'eventuale promozione. Ai fini della stesura del rapporto sul postulato 19.3000 «Promuovere l'affermazione dei vettori di trasporto non fossili nei trasporti pubblici su strada» vanno pertanto create basi attendibili sull'impiego e sul potenziale di riduzione di CO₂ dei bus con propulsioni alternative.

Il presente studio di riferimento mette in evidenza, tenendo conto del progresso tecnologico, le opzioni di propulsione non fossile adatte ai trasporti pubblici su strada, nonché i costi e i benefici ambientali che ne derivano. In tale contesto vengono determinati i costi supplementari attuali e futuri rispetto ai bus a diesel. Lo studio illustra inoltre in quale misura tali costi supplementari potrebbero essere finanziati nell'ambito delle attuali condizioni quadro e con le odierne possibilità di promozione dei TP oggetto di ordinazione, definendo altresì il fabbisogno di finanziamento necessario per rafforzare la promozione delle tecnologie di propulsione non fossili. A tale riguardo va considerato che oggi i bus a diesel sono responsabili del 2 per cento circa delle emissioni di CO₂ del traffico in Svizzera; pertanto, eventuali meccanismi di promozione devono essere semplici ed efficienti.

Quali sono le opzioni di propulsione non fossile per i trasporti pubblici su strada?

Nel quadro di un'analisi degli effetti sono stati esaminati, in quanto veicoli a propulsione non fossile, i bus elettrici e i bus con motori a combustione azionati da carburanti biologici (biodiesel e biogas); questi veicoli sono stati poi confrontati con il bus convenzionale a diesel Euro 6. Tra i bus elettrici si sono considerati i bus a batteria con diversi sistemi di ricarica³ e i bus a celle combustibili.

³ Bus con ricarica in deposito: bus dotati di grosse batterie, che si ricaricano durante la notte per diverse ore nel deposito veicoli. Bus con ricarica occasionale statica: bus dotati di piccole batterie, che si ricaricano per vari minuti durante le soste, solitamente ai capolinea.

Bus con ricarica occasionale dinamica, detti anche filobus a batteria: bus che possono in parte circolare collegati alla rete della linea di contatto e ricaricare durante questi tratti una batteria, che consente loro di circolare anche senza collegamento alla linea di contatto.

Sul piano ecologico i bus a batteria presentano netti vantaggi sia considerando le emissioni di gas a effetto serra e il fabbisogno di energia primaria sia, localmente, sul piano degli inquinanti atmosferici e del rumore nei quartieri. Considerando le emissioni, gli effetti positivi per i carichi ambientali si mantengono su valori simili sia a livello locale che regionale, mentre sul piano dell'incidenza gli effetti sono maggiori nel TL rispetto al TRV.

Riguardo alle emissioni di gas a effetto serra e di inquinanti atmosferici, i bus a celle combustibili con propulsione a idrogeno ottengono risultati simili a quelli dei bus a batteria. Presentano però un fabbisogno di energia primaria molto elevato, sia per la notevole energia richiesta per la produzione di idrogeno, sia per la grande perdita di energia dovuta alla trasformazione dell'idrogeno in corrente nella cella combustibile.

I bus a batteria implicano più materiali potenzialmente critici rispetto ai bus a diesel; i più rilevanti sono litio, cobalto, grafite e terre rare. I primi tre sono presenti soprattutto nelle batterie e le terre rare per lo più nei motori elettrici. Grazie ai procedimenti di riciclaggio odierni questi materiali possono essere recuperati quasi totalmente. Considerato il valore del materiale contenuto, le batterie dei bus verrebbero presumibilmente riciclate al termine del ciclo di vita. Ciononostante, l'aumento dei veicoli a batteria (soprattutto tra le automobili) può provocare un tale incremento della domanda di questi materiali critici, da causare a lungo termine delle carenze. Ad esse si potrà però ovviare visto che nei veicoli elettrici tutti questi materiali sono sostituibili.

I bus a biocarburanti presentano un fabbisogno di energia primaria minore dei bus elettrici poiché, per definizione metodica, non viene calcolato il tenore energetico dei rifiuti dai quali i biocarburanti sono ricavati. Il loro potenziale di riduzione dei gas a effetto serra (bus a biogas) è però minore di quello dei bus elettrici e non apporta, rispetto ai bus a diesel, miglioramenti rilevanti sul fronte delle locali emissioni di inquinanti atmosferici e di rumore (bus a biogas e biodiesel).

Sul piano dei costi occorre distinguere tra la situazione a breve termine e gli sviluppi prevedibili. Altrettanto rilevanti sono le condizioni quadro dei prezzi, che dipendono in parte anche da decisioni di tipo legislativo (p. es. rimborso dell'imposta sugli oli minerali). A breve termine e alle attuali condizioni quadro, i bus a batteria risultano tuttora relativamente cari; inoltre, il loro potenziale di adeguato impiego è limitato (soprattutto per i bus con ricarica in deposito che dispongono di un'autonomia ancora insufficiente dopo la ricarica). Tuttavia, a lungo termine i bus a batteria offrono potenzialmente, a seconda delle condizioni d'impiego e della presumibile durata di vita della batteria, le opzioni più convenienti. Anche l'abolizione del rimborso dell'imposta sugli oli minerali, che attualmente favorisce i bus a diesel, avrebbe ripercussioni positive sui bus a batteria.

A breve termine i bus a biocarburanti costituiscono tendenzialmente le opzioni più convenienti. Occorre chiedersi però se nel frattempo, in attesa che i vantaggi dei bus a batteria dispieghino i loro effetti, sia opportuno ricorrere a tali opzioni; sarebbe infatti necessario predisporre pompe di rifornimento di biodiesel e biogas, adeguare le officine e organizzare corsi di aggiornamento per il personale. Un argomento contrario all'uso dei biocarburanti è anche la loro limitata disponibilità, soprattutto di quelli prodotti in Svizzera. I biodiesel svizzeri, ad esempio, ricavato da olio alimentare usato (Used Cooking-Oil), non sarebbe sufficiente per tutti i bus dei TP svizzeri e potrebbe essere preso in considerazione solamente per singole linee. In tale contesto si pone quindi la domanda se, in un'ottica più ampia, l'impiego di biocarburanti sia da considerare piuttosto in ambiti in cui ad oggi mancano alternative di riduzione delle emissioni dei gas a effetto serra, ad esempio nel trasporto di merci su strada a lunga distanza, nella navigazione d'alto mare o nel traffico aereo. Considerazioni analoghe valgono anche per i bus ibridi plug-in a biocarburanti.

Considerando globalmente i costi e i benefici per l'ambiente, occorre pertanto puntare sull'impiego di bus elettrici come alternativa non fossile ai bus a diesel, e ciò già a breve/medio termine, ma solo per impieghi adeguati sul piano dei costi. A lungo termine, a seguito dei prevedibili sviluppi dei bus a batteria sia in ambito tecnico sia riguardo ai costi, il loro potenziale di adeguato impiego aumenterà notevolmente sia nel TL che nel TRV. Diminuiranno così nettamente anche i costi di riduzione del CO₂ – a breve termine relativamente alti – dei bus elettrici, scendendo al di sotto dei 200 franchi per tonnellata di CO₂. Se il rimborso dell'imposta sugli oli minerali venisse abolito, in condizioni d'impiego ideali tali costi risulterebbero addirittura quasi azzerati. Riguardo ai costi di riduzione del CO₂, a breve termine ancora alti, va considerato che, al contrario dei bus a biocarburanti, i bus elettrici contribuiscono a evitare ulteriori costi esterni dovuti a rumore e inquinanti atmosferici, i quali, cumulati, risultano tre volte maggiori dei costi dei cambiamenti climatici causati dal traffico (INFRAS & Ecoplan 2019). I costi supplementari non devono essere quindi considerati solo relativamente alla riduzione del CO₂.

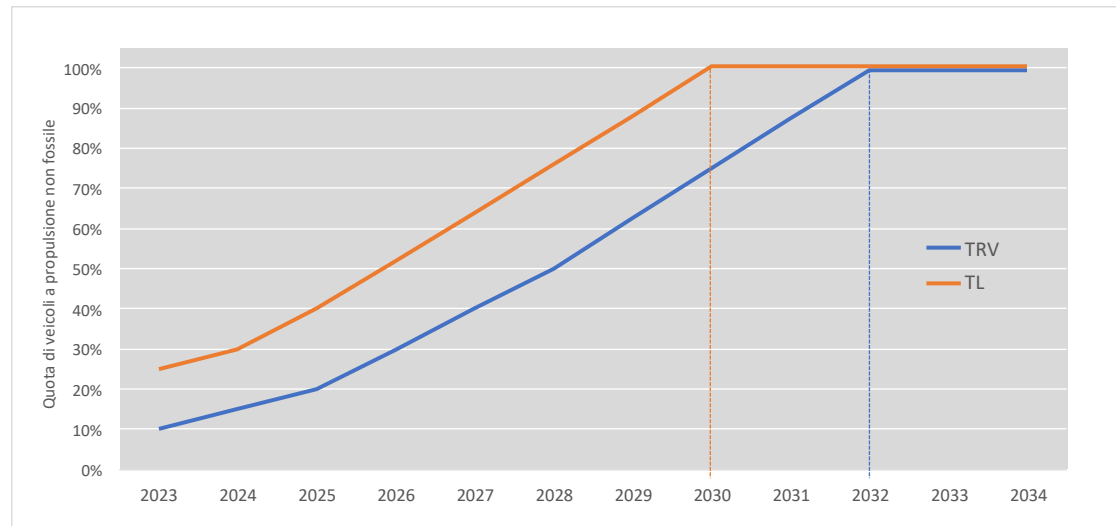
La decisione sui tipi di bus elettrici da considerare – filobus a batteria, bus con ricarica in deposito, bus con ricarica occasionale statica o anche bus a celle combustibili, ad esempio per la copertura di distanze giornaliere superiori a 400-500 km – dipende dalle condizioni specifiche di una determinata linea o rete di linee e quindi non può né deve essere oggetto del presente studio.

Potenziale per i bus a batteria e costi supplementari

Se si rendono necessarie sostituzioni, sul piano puramente tecnico sarebbe possibile sostituire tutti i veicoli con bus a propulsione non fossile (scenario indicato di seguito come «massimo»).

I bus a batteria sono però tuttora relativamente cari e a breve termine vengono pertanto ancora ritenuti economicamente inadeguati per molti campi d'impiego. Sul mercato i veicoli e le batterie sono infatti ancora relativamente cari; inoltre, a causa dell'autonomia ancora troppo limitata (per i bus con ricarica in deposito) o di pause ai capolinea insufficienti per la ricarica (bus con ricarica occasionale statica), occorrerebbe disporre di un maggior numero di veicoli rispetto all'esercizio con bus a diesel.

Soprattutto per motivi legati ai costi, ma anche per i tempi richiesti dall'acquisto dei veicoli, dalla realizzazione dell'infrastruttura di ricarica e dalla formazione del personale, a breve e medio termine non è opportuno o realistico sostituire tutti i bus a diesel con bus a batteria al momento di acquistare nuovi veicoli. Secondo le attuali strategie per i bus elettrici elaborate da imprese di trasporto, è pertanto stato definito uno scenario «realistico» per il passaggio dai bus a diesel ai bus a batteria. Tale scenario è stato differenziato a seconda del TL e del TRV, in quanto il cambiamento avrà presumibilmente luogo più in fretta a livello locale, dove si trovano i presupposti migliori, quali linee più brevi, topografie di regola meno impegnative e infrastrutture preesistenti per la linea di contatto. Il grafico seguente indica, per il cosiddetto scenario «realistico», su quali ipotesi si fondano le quote di veicoli sostituite con bus a batteria in caso di nuovi acquisti. Nel TL ipotizziamo già a breve termine quote comprese tra il 25 e il 50 per cento, nel TRV tra il 10 il 30 per cento. Secondo questo scenario saranno coinvolte soprattutto imprese di trasporto piuttosto grandi, che stanno già svolgendo test pilota con bus a batteria e che hanno formulato strategie per i bus elettrici, ma anche piccole imprese innovative. Sempre secondo lo scenario realistico, nel TL tutte le sostituzioni saranno quindi effettuate con bus a batteria a partire circa dal 2030, e nel TRV circa dal 2032.

Figura Z-1: quota di bus a batteria sui veicoli da acquistare – scenario «realistico»

Esempio: nel 2023 il 10 per cento dei bus da acquistare è sostituito nel TRV da bus a batteria, il 90 per cento da bus convenzionali a diesel o ibridi a diesel. La quota dei bus a batteria aumenta di anno in anno. Dal 2032 tutti i bus da acquistare sono sostituiti da bus a batteria. Nel 2023, nel TL è sostituito da bus a batteria già il 25 per cento dei bus da acquistare. La data alla quale tutti i veicoli vengono sostituiti da bus a batteria è già il 2030.

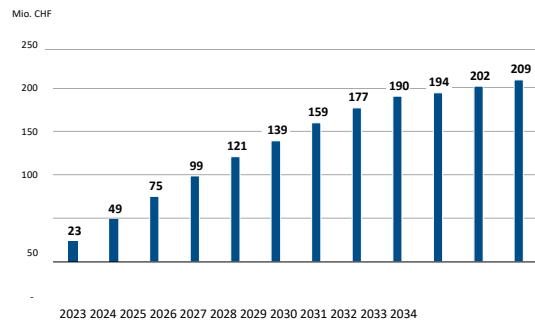
Fonte: Ipotesi INFRAS.

Tra il 2023 e il 2034 nel TRV andrebbero quindi sostituiti circa 1 900 veicoli, ossia circa il 50 per cento, e nel TL quasi 1 300 veicoli, ovvero circa il 70 per cento dell'intero parco veicoli. La figura seguente Z-2 indica i costi supplementari per le imprese di trasporto nel TRV e nel TL relativi a entrambi gli scenari alle attuali condizioni quadro, con rimborso dell'imposta sugli oli minerali. Per quanto concerne i bus elettrici, si stima una durata di vita di 12 anni per i veicoli (come per i bus a diesel), di 6 anni per le batterie. Nel caso dei bus con ricarica occasionale e vari cicli di ricarica al giorno, la durata di vita di 6 anni stimata per la batteria è realistica. Per i bus con ricarica in deposito, dotati di una grossa batteria e sottoposti di regola a un solo ciclo di ricarica al giorno, tale stima è molto prudente; per questi bus è senz'altro realistica una durata di vita della batteria di circa 12 anni. Una maggiore durata di vita di veicoli elettrici e batterie riduce in linea di massima i costi supplementari rispetto ai bus a diesel.

Figura Z-2: costi supplementari annui in caso di passaggio dai bus a diesel ai bus a batteria (stima approssimativa)

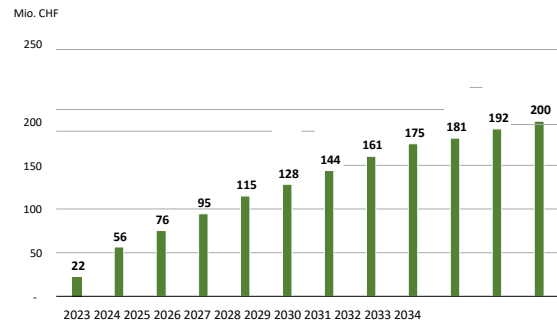
Traffico regionale (TRV)

Scenario «massimo»

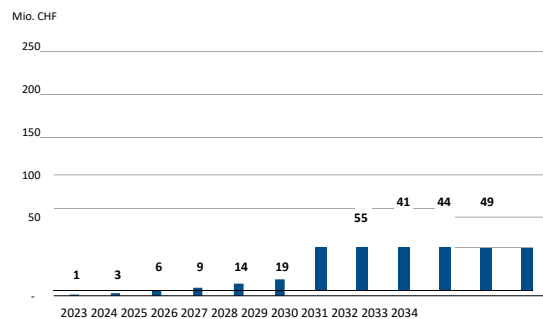


Traffico locale (TL)

Scenario «massimo»



Scenario «realistico»



Scenario «realistico»

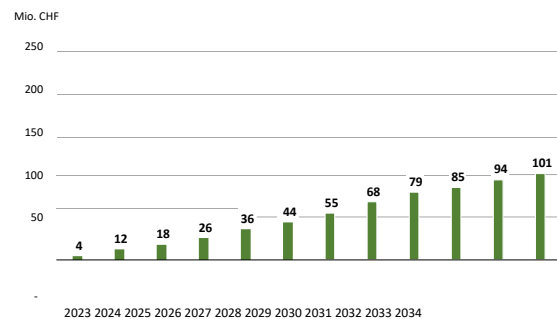


Grafico INFRAS.

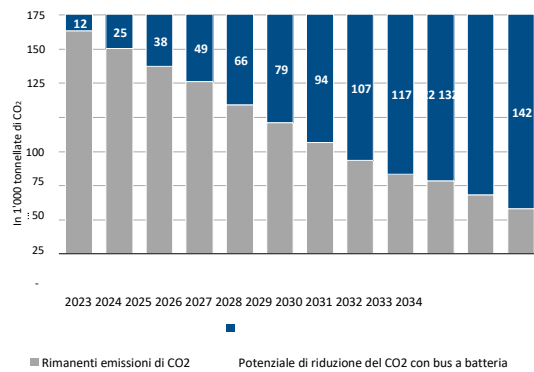
Potenziale di riduzione del CO₂ con i bus a batteria

La figura Z-3 illustra il potenziale di riduzione del CO₂ nel TRV e nel TL per entrambi gli scenari. Lo scenario «massimo» prevede che nel 2034, quando tutti i bus a diesel saranno stati sostituiti da bus a batteria, il potenziale raggiunto sarà pari all'80–85 per cento. Nello scenario «realistico», il potenziale di riduzione per il TRV nel 2034, quando la metà dei bus a diesel sarà stata sostituita da bus a propulsione non fossile, ammonterà al 40–45 per cento. Nel TL circa il 70 per cento dei bus a diesel sarà stato sostituito nel 2034 con bus a batteria; il relativo potenziale di riduzione del CO₂ sarà del 60 per cento circa.

Figura Z-3: potenziale di riduzione del CO₂ in caso di passaggio dai bus a diesel ai bus a batteria**Traffico regionale**

Emissioni di CO₂ di tutti i bus a diesel nel 2019:
175 000 t/a

Scenario «massimo»

**Traffico locale**

Emissioni di CO₂ di tutti i bus a diesel nel 2019:
135 000 t/a

Scenario «massimo»

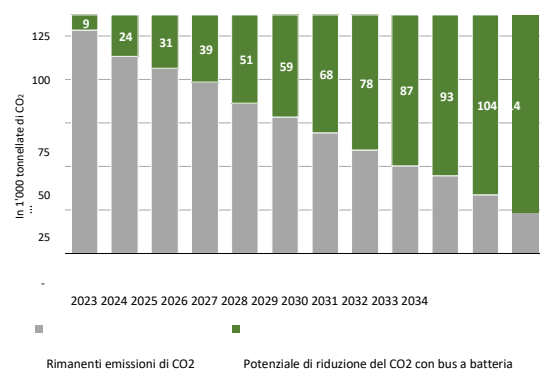
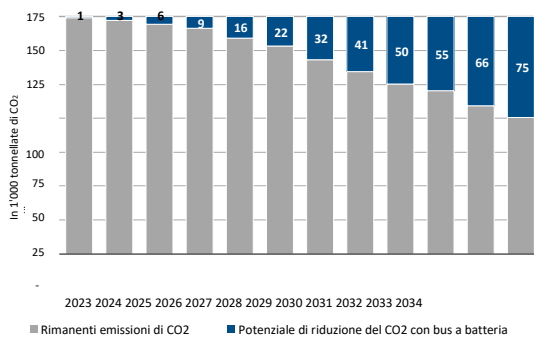
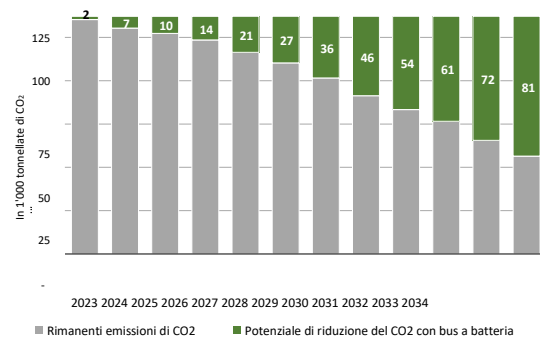
**Scenario «realistico»****Scenario «realistico»**

Grafico INFRAS.

Condizioni quadro normative, finanziamento dei TP e strumenti di promozione

Accanto al finanziamento (ordinario) e all'ordinazione di TL e TRV da parte di Confederazione, Cantoni e Comuni, le misure di promozione in vigore rivestono attualmente minore importanza. Tali misure riguardano soprattutto i veicoli a propulsione elettrica (Tabella Z-1), mentre i bus a biodiesel e biogas sono finanziati soprattutto nell'ambito dell'ordinazione dei TP. Le nuove soluzioni e innovazioni previste dal programma R&S, come pure le innovazioni nei TP (UFT) e del programma P-D (UFE) sono irrilevanti a livello di diffusione sul mercato. Il Programma Traffico d'agglomerato (PTA) dell'ARE prevede in particolare il finanziamento di misure infrastrutturali e solo in via eccezionale l'acquisto di veicoli. L'obbligo di compensazione del CO₂ per gli importatori di carburanti fossili, con il progetto di compensazione «Bus elettrici e ibridi», è l'unico strumento o programma complementare a livello nazionale che rappresenti, oltre al finanziamento dei TP, un incentivo finanziario alla copertura dei costi supplementari dei veicoli a propulsione non fossile o scarsamente fossile; il principio di addizionalità va però rispettato e le imprese di trasporto non possono farsi computare la compensazione di CO₂.

Competenze, ampiezza della promozione e ambito di validità variano a seconda delle attuali possibilità di finanziamento e misure di promozione. Anche i processi seguono diverse disposizioni legali. Il finanziamento ordinario dei TP e il Programma Traffico d'agglomerato (PTA) sono processi che si svolgono regolarmente, ma di regola con ritmo biennale o quadriennale. Nel finanziamento ordinario dei TP sono coinvolti tutti e tre i livelli degli enti territoriali e in tale contesto i Cantoni svolgono il ruolo principale. Solo in singoli casi vi sono ulteriori misure di promozione a livello cantonale e comunale. La situazione è quindi complessa.

Tabella Z-2: finanziamento o possibilità di promozione di veicoli e tecnologie di propulsione

	E-bus con ricarica in deposito	E-bus con ricarica occasio- nale	Filobus a batteria	E-bus a celle com- bustibili	Bus a bio- diesel	Bus a biogas
Finanziamento ordinario TP						
R&S nonché innovazioni nei TP dal credito TRV (dal 2022)*						
Programma P-D*						
Programma Traffico d'agglomerato (PTA)**						
Obbligo di compensazione del CO ₂ per gli importatori di carburanti, progetto di compensazione myclimate «Bus elettrici e ibridi»						
Promozione comunale veicolo + infrastruttura di ricarica (p. es. fondo per il risparmio di energia /ewz)						

* Pur non essendo esclusa alcuna tecnologia di propulsione, le possibilità di promozione sono tuttavia meno interessanti (scarso carattere innovativo di nuovi investimenti).

** È possibile il cofinanziamento di linee di contatto, stazioni di ricarica e costi supplementari per l'acquisto di veicoli (i. p. veicoli elettrici con ricarica occasionale/in deposito), se in tal modo si risparmiano costi infrastrutturali per linee di contatto di filobus (art. 17a cpv. 2^{bis} LUMin)

Tabella INFRAS.

Poiché i TP sono ordinati e finanziati dagli enti pubblici, occorre dapprima chiedersi in quale misura siano necessarie ulteriori misure di promozione oppure se nel quadro del processo di ordinazione (e anche nella definizione degli obiettivi delle imprese, di regola parastatali o di diritto pubblico) sia possibile promuovere il passaggio a veicoli a propulsione non fossile o la loro diffusione nei TP. I Cantoni, che coordinano l'ordinazione per il TRV e spesso la cofinanziano per il TL, svolgono a questo riguardo un ruolo di primaria importanza. Le strategie e i piani cantonali volti a raggiungere nei TP l'indipendenza da energie fossili e l'efficienza sul piano energetico possono promuovere la diffusione dei veicoli a propulsione non fossile. Nel contempo devono però essere disponibili anche i relativi mezzi finanziari da parte di Confederazione, Cantoni e Comuni.

Circa un terzo dei Cantoni dispone attualmente di una strategia per rendere i TP indipendenti da energie fossili ed efficienti sul piano energetico, mentre in due Cantoni la preparazione di tale strategia è in corso. In quasi tutti i Cantoni i costi supplementari per i bus a propulsione non fossile ed efficienti sul piano energetico possono essere coperti in linea di principio tramite il finanziamento ordinario dei TP o sono già cofinanziati in tal modo. Non è possibile valutare in qual misura i necessari mezzi finanziari saranno disponibili in futuro (questa valutazione non è oggetto del presente studio); in linea di massima si deve presupporre che la situazione finanziaria varierà notevolmente da un Cantone o Comune all'altro.

Attualmente la procedura di ordinazione e il sistema di rilevamento della qualità del TRV (come base delle convenzioni sugli obiettivi) non tengono conto degli obiettivi ambientali. Non vi sono disposizioni – simili a quelle della normativa europea (Clean Vehicle Directive) – riguardanti gli acquisti per il TRV; tuttavia, secondo le nuove disposizioni, l'acquisto di bus a propulsione alternativa nel TRV deve essere previamente approvato. In singoli Cantoni sono in vigore disposizioni relative all'acquisto (p. es. nella legge sui TP di Basilea-Città). Generalmente va rispettato il principio di addizionalità delle misure di promozione e finanziamento dei TP; tuttavia, se il committente pone condizioni sugli standard ambientali dei bus da acquistare, non si può ritenere che in progetti di compensazione come il programma «Bus ibridi ed elettrici» (strumento sull'obbligo di compensazione del CO₂ per gli importatori di combustibili) il principio di addizionalità sia dimostrato. Questo strumento nazionale di promozione potrebbe quindi risultare meno importante.

Nel contempo, il rimborso dell'imposta sugli oli minerali per le ITC – che per tali imprese rappresenta un aiuto finanziario indiretto – costituisce un rilevante disincentivo all'acquisto di bus a propulsione non fossile. Attualmente tali rimborsi ammontano in media a circa 70 mio. di franchi all'anno.

Conclusioni sul potenziale per i bus a batteria e sui costi supplementari

Dal lato puramente tecnico una sostituzione completa e a breve termine del parco bus a diesel con bus a batteria sarebbe possibile, ma alla luce dell'attuale livello tecnologico risulterebbe economicamente inadeguata e poco sensata sia nel TL sia nel TRV. Alle attuali condizioni quadro i bus a batteria risultano relativamente cari; inoltre, i bus con ricarica in deposito generano, vista l'autonomia insufficiente, un maggiore fabbisogno di veicoli con i relativi costi.

Dovendo presupporre che i fondi di Confederazione, Cantoni e Comuni per i trasporti pubblici saranno limitati, si tratta di ottimizzare, soprattutto a breve e medio termine, i benefici ambientali, trovando un giusto equilibrio tra ampliamento dell'offerta (mirando a incentivare ulteriormente il trasferimento del traffico viaggiatori ai trasporti pubblici) e impiego di bus elettrici. L'investimento nel passaggio a bus elettrici non deve causare una cannibalizzazione di offerte esistenti nel TP (o di ampliamenti dell'offerta). I fondi investiti a questo scopo devono quindi aggiungersi a quelli destinati al finanziamento dei trasporti pubblici.

Sulla base dello scenario «realistico» sopra descritto, che tiene conto dell'ottimizzazione dei benefici summenzionata, dal 2023 al 2034 nel TRV si potrebbe sostituire circa il 50 per cento degli attuali bus a diesel, ossia ca. 1 900 veicoli, con bus a batteria. Nello stesso periodo, nel TL sarebbe possibile sostituire circa il 70 per cento dei bus a diesel, ossia 1 300 veicoli, con bus elettrici a propulsione non fossile.

Supponendo che il rimborso dell'imposta sugli oli minerali per i bus a diesel rimanga in vigore, lo scenario «realistico» prevede che i costi supplementari rispetto a quelli dei bus a diesel si aggirino nel TRV sui 20 mio. di franchi all'anno, per poi aumentare fino a 40–50 mio. circa di franchi all'anno nel 2030; con lo stesso presupposto, nel TL questi costi sarebbero invece compresi a breve termine tra i 10 e i 40 mio. di franchi all'anno per poi salire fino al 2030 a circa 100 mio. di franchi all'anno.

Conclusioni sul fabbisogno di finanziamento e sugli strumenti di promozione

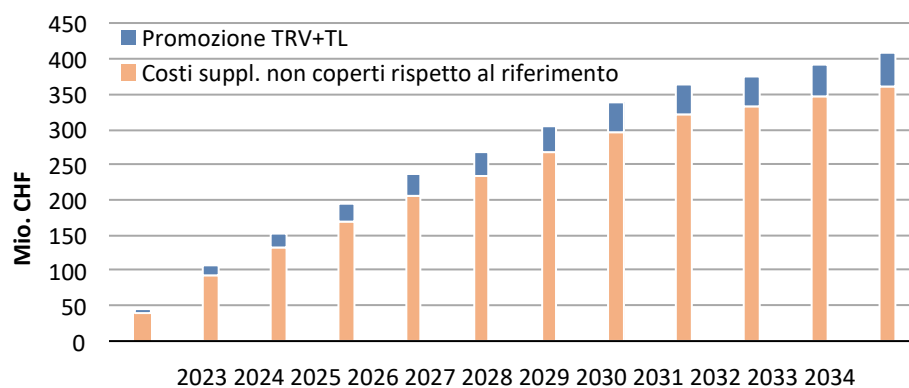
Calcolando i costi supplementari dei bus a batteria rispetto a quelli dei bus a diesel (riferimento) senza rimborso dell'imposta sugli oli minerali, il risultato presenta una grossa differenza. Tale rimborso costituisce un aiuto finanziario indiretto all'acquisto di veicoli a propulsione fossile e un disincentivo finanziariamente rilevante nell'ottica della politica climatica. Con tariffe e offerta dei TP invariate, l'abolizione del suddetto rimborso aumenterebbe in un primo tempo il fabbisogno finanziario per le IT e i committenti dei TP (Confederazione, Cantoni, Comuni), ma promuoverebbe una più rapida diffusione dei bus a propulsione non fossile poiché ridurrebbe nettamente la differenza di costi tra tali bus e i bus a diesel.

Se la diffusione sul mercato dei bus a batteria avverrà secondo lo scenario realistico, i mezzi finanziari delle ITC dovranno aumentare, in particolare se il rimborso dell'imposta sugli oli minerali rimarrà in vigore favorendo così la tecnologia di riferimento dei bus a diesel. Per finanziare i costi supplementari, le ITC potrebbero aumentare le entrate alzando le tariffe. Tali aumenti possono però provocare trasferimenti modali indesiderati sul piano della politica climatica e dei trasporti. Questo ambito non è tuttavia oggetto né del presente studio né del postulato.

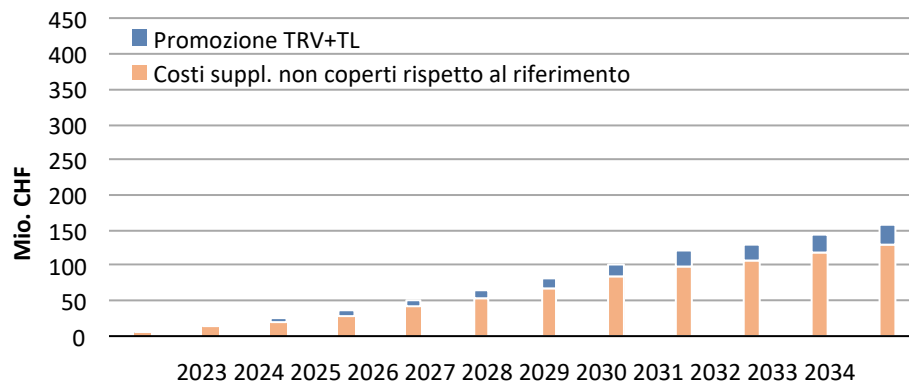
Finora gli strumenti nazionali di promozione attualmente in vigore (l'obbligo di compensazione del CO₂ per gli importatori di carburanti fossili e il Programma Traffico d'agglomerato, PTA) possono coprire una parte relativamente modesta del fabbisogno supplementare di finanziamento (figura Z-4). A questo riguardo vanno considerati gli effetti dell'interazione tra i programmi di promozione e il finanziamento ordinario dei TP da parte di Confederazione, Cantoni e Comuni. L'obbligo di compensazione del CO₂ per gli importatori di carburanti fossili incentiva il passaggio a bus ibridi ed elettrici, qualora esso non sia già prescritto (p. es. da norme di legge). I contributi federali previsti dal PTA sono ad esempio erogati solo per misure che non sono già cofinanziate dalla Confederazione (p. es. TL).

Figura Z-4: evoluzione dei costi supplementari coperti da contributi di promozione e di quelli non coperti (myclimate/KliK + PTA) per TRV+TL (incl. rimborso dell'imposta sugli oli minerali per le ITC)

Scenario «massimo»



Scenario «realistico»



ITC: imprese di trasporto concessionarie, TL: traffico locale, PTA: Programma Traffico d'agglomerato, TRV: traffico regionale viaggiatori

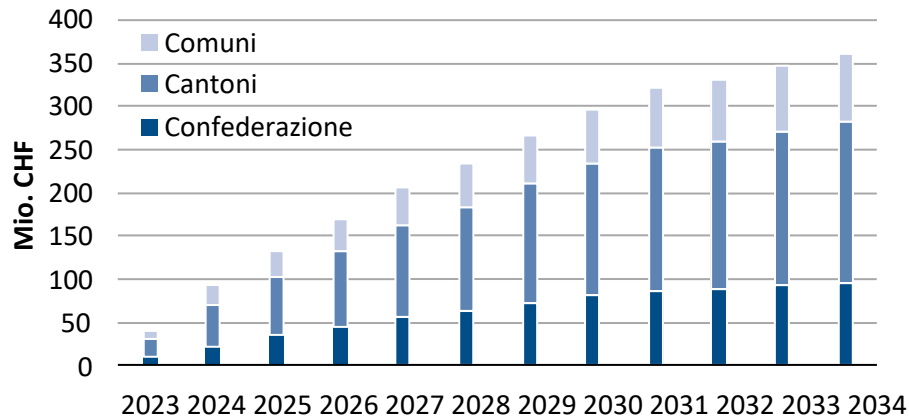
Grafico INFRAS. Fonte: Stime INFRAS.

Se i costi supplementari non coperti fossero finanziati tramite l'ordinazione e il finanziamento ordinario dei TP secondo l'attuale ripartizione (Confederazione, Cantoni, Comuni), il carico supplementare graverebbe soprattutto sui Cantoni, che cofinanziano sia il TRV sia il TL (figura Z-5). Secondo lo scenario realistico e considerando il vigente rimborso dell'imposta sugli oli minerali, nel periodo 2023–2034 il fabbisogno finanziario supplementare ammonterebbe complessivamente a circa 125 mio. di franchi per la Confederazione, 395 mio. di franchi per i Cantoni e 240 mio. di franchi per i Comuni.

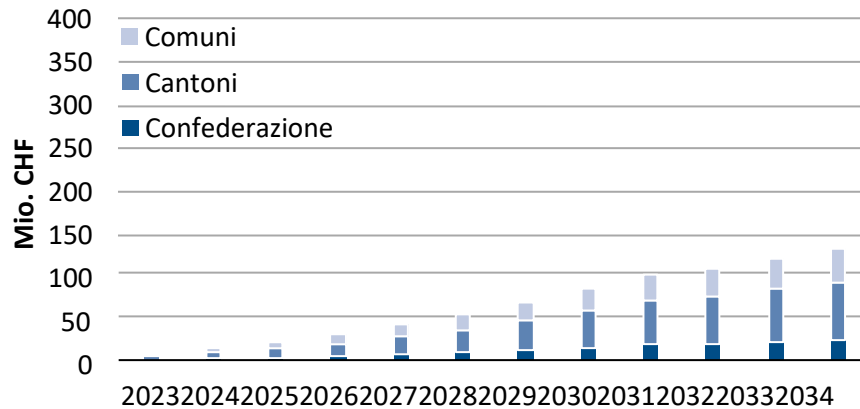
L'abolizione del rimborso dell'imposta sugli oli minerali, pur riducendo al minimo la differenza di costo tra bus a diesel e bus a propulsione non fossile, non avrebbe alcun influsso diretto sul fabbisogno finanziario scoperto sul piano del finanziamento ordinario dei TP. I costi supplementari per i bus a diesel a seguito dell'abolizione del rimborso dell'imposta sugli oli minerali, provocherebbero anch'essi un aumento del fabbisogno non coperto di finanziamento; inoltre, le maggiori entrate dall'imposta sugli oli minerali (incl. supplemento) della Confederazione, in gran parte a destinazione vincolata, non andrebbero automaticamente ad aumentare i fondi federali per il TRV; i Cantoni e i Comuni non riceverebbero ulteriori fondi per coprire i costi supplementari nei TP. A causa dell'attuale situazione (perdita di entrate dovuta al Covid 19) si pone la domanda se i fondi supplementari potranno essere disponibili, in particolare dal 2024, per finanziare i costi supplementari stimati.

Figura Z-5: possibile ripartizione del fabbisogno di finanziamento secondo il finanziamento ordinario dei TP (TRV+TL), incl. rimborso dell'imposta sugli oli minerali

Scenario «massimo»



Scenario «realistico»



TL: traffico locale, TRV: traffico regionale viaggiatori

Grafico INFRAS. Fonte: Stime INFRAS.

Ulteriori possibilità di promozione da parte della Confederazione possono aumentare la diffusione sul mercato dei veicoli a propulsione non fossile. I contributi di promozione dovrebbero essere commisurati sia ai costi supplementari sia ai costi per tonnellata di CO₂ ridotta. Se vi siano ulteriori strumenti di finanziamento adatti nell'ottica della Confederazione e di quali si tratti, è una questione che rientra nell'ambito di una decisione politica e, come tale, sarà oggetto del rapporto sul postulato redatto in base allo studio di riferimento.

1. Mission et marche à suivre

Aujourd'hui, les surcoûts des bus dotés de moteurs sans carburant fossile par rapport aux bus diesel constituent entre autres un obstacle à une exploitation plus écologique des bus publics. Sous l'angle de la politique énergétique et climatique, l'encouragement des moyens de transports publics qui se passent de carburants fossiles est à saluer, car cela permettrait d'accélérer considérablement le remplacement des bus diesel. Toutefois, il est actuellement impossible de chiffrer de manière fiable tant les coûts que l'efficacité d'une telle transition. Il convient donc dans un premier temps de produire des données de base fiables qui permettent d'évaluer les possibilités d'utilisation de bus équipés de moteurs sans carburant fossile et du potentiel de réduction des émissions de CO₂, non seulement aujourd'hui mais aussi à l'avenir.

La présente étude expose, au moyen d'un passage en revue des avantages (CO₂, énergie, lutte contre la pollution atmosphérique) et des coûts, les concepts de bus envisageables en fonction des lignes (types) ainsi que l'évolution des coûts compte tenu des progrès technologiques. Les surcoûts actuels et futurs par rapport à la référence diesel en sont déduits. L'étude montre également les conditions cadres existantes et les possibilités de financement pour les systèmes de propulsion à énergies non fossiles. Rappelons que les bus diesel sont aujourd'hui responsables au total d'environ 2 pour cent du CO₂ émis par les transports⁴ en Suisse. Les coûts externes liés aux bus dans le transport public de voyageurs sont actuellement estimés à environ 250 millions de francs par an (ARE 2020b). Les éventuels mécanismes de financement doivent par conséquent être simples et efficaces. L'étude sert de base au rapport relatif au postulat 19.3000 (*Encourager le passage des véhicules de transports publics aux énergies propres*). La rédaction du rapport relatif au postulat est assurée par le DETEC.

La présente étude de base est structurée comme suit : le chapitre 2 (Analyse de la situation des lignes de bus diesel en Suisse) résume les principaux chiffres clés des flottes et des lignes. Ceux-ci sont utilisés, entre autres, pour extrapoler les résultats quantitatifs à l'ensemble de la Suisse. Le chapitre 3 donne un aperçu complet de l'état actuel et des développements attendus des moteurs sans carburant fossile en tant qu'alternatives aux bus diesel actuels. En outre, les potentiels d'utilisation technique sont examinés. Dans le chapitre 4, une analyse quantitative de l'impact sur les coûts et l'écologie est réalisée sur la base d'études de cas qui représentent des domaines d'application typiques du transport local et régional en Suisse. En outre, d'autres critères sont évalués de manière qualitative. Enfin, le chapitre 5 présente le cadre réglementaire en Suisse, avec un regard sur l'étranger. En outre, les options de financement et d'encouragement existantes pour les options de propulsion à énergies non fossiles dans le transport par bus seront évoquées. La synthèse finale du chapitre 6 montre les potentiels de réduction des émissions de gaz à effet de serre et les surcoûts associés, extrapolés à l'ensemble de la Suisse. Sur cette base, les options de financement et d'encouragement existantes sont évaluées.

⁴ Source : OFEV - Inventaire des gaz à effet de serre, état en 2018.

2. Analyse de la situation des lignes de bus diesel en Suisse

L'analyse de la situation des lignes de transport régional de voyageurs (TRV) et de transport local (TL) s'appuie sur les principes suivants :

- Indicateurs de ligne pour les lignes TRV : bases OFT
- Indicateurs de ligne pour les lignes locales : enquête auprès des entreprises de transport, organisée par l'OFEN/UTP
- Indicateurs de flotte du TRV et du trafic local : enquête auprès des entreprises de transport, organisée par l'OFEN/UTP.

Les chapitres suivants compilent les résultats de ces bases.

Remarque : aujourd'hui, plus de 550 trolleybus circulent en Suisse. L'analyse de la situation actuelle et l'enquête auprès des entreprises de transport réalisées à cette fin ne concernent bien entendu que les véhicules diesel, conformément aux objectifs du postulat (encourager le passage des véhicules de transport public aux énergies propres).

2.1. Réponse et échantillon de l'enquête auprès des entreprises de transport

Dans le cadre de l'enquête, un total de 70 entreprises de transport (ET) qui exploitent des transports routiers publics avec des bus ont été interrogées en janvier 2020. Au total, 48 entreprises de transport ont répondu. La flotte de bus diesel ainsi couverte comprend 5'271 véhicules (cf. figure 1). On estime donc que l'échantillon couvre plus de 90 pour cent de tous les bus utilisés aujourd'hui dans les transports publics⁵.

⁵ Flotte en 2015 : 5'410 bus (hors trolleybus) ; source : OFS ; Véhicules de transport de personnes ; publié le 31.01.2020

Figure 1 : entreprises de transport et nombre de bus inclus dans l'enquête auprès des ET (état : janvier 2020)

Entreprise de transport	Abréviation	N° ET	Nombre de bus
1 Autobus AG Liestal	AAGL	811	39
2 Auto AG Rothenburg	AAGR	812	35
3 Auto AG Schwyz	AAGS	340	41
4 Rottal Auto AG	ARAG	819	23
5 Aare Seeland mobil AG	asm	870	29
6 Autobetrieb Sernftal AG	AS	856	11
7 Busbetrieb Aarau	BBA	502	37
8 BERNMOBIL (BEM)	BEM	827	122
9 Baselland Transport AG	BLT	122	62
10 Busbetrieb Lichtensteig-Wattwil-Ebnat-Kappel	BLWE	810	5
11 Busbetrieb Olten Gösgen Gäu AG	BOGG	793	45
12 BUS Ostschweiz AG	BOS	334	89
13 Busbetrieb Rapperswil - Eschenbach - Rüti	BRER	772	11
14 Busbetrieb Solothurn und Umgebung AG	BSU	542	39
15 Bus und Service AG - Chur	BuS_Chur	766	27
16 Bus und Service AG - Engadin	BuS_Engadin	766	22
17 Busland AG	BLAG	871	39
18 Basler Verkehrsbetriebe	BVB	303	112
19 Ferrovie Autolinee Regionali Ticinesi	FART	817	43
20 Grindelwald Bus AG	GWB	859	10
21 Verkehrsbetriebe Leuk-Leukerbad und Umgebung	LLB	855	17
22 Transports de la région Morges-Bière-Cossonay SA	MBC	29	60
23 CarPostal SA	PAG	7	2'204
24 Regionalverkehr Bern-Solothurn AG	RBS	170	43
25 Regionale Verkehrsbetriebe Baden-Wettingen	RVBW	715	64
26 Stadtbuss Frauenfeld	SBF	797	12
27 Autobus Sierre-Montana-Crans	SMC	142	19
28 STI Bus AG	STI	146	85
29 Transports Publics de la Région Lausannoise	TL	519	148
30 Transports Publics du Chablais	TPC	105	38
31 Transports publics fribourgeois Trafic	TPF	834	192
32 Transports publics genevois	TPG	316	226
33 TRASPORTI PUBBLICI LUGANESI	TPL	955	72
34 Transports publics de la Région Nyonnaise	TPN	741	34
35 Transports Publics Neuchâtelois	transN	47	96
36 Transports Vallée-de-Joux - Yverdon-les-Bains - Sainte-Croix	TRAVYS	37	50
37 Verkehrsbetriebe Biel	VB	889	34
38 Verkehrsbetrieb der Landschaft Davos	VBD	740	17
39 Verkehrsbetriebe Luzern	VLB	523	81
40 Verkehrsbetriebe St.Gallen	VBSG	885	65
41 Verkehrsbetriebe Schaffhausen	VBSH	836	35
42 Transports publics Vevey-Montreux-Chillon-Villeneuve	VMCV	543	38
43 Zugerland Verkehrsbetriebe	ZVB	185	111
44 Zürcher Verkehrsverbund	ZVV	544	689
Total			5'271

Le ZVV comprend les cinq ET VBZ, VBG, SZU, SBW, VZO ; PAG est géré séparément.

Graphique INFRAS. Source : Enquête ET OFEN/UTP 2020.

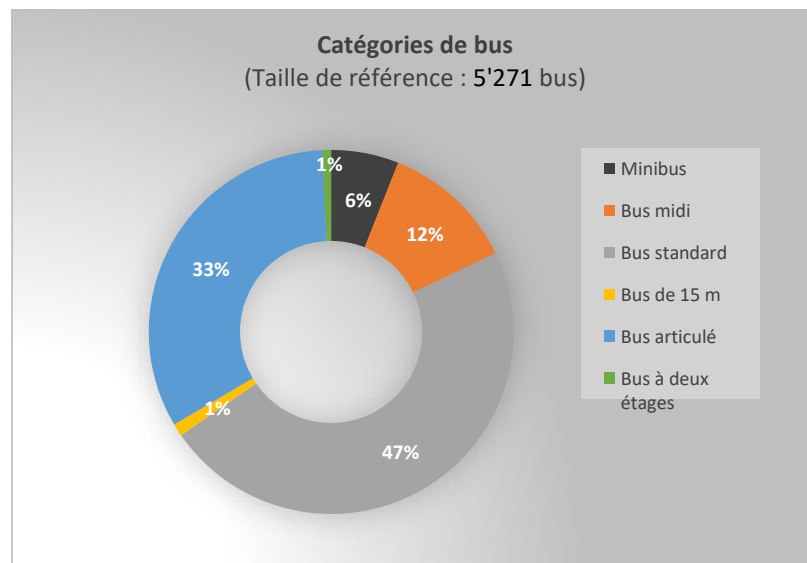
2.2. Indicateurs de la flotte

Catégories de bus

Sur l'ensemble de la flotte de TRV et de trafic local en Suisse, un peu moins de la moitié est constituée de bus standards et environ un tiers de bus articulés. La part des bus midi est de 12 pour cent, celle des minibus de 6 pour cent. Les bus de 15 mètres et les véhicules à deux étages ont une importance mineure, avec environ 1 pour cent chacun.

Aujourd'hui, les bus à double articulation sont uniquement utilisés comme trolleybus (à batterie) et ne sont donc pas représentés sur la figure 2.

Figure 2 : répartition des bus diesel en Suisse selon les différentes tailles de bus (TRV et trafic local)



Graphique INFRAS. Source : enquête ET OFEN/UTP 2020

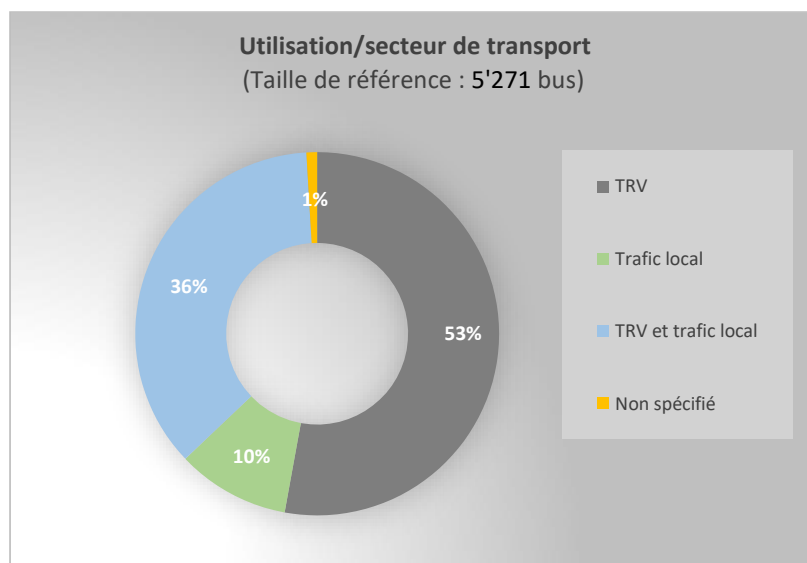
Figure 3 : ordre de grandeur des longueurs de véhicules et des capacités de transport de différentes tailles de bus

	Longueur du véhicule [m]	Places assises	Places debout (4 p./m²)	Places assises et debout
Minibus	7	15	10	25
Bus midi	10	25	15	40
Bus standard	12	35	35	70
Bus articulé	18	50	60	110
Bus à deux étages	13	70	25	95

Graphique INFRAS.

Utilisation des bus selon le secteur des transports

Sur les plus de 5'000 bus que compte la Suisse, une bonne moitié (53 pour cent) est utilisée exclusivement pour le trafic régional de voyageurs (TRV). D'après l'enquête, la part des bus utilisée uniquement pour le trafic local⁶ est faible en comparaison avec 10 pour cent. Plus d'un tiers (36 pour cent) des bus sont utilisés de manière flexible dans le TRV et le trafic local. Cependant, la catégorie « TRV et trafic local » est probablement surestimée, car il est probable que les ET n'aient pas été en mesure de répartir les véhicules en détail dans certains cas dans le cadre de cette enquête.

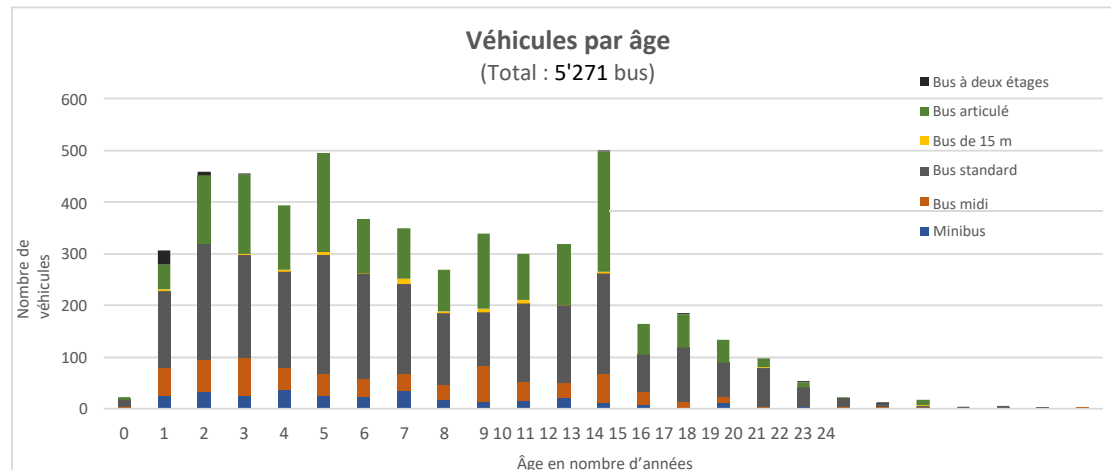
Figure 4 : utilisation des bus selon le secteur des transports

Graphique INFRAS. Source : enquête ET OFEN/UTP 2020

Âge de la flotte de bus

La figure suivante présente l'âge des bus utilisés aujourd'hui en Suisse. Elle montre que certains véhicules continuent à être utilisés même après la période d'amortissement définie dans les comptes (environ 12 ans pour les bus articulés et standards, période généralement un peu plus courte pour les bus midi/minibus).

⁶ Définition du trafic local : le trafic local comprend toutes les lignes de bus du trafic local et d'agglomération qui ne sont pas commandées et financées par l'OFT, par opposition aux lignes de bus du trafic régional de voyageurs (TRV), qui sont commandées et financées par l'OFT (avec les cantons).

Figure 5 : âge des bus en service aujourd'hui

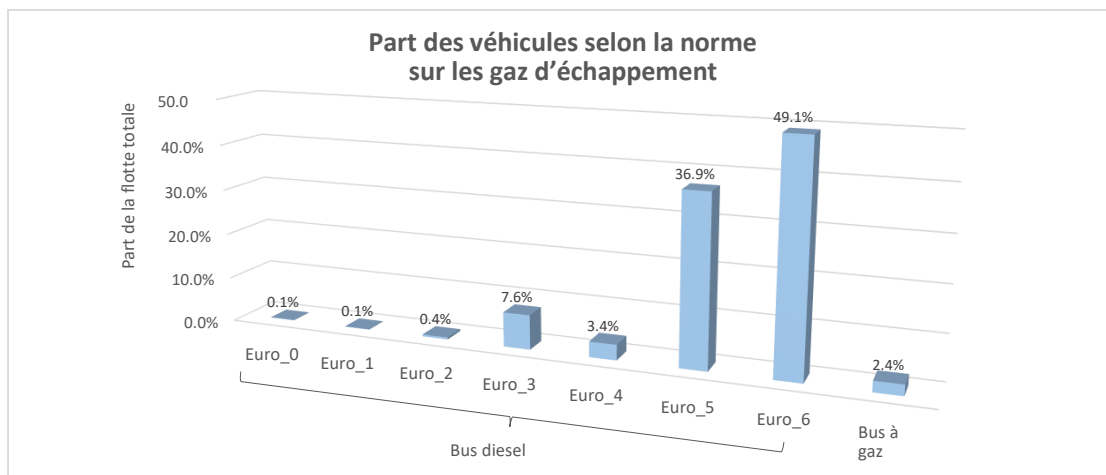
Graphique INFRAS. Source : enquête ET OFEN/UTP 2020

Norme sur les gaz d'échappement

Environ la moitié des bus en circulation aujourd'hui répondent à la norme d'émissions Euro 6 la plus stricte. Un peu moins de 40 pour cent sont des véhicules Euro 5. La part des bus encore utilisés avec les normes Euro 3 et 4 est d'environ 10 pour cent.

2 à 3 pour cent de l'ensemble des bus sont des bus à gaz répondant à la norme d'émission EEV⁷. L'enquête comprend les bus à gaz de Bernmobil (76 bus), Basler Verkehrsbetriebe (38), Busbetrieb Olten Gösgen Gäu (9) et Transports publics de la région lausannoise (2).

⁷ Enhanced Environmentally Friendly Vehicle ; norme européenne volontaire relative aux émissions de gaz d'échappement pour les bus et les camions, qui correspond approximativement à la norme Euro 5 en termes de qualité d'émission.

Figure 6 : véhicules par norme sur les gaz d'échappement

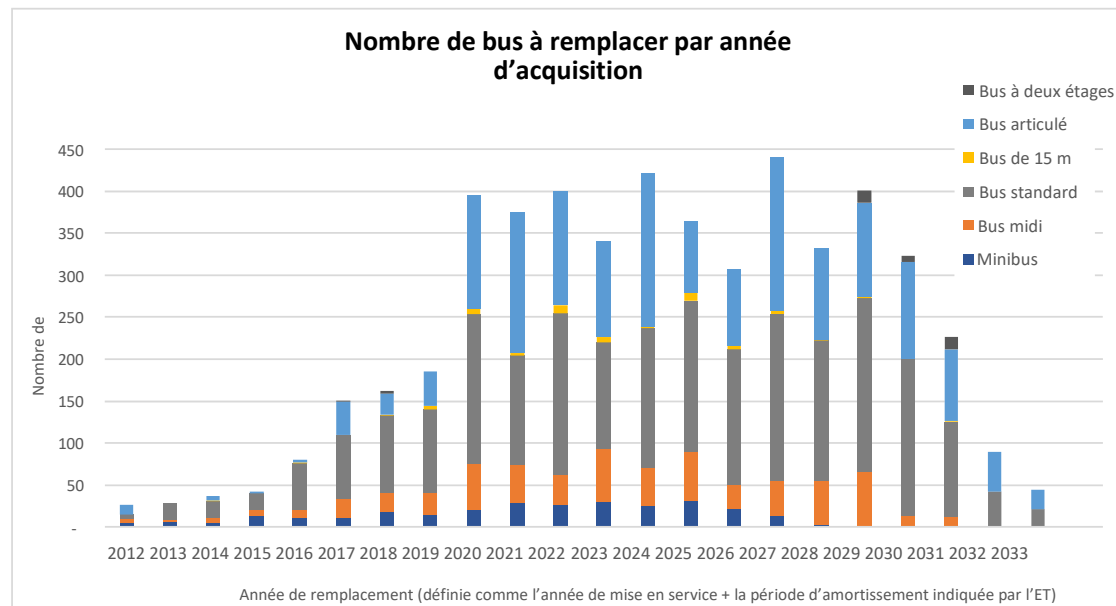
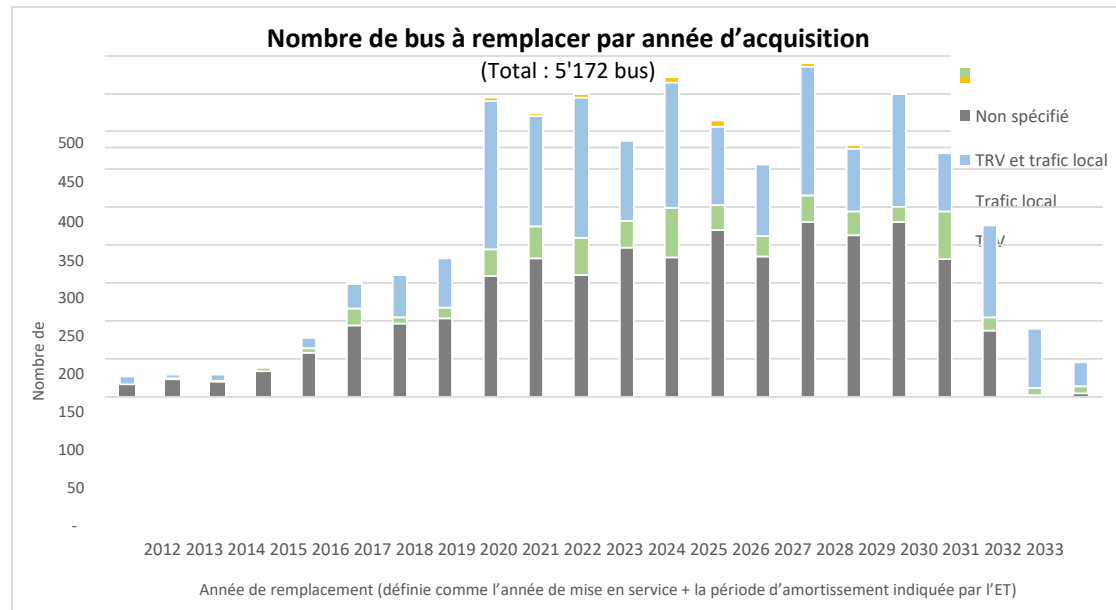
Graphique INFRAS. Source : enquête ET OFEN/UTP 2020

Combien de bus doivent être remplacés au cours des prochaines années ?

La figure 7 montre à quel moment et dans quelle mesure il faudra remplacer les bus du parc existant en raison de leur âge. L'année de remplacement a été déterminée à partir des informations sur l'année de mise en service et la période d'amortissement indiquées par l'ET. La figure 7 montre qu'une partie de la flotte devrait déjà avoir été remplacée ces dernières années. Ces véhicules sont donc des bus qui sont manifestement utilisés au-delà de leur période d'amortissement comptable⁸. Ces bus devraient être remplacés dans les 10 prochaines années. Dans le cas de ces véhicules de la période 2012-2020, il est tout à fait possible que tous les bus ne soient pas réellement remplacés, par exemple parce qu'ils ne sont conservés que comme véhicules de réserve pour les urgences. Toutefois, en raison de nouveaux aménagements d'offres, il est également probable que des bus supplémentaires soient acquis. Nous supposons ici, de manière pragmatique, que ces effets s'équilibrent.

⁸ Cette période d'amortissement correspond généralement à la durée de vie comptable des véhicules. La durée effective d'utilisation peut également être plus longue. En l'absence d'informations détaillées sur la durée d'utilisation effective, il a été supposé de manière pragmatique que la période d'amortissement indiquée par l'ET correspond également à la durée d'utilisation.

Figure 7 : aperçu des remplacements de véhicules par secteur et par taille de bus selon l'enquête auprès des ET



Remarque sur l'échantillon : l'échantillon est ici réduit d'environ 100 bus (2 pour cent) car on suppose que les véhicules très anciens (plus de 20 ans) indiqués par les ET ne sont plus remplacés car ils ne sont plus en service régulier.

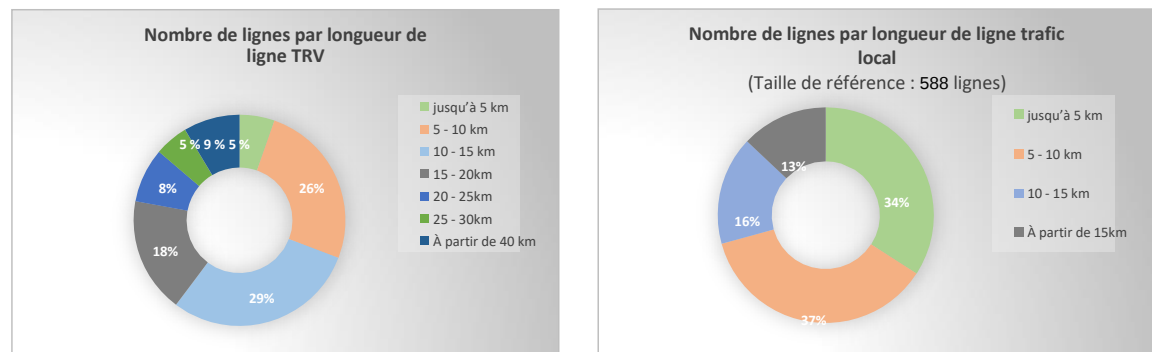
Graphique INFRAS. Source : enquête ET OFEN/UTP 2020

2.3. Indicateurs de ligne

Longueurs des lignes

La figure 8 montre la distribution du nombre de lignes par longueur de ligne. Une bonne moitié (55 pour cent) des lignes de TRV ont une longueur de ligne inférieure à 15 km. Environ 15 pour cent sont des lignes très longues, avec des longueurs de plus de 25 km (graphique de gauche). Pour le trafic local, 70 pour cent entrent dans la catégorie < 10 km (graphique de droite).

Figure 8 : nombre de lignes par longueur de ligne pour le TRV et le trafic local

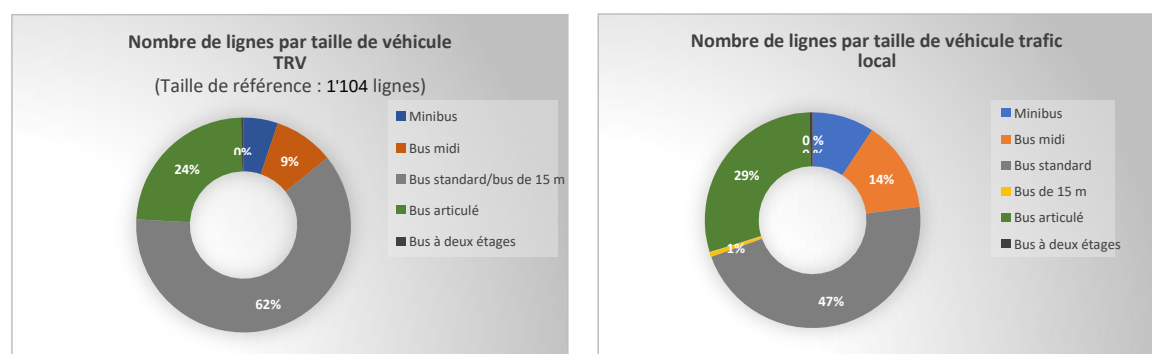


Graphique INFRAS. Source : <à saisir ici>

Taille des véhicules

Tant pour le TRV (53 pour cent) que pour le trafic local (47 pour cent), environ la moitié des lignes est exploitée avec des bus standards. La part des lignes avec des bus articulés varie de 25 pour cent (en TRV) à 29 pour cent (en trafic local). Il en va de même pour les bus midi (18 pour cent pour le TRV, 14 pour cent pour le trafic local). La part des lignes avec minibus est comparativement faible dans les deux secteurs, à moins de 10 pour cent.

Figure 9 : nombre de lignes par taille de véhicule pour le TRV et le trafic local



Graphique INFRAS. Source : <à saisir ici>

Coûts d'exploitation et indemnités des groupes de lignes en fonction de la taille des véhicules

Les coûts complets de l'ensemble des services de bus du trafic régional (TRV) se sont élevés à un peu moins de 1'200 millions de francs par an en 2019, les indemnités pour des prestations correspondantes à environ 620 millions de francs par an, dont environ la moitié est financée par la Confédération et l'autre moitié par les cantons.

Tableau 2 : coûts complets et indemnités en 2019 pour les lignes TRV (enquête complète)

	Coûts complets CHF/a	Indemnités totales CHF/a	Part du canton CHF/a	Part de la Confédération CHF/a	Courses-km km/a	Nombre de lignes Échantillon
Minibus	16'671'149	12'462'273	4'795'421	7'666'852	2'788'676	57
Bus midi	66'163'801	41'481'311	17'741'967	23'739'344	8'561'545	100
Bus standard	599'989'456	340'339'342	160'905'032	179'434'310	93'823'392	678
Bus articulé	496'123'405	219'307'046	120'497'908	98'809'138	71'520'018	262
Bus à deux étages	10'670'514	3'139'663	1'479'537	1'660'126	1'256'806	4
Total	1'189'618'326	616'729'635	305'419'865	311'309'770	177'950'436	1'101

Tableau INFRAS. Source : source BAV

Pour le trafic local, on ne dispose pas d'une enquête exhaustive, mais uniquement d'un échantillon tiré de l'enquête effectuée auprès des entreprises de transport. Cet échantillon englobe les services de bus diesel, dont les coûts d'exploitation avoisinent les 900 millions de francs suisses par an. Les indemnités pour les prestations correspondantes s'élèvent à environ 520 millions de francs, qui sont financées par les communes et les cantons (parts non connues d'après l'enquête). On estime que cet échantillon représente environ 70 à 80 pour cent de l'ensemble du trafic local en Suisse⁹.

Tableau 3 : coûts complets et indemnités en 2019 pour les lignes locales selon l'enquête auprès des ET (échantillon)

	Coûts complets CHF/a	Indemnités CHF/a	Courses-km km/a	Nombre de lignes Échantillon
Minibus	21'485'598	20'206'883	3'138'837	44
Bus midi	62'593'599	52'428'003	7'989'746	74
Bus standard	249'437'833	150'857'734	30'434'545	230
Bus de 15 m	11'584'347	6'603'101	1'249'580	4
Bus articulé	542'281'265	291'407'634	56'893'336	162
Bus à deux étages	8'809'283	5'099'392	1'223'717	3
Total	896'191'925	526'602'747	100'929'761	517

Tableau INFRAS. Source : enquête ET OFEN/UTP 2020

⁹ Selon la statistique de l'OFS « Coûts du transport routier motorisé », les coûts de transport (y compris l'infrastructure) des bus en Suisse (trafic local et TRV confondus) s'élevaient à 2'300 millions de francs par an en 2015. Les coûts annuels des lignes TRV étant d'environ 1'200 millions de CHF, les coûts des lignes de bus locales diesel sont donc de l'ordre de 1'100 millions de CHF/an.

3. Systèmes de propulsion et développements futurs

3.1. Terminologie / Définitions

Nous définissons comme suit les technologies ou familles de technologies considérées comme des systèmes de propulsion alternatives au bus diesel :

- Bus électriques : bus propulsés exclusivement par un moteur électrique :
 - Bus à batterie : bus électriques dont les besoins en énergie pour le trajet sont couverts par une batterie qui se recharge sur le réseau électrique. Il s'agit notamment des :
 - Bus rechargés au dépôt : bus qui sont généralement rechargés la nuit pendant plusieurs heures,
 - Bus alimentés par biberonnage (statique) : bus qui se rechargent à l'arrêt, généralement aux terminaux, pendant plusieurs minutes,
 - Bus alimentés par biberonnage (dynamique), également appelé IMC (*in motion charging*) ou trolleybus à batterie : bus qui circulent en partie sur le réseau de trolleybus et qui rechargent leur batterie pendant ce temps, ce qui permet également de rouler sans caténaire¹⁰,
 - Bus à charge combinée : bus dotés d'une batterie relativement importante qui sont rechargés à la fois au dépôt et par biberonnage statique.
 - Bus à piles à combustible : bus électriques dont les besoins en énergie pour le trajet sont couverts par une pile à combustible. Deux variantes sont envisageables ici :
 - Bus conventionnels à pile à combustible : bus dotés d'une batterie relativement petite qui ne sert qu'à couvrir les pics de consommation et non à stocker l'énergie,
 - Bus plug-in à pile à combustible : bus dotés d'une batterie plus importante qui se recharge sur le secteur et d'un système de pile à combustible à bord qui recharge la batterie en cas de besoin.
- Bus hybrides : bus qui disposent à la fois d'une batterie pour l'entraînement et d'un moteur de propulsion électrique, ainsi que d'un moteur à combustion. Le moteur à combustion peut être utilisé directement comme moteur de propulsion ou alimenter un générateur, qui à son tour charge la batterie¹¹. Des formes mixtes sont également concevables. Pour les bus hybrides, nous faisons une distinction entre :
 - les bus hybrides classiques dont la batterie n'est pas chargée sur le réseau électrique,
 - les bus hybrides plug-in dont la batterie se recharge notamment à partir du réseau électrique.

¹⁰ Les trolleybus conventionnels tirent leur énergie de propulsion directement de la caténaire et ne disposent pas d'une batterie qui leur permet de se déplacer sans caténaire. Le trolleybus à batterie, quant à lui, tire son énergie de propulsion exclusivement de sa batterie, qui est rechargée par la caténaire pendant le trajet (*in motion charging*). D'une part, cela permet de parcourir de plus longs tronçons de voie sans caténaire. D'autre part, cette technologie permet une gestion plus efficace de l'énergie. Cette technologie a déjà été mise en œuvre avec succès avec le SwissTrolley plus. Le trolleybus conventionnel ne doit donc plus être considéré.

¹¹ Cette variante pourrait également être classée comme un bus électrique.

- Bus à moteur à combustion. Nous faisons ici une distinction en fonction de la technologie :
 - Allumage par compression : généralement les bus à moteur diesel. À l'avenir, des moteurs à allumage par compression alimentés à l'essence sont également attendus sur le marché.
 - Les moteurs Otto : bus généralement conçus pour fonctionner au méthane (GNC ou LNG) ; le fonctionnement à l'essence est également possible, mais pas prévu pour les bus.

3.2. Systèmes de propulsion

Dans ce chapitre, nous documentons d'abord la sélection des systèmes de propulsion et des carburants à considérer plus en détail. Viennent ensuite les descriptions des combinaisons sélectionnées de systèmes de propulsion et de carburants, en mettant l'accent sur les propriétés technologiques et les domaines d'application actuels et futurs. Les coûts et les aspects environnementaux des bus équipés de différents systèmes de propulsion sont ensuite examinés dans le cadre d'une comparaison de toutes les technologies.

3.2.1. Sélection des options à envisager

Nous commençons par un passage en revue de toutes les combinaisons d'options de propulsion et de carburants envisageables aujourd'hui et à l'avenir dans le transport public par bus, selon le principe « efficace en énergie » – caractère renouvelable – technologie à faible émission¹². La figure 10 illustre ces combinaisons. Pour toutes les technologies alternatives, outre la technologie d'entraînement, le type et les voies de production des carburants (l'électricité étant également appelée carburant dans le cas des bus électriques) doivent être pris en compte afin de déterminer les impacts environnementaux et les coûts. En principe, pour les hydrocarbures, une distinction doit être faite entre les carburants fossiles, biogènes et synthétiques. Dans le cas des carburants biogènes, de nombreuses matières premières et voies de traitement différentes sont envisageables, ce qui entraîne des impacts environnementaux et des coûts très variés. Dans le cas de l'hydrogène, la production à partir du gaz naturel par reformage à la vapeur (avec ou sans captage et stockage du CO₂ qui en résulte) et la production par électrolyse de l'eau sont toutes deux envisageables. L'électricité nécessaire à la production d'hydrogène et à la recharge des batteries peut être produite de différentes manières. Des informations générales sur les carburants renouvelables figurent à l'annexe A3.

Sur la base d'une évaluation approximative, on exclut d'abord les options qui ne remplissent pas ou de manière insuffisante les critères « caractère renouvelable », « efficace en énergie » et « technologie à faible émission ».

¹²Efficace en énergie en termes de besoin d'énergie primaire pendant l'exploitation et le cycle de vie ; renouvelable en termes de consommation d'énergie ; technologie à faible émission en termes d'émissions de gaz à effet de serre pendant le cycle de vie, de polluants atmosphériques et de bruit pendant l'exploitation.

Parmi les options restantes, en collaboration avec le groupe de suivi, il s'agissait de retenir pour un examen approfondi celles qui présentent le plus grand potentiel au regard des trois critères mentionnés ci-dessus, ainsi qu'en termes d'aspects opérationnels et de coûts.

Les carburants fossiles et l'électricité non renouvelable ne remplissent évidemment pas le critère du caractère renouvelable. Il en va de même pour l'hydrogène, qui est produit à partir du gaz naturel par reformage à la vapeur. Si le CO₂ résultant de cette production est capturé et stocké en toute sécurité sur celui-ci (CCS ; *Carbon Capture and Storage*), l'hydrogène produit peut être décrit comme neutre en CO₂, mais la base reste le gaz naturel fossile.

Figure 10 : aperçu et sélection des options de propulsion et des carburants

Sélection approfondie des options d'entraînement			Diesel			Méthane			Hydrogène			Électricité	
			fossile	bio	PtL (électricité)	fossile	bio	PtL (électricité)	Reformage à la vapeur sans CCS	Reformage à la vapeur avec CCS	Électrolyse (électricité renouvelable)	non renouvelable	renouvelable
Bus électriques	Bus à batterie	Recharge au dépôt											
		Système de biberonnage (statique)											
		Système de biberonnage (dynamique)											
		Recharge combinée											
	Bus à pile à combustible	Conventionnel											
		Plug-in											
Bus hybrides	Allumage par compression	Conventionnel											
		Plug-in											
	Otto	Conventionnel											
		Plug-in											
Bus à moteur à combustion	Allumage par compression	Diesel											
		Essence											
		Gaz (méthane)											
		Gaz (méthane)											
	Otto	Essence											

Inenvisageable sur le plan technique

Non renouvelable

Non efficace

Référence

À analyser en détail

Graphique INFRAS.

Les bus équipés de moteurs à combustion conventionnels consomment entre 15 et 20 pour cent d'énergie de plus que les bus hybrides comparables. Les coûts supplémentaires d'un bus hybride se situent dans une fourchette raisonnable et la pression exercée, par exemple par l'UE, pour obtenir des améliorations de l'efficacité des véhicules utilitaires lourds également aidera les hybrides à s'imposer de plus en plus sur le marché. Sur la base de ces considérations, il a été décidé de se concentrer sur les bus hybrides pour les options de biocarburant.

La production de carburants liquides synthétiques (PtL ; *Power to Liquid*) a un rendement énergétique d'environ 40 pour cent seulement. En combinaison avec un moteur à combustion, environ 11 pour cent de l'énergie totale utilisée est convertie en mouvement. Bien que le PtL soit exclu de tout examen ultérieur, l'annexe A3.2 aborde brièvement la production et l'utilisation de l'« électricité excédentaire ».

3.2.2. Bus à batterie

Batteries

Dans la présente étude, le terme « batterie » englobe toujours l'ensemble du système, qui se compose des cellules électrochimiques proprement dites, d'un système de gestion de la batterie, du refroidissement, de l'emballage et de la mise en contact. Aujourd'hui, les batteries utilisées pour alimenter les bus sont exclusivement des batteries au lithium. Pour les bus rechargés au dépôt, on utilise aujourd'hui des batteries lithium-fer-phosphate (LFP) ou lithium nickel-manganèse-cobalt (NMC) avec des anodes en graphite. Pour les bus alimentés par biberonnage, on utilise soit des batteries NMC avec anodes en titanate (LTO), soit des batteries NMC avec anodes en graphite. Des informations générales sur les batteries (composition, densités d'énergie et de puissance, prix, options de recyclage ainsi que les aspects environnementaux et de criticité dans la production) sont compilées dans l'annexe A1.

Efficiences énergétique

L'entraînement des bus électriques est très efficace. Plus de 70 pour cent de l'énergie stockée dans la batterie peut être convertie en mouvement. Si l'on tient également compte des pertes d'énergie pendant la charge de la batterie (environ 15 pour cent), 60 pour cent de l'énergie fournie à la batterie est encore transformé en mouvement. Si le courant de charge d'un bus à batterie provient d'une source renouvelable et est acheminé vers le bus via le réseau électrique, des pertes de transmission et de conversion d'environ 12 pour cent se produisent. Cela signifie qu'environ 53 pour cent de l'électricité produite peut être convertie en mouvement dans un bus à batterie.

Mais comme l'entraînement est très efficace, il n'y a pratiquement pas de chaleur perdue utilisable. Les bus à batterie doivent donc être chauffés activement, ce qui se fait soit par l'électricité de la batterie, soit par un chauffage auxiliaire fonctionnant au diesel ou au gaz. La ventilation et, si nécessaire, le refroidissement du véhicule nécessitent également l'énergie de la batterie. Les véhicules modernes sont équipés de pompes à chaleur et de systèmes de chauffage et de refroidissement efficaces. Néanmoins, ces consommateurs auxiliaires représentent une part importante de la consommation totale d'énergie des véhicules et réduisent donc l'autonomie du véhicule lors des journées particulièrement froides ou chaudes.

Il existe un potentiel d'amélioration de l'électronique de puissance dans le véhicule et surtout dans les chargeurs. Avec les meilleures technologies disponibles dans ces composants, l'efficacité du WtW pourrait être augmentée de 10 à 20 points de pourcentage. D'énormes progrès ont déjà été réalisés ces dernières années en ce qui concerne les consommateurs auxiliaires pour le chauffage, la ventilation, la climatisation, l'éclairage, etc. Pour les véhicules qui ne sont pas équipés des meilleures technologies disponibles, il est possible de réaliser des économies importantes sur la demande d'énergie de ces consommateurs. Or même l'état actuel de la technique présente encore un potentiel de développement.

3.2.2.1. Bus rechargés au dépôt

Les bus rechargés au dépôt sont des bus à batterie électrique qui sont rechargés relativement lentement – généralement au dépôt. La capacité de la batterie est le facteur le plus critique pour l'utilisation des bus rechargés au dépôt. Elle détermine si une ligne peut être desservie avec un seul véhicule pendant toute la durée de l'exploitation ou si des véhicules doivent être rechargés au dépôt au cours de la journée, ce qui entraîne un effort supplémentaire et souvent aussi des besoins supplémentaires en véhicules. Par conséquent, les bus rechargés au dépôt ont besoin d'une grande batterie à optimisation énergétique. La capacité de la batterie dans un bus est limitée sur le plan pratique par la masse de la batterie. La masse de la batterie elle-même est limitée par le poids maximal par essieu et la capacité de transport : en pratique, une batterie pour un bus standard ou articulé ne doit pas peser plus de 5 tonnes.

Des bus rechargés au dépôt de différents fabricants sont sur le marché depuis plusieurs années. Entre-temps, les principaux fabricants de bus ont également annoncé des modèles prêts à être produits en série dans les années à venir. Comme les batteries sont (encore) très chères et lourdes, on trouve aujourd'hui sur le marché des bus rechargés au dépôt d'une capacité maximale de 600 kWh (environ 4 à 5 tonnes). Avec les prévisions concernant les améliorations des batteries, de nombreux experts prédisent un grand avenir aux bus rechargés au dépôt.

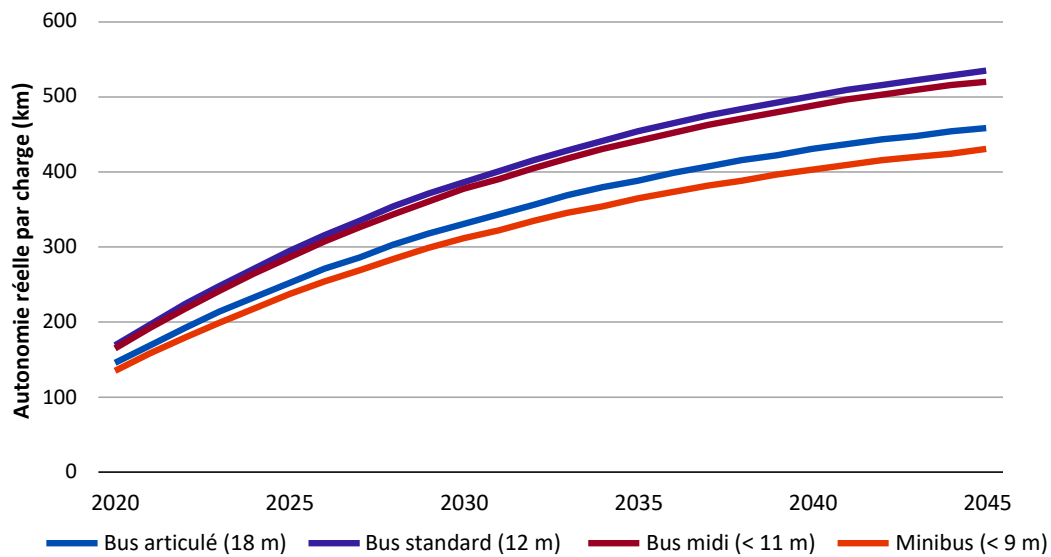
Dans cette étude, nous supposons une masse de batterie constante de 3 à 4 tonnes pour les bus standards et articulés au fil des ans. En raison du développement des batteries, la capacité augmente avec le temps, ce qui signifie qu'un bus acheté en 2020 a une autonomie nettement inférieure à celle d'un bus acheté en 2040 ou 2050 (cf. figure 11).

Les bus rechargés au dépôt ne nécessitent pas d'infrastructure de recharge sur le tronçon. Ils sont rechargés au dépôt, généralement avec une puissance de 150 kW par bus. Pour les bus articulés et standards, cela représente aujourd'hui entre 4 et 6 heures de temps de charge (pour une capacité de batterie de 450-600 kWh).

Si la capacité de la batterie passe à plus de 1000 kWh à l'avenir, comme les prévisions l'indiquent, une puissance de charge plus élevée par bus pourrait être nécessaire.

Nous supposons qu'un dépôt pour bus rechargés au dépôt a une puissance connectée de 150 kW par station de charge. Aux emplacements typiques des dépôts de bus dans les zones commerciales/industrielles, une puissance connectée de 5 MW est généralement possible. Cela signifie qu'environ 30 bus peuvent être rechargés en même temps. À l'avenir, il faut toutefois s'attendre à ce que, à partir de 20 bus de la sorte par dépôt, une puissance connectée plus importante soit nécessaire. Des capacités de connexion plus élevées entraînent des adaptations de l'infrastructure dans les dépôts, qui sont associées à des coûts correspondants (pour les estimations des coûts des infrastructures de charge, voir l'annexe 2). En tout état de cause, dans un dépôt disposant d'une flotte de bus rechargés au dépôt plus importante, un système de gestion de la charge intelligent doit être prévu pour minimiser la puissance nécessaire et optimiser la charge des bus.

Figure 11 : développement de l'autonomie réelle des bus à batterie avec concept de charge au dépôt



Remarque : consommation d'énergie spécifique supposée (moyenne) : bus articulé 2 kWh/km, bus standard 1,5 kWh/km, bus midi 1,1 kWh/km, minibus 0,8 kWh/km

Graphique : INFRAS, pour l'indication des sources et les détails, voir l'annexe 1

3.2.2.2. Bus alimentés par biberonnage statique

Les bus alimentés par biberonnage sont des bus électriques à batterie qui se rechargent rapidement, généralement aux terminus. Pour cela, ces bus ont besoin de batteries relativement petites et à charge rapide (c'est-à-dire à puissance optimisée) (voir annexe A1.1). Dans la présente étude, nous supposons que les batteries permettent une autonomie théorique d'environ 15 à 30 km par charge. Avec l'augmentation de la capacité des batteries et la diminution des coûts au fil du temps, un bus alimenté par biberonnage de pointe en 2040 n'aura pas une plus grande autonomie mais une batterie plus légère et, surtout, moins chère qu'un bus comparable en 2020.

Pour les bus alimentés par biberonnage, le temps d'attente aux terminus est généralement le facteur limitant pour une utilisation efficace. Les véhicules ont besoin de suffisamment de temps pour recharger la batterie. Selon la longueur et le profil du trajet, ce temps de charge nécessaire est de 4 à 10 minutes.

Si le temps passé au terminus est toujours trop court pour recharger la batterie, il faut introduire une course supplémentaire permettant à chaque véhicule de faire une pause plus longue au dernier arrêt. Dans le cas d'un court arrêt uniquement aux heures de pointe, une batterie plus grande peut constituer une solution : 2 à 3 allers-retours peuvent alors être effectués sans recharge intermédiaire. Mais ensuite, il faut disposer de plus de temps aux terminus pour recharger complètement les batteries.

En plus d'une infrastructure de charge dans le dépôt, les bus alimentés par biberonnage ont également besoin de bornes de charge rapide d'une puissance de 450 kW à un ou plusieurs terminus. À ces endroits, le bus établit une connexion avec la borne de recharge, par exemple au moyen de pantographes, et se recharge pendant quelques minutes. En raison de la petite taille des batteries, même une grande flotte de bus alimentée par biberonnage n'impose pas des exigences particulièrement élevées à la capacité de charge du dépôt. En revanche, une puissance d'environ 450 kW aux terminus est considérable. Cela correspond approximativement à la puissance connectée de 5 à 10 maisons familiales. Sur les lignes où les temps d'attente aux terminus sont longs (plus de 10 minutes), la recharge pourrait également s'effectuer à faible puissance.

Une telle puissance peut généralement être fournie aux terminus. Les sites très éloignés pourraient éventuellement poser problème, tout comme la recharge simultanée de nombreux bus alimentés par biberonnage sur des sites centraux. Toutefois, ces situations sont plus susceptibles de se produire dans les gares, où il existe généralement déjà une alimentation électrique très puissante.

Comme pour les bus rechargés au dépôt, de plus en plus de fabricants font leur entrée sur le marché de ces bus. Actuellement, il existe encore différents systèmes de contact proposés qui ne sont pas compatibles entre eux. Toutefois, des efforts de standardisation sont en cours, tant de la part des organismes de standardisation que des fabricants.

3.2.2.3. Bus à charge combinée

Alors que les noms de bus rechargés au dépôt et de bus alimentés par biberonnage sont fréquemment utilisés dans le contexte des bus électriques, la désignation de « bus à charge combinée » n'est pas généralement comprise. Nous avons choisi ce terme pour décrire un bus électrique à batterie qui combine les caractéristiques du bus chargé au dépôt avec celles du bus alimenté par biberonnage statique. Les bus à charge combinée sont en fait des bus rechargés au dépôt dotés d'une grande batterie à énergie optimisée qui est rechargée en plus aux terminus. Cela peut théoriquement se faire via une connexion par fiche effectuée manuellement, comme l'a testé CarPostal en 2019 sur la ligne 342 Sarnen – Alpnach avec un bus standard. Alternativement, la recharge peut être effectuée de manière analogue au biberonnage par l'intermédiaire d'un pantographe.

Ce concept est testé comme alternative aux formes « pures » sur les lignes régionales lorsque les distances journalières totales d'un véhicule ne peuvent être atteintes avec la charge effectuée au dépôt et qu'il n'y a que trop peu de temps de charge disponible aux terminus pour le recours au biberonnage pendant certaines parties de la journée. Toutefois, pour pouvoir recharger pendant l'exploitation, il est nécessaire de disposer d'un temps de charge suffisant en dehors des heures de pointe, par exemple.

Les bus à charge combinée ont besoin d'une infrastructure de recharge puissante au dépôt et généralement au terminus. La puissance connectée au terminus peut être de 450 kW, comme pour les bus alimentés par biberonnage, mais peut aussi être nettement inférieure en fonction de la situation.

3.2.2.4. Bus alimentés par biberonnage dynamique (IMC, trolleybus à batterie)

Les trolleybus modernes disposent d'une batterie de traction dont les spécifications sont similaires à celles de la batterie d'un bus alimentée par biberonnage. Ces batteries sont chargées pendant le trajet via le réseau de caténaires et permettent au bus de fonctionner sans caténaire sur environ 40 à 60 pour cent du trajet¹³. La proportion de caténaires dépend fortement du profil de l'itinéraire et de la longueur résultante d'une section continue sans caténaire, ainsi que de la possibilité de recharge en cas de déviation ou d'exploitation partielle de la ligne. L'utilisation du trolleybus à batterie permet d'économiser les coûts des caténaires et d'obtenir une certaine flexibilité dans l'exploitation. La batterie s'avère également utile pour récupérer l'énergie de freinage. Alors que les trolleybus classiques injectent cette énergie dans le réseau de caténaires et que cette dernière ne peut être exploitée que si un autre bus du réseau peut l'utiliser en même temps, les trolleybus modernes stockent l'énergie dans leur propre batterie et la réutilisent eux-mêmes plus tard.

Les bus alimentés par biberonnage dynamique nécessitent environ deux fois plus d'énergie du réseau électrique aérien que les trolleybus classiques, car ils ont besoin d'énergie pour recharger la batterie en plus de l'énergie de locomotion. Sur les sections de ligne fortement utilisées, cela peut signifier que l'alimentation en courant de la caténaire doit être augmentée.

3.2.3. Bus à piles à combustible

En plus de la pile à combustible, qui produit de l'électricité en oxydant l'hydrogène en eau, les véhicules à pile à combustible possèdent également une batterie, qui est chargée par la pile à combustible pendant le trajet. La batterie est nécessaire car la puissance de la pile à combustible ne pourrait pas couvrir les pics de consommation au démarrage et à l'accélération. Comme la batterie est relativement petite et qu'elle est chargée de courants importants pendant l'accélération et la récupération, elle doit être capable de se recharger rapidement.

À l'avenir, l'autonomie des bus à pile à combustible sera d'environ 400 à 800 km par ravitaillement en hydrogène, de sorte qu'un ravitaillement par jour devrait généralement suffire.

Comme les bus à batterie, les bus à pile à combustible peuvent également convertir environ 70 pour cent de l'énergie de la batterie en mouvement. Les pertes de charge de la batterie sont plutôt inférieures à celles des bus à batterie. En effet, les batteries des bus à pile à combustible ne sont généralement pas chargées à pleine capacité et l'efficacité de la charge pour les derniers 10 à 20 pour cent de la charge de la batterie est plus faible que la plage de charge inférieure en raison de l'équilibre de la charge entre les cellules de la batterie.

¹³ Toutefois, pour être approuvé en tant que trolley, le bus doit parcourir plus de 50 pour cent du trajet sur la caténaire.

En revanche, une importante perte d'énergie a lieu lors de la conversion de l'hydrogène en électricité dans la pile à combustible. Ce processus permet d'atteindre un rendement moyen d'environ 65 pour cent. Cela permet de convertir environ 40 pour cent de l'énergie stockée dans l'hydrogène en mouvement. Toutefois, comme environ 45 pour cent de l'énergie est déjà perdue lors de la production et de la compression de l'hydrogène, seuls 22 pour cent environ de l'électricité initialement produite sont convertis en énergie cinétique dans les véhicules à pile à combustible. Cela signifie que l'efficacité d'un bus à pile à combustible est inférieure à celle d'un bus diesel classique. On s'attend à une amélioration continue pour l'efficacité de la pile à combustible notamment, mais la consommation d'énergie des bus à pile à combustible sera toujours nettement supérieure à celle des bus à batterie.

En Suisse, il n'existe actuellement que quelques stations-service à hydrogène. L'acquisition de bus à pile à combustible nécessiterait donc la construction d'au moins une station-service à hydrogène à proximité des dépôts de bus. L'hydrogène pourrait être acheté ou produit directement sur place. S'il existe une centrale électrique appropriée à cet endroit, le réseau électrique et les coûts et pertes d'énergie correspondants pourraient être contournés. Sinon, il faudrait faire fonctionner le système avec de l'électricité plus chère provenant du réseau.

Des bus à pile à combustible ont été testés dans le cadre de certains projets pilotes. Les coûts de production de l'hydrogène et de la pile à combustible elle-même, notamment en raison de sa durée de vie encore assez courte, ont peut-être été le principal obstacle à une utilisation plus large. Hyundai a annoncé la mise en circulation une série de 1'600 camions à pile à combustible en Suisse d'ici 2025¹⁴. Divers constructeurs de bus en Europe et en Asie ont également annoncé la perspective de la première petite série d'ici 2020.

Outre le module de piles à combustible, un bus à piles à combustible nécessite un réservoir d'hydrogène, un système de refroidissement et un système de compression d'air qui fournit aux piles à combustible l'air nécessaire à la réaction.

De plus amples informations sur les piles à combustible et la production d'hydrogène pour les bus à pile à combustible sont compilées dans les annexes A2 et A3.2.

3.2.4. Bus hybrides et hybrides plug-in

Les bus hybrides peuvent être très différents les uns des autres sur le plan technique. Ils ont tous en commun d'être équipés d'un moteur électrique et d'une batterie de traction. Ils disposent également d'un convertisseur d'énergie qui convertit un carburant chimique en énergie mécanique ou électrique. Ce convertisseur d'énergie peut être un moteur à combustion qui entraîne directement un essieu.

¹⁴ <https://www.news.hyundai.ch/un-ecosysteme-a-base-dhydrogene-unique-en-son-genre-compose-dhydrogene-vert-et-lancement-en-suisse-de-vehicules-utilitaires-electriques-hyundai-fonctionnant-a-lhydrogene-en-2020>

Il peut également s'agir d'un moteur à combustion qui entraîne un générateur pour charger la batterie ou d'une pile à combustible qui produit également de l'électricité pour charger la batterie. Dans la présente étude, cependant, nous considérons les véhicules à pile à combustible séparément et ne les incluons pas explicitement dans la catégorie des bus hybrides. Pour les moteurs à combustion des véhicules hybrides, nous considérons dans cette étude les moteurs à allumage par compression avec biodiesel et les moteurs Otto avec biogaz. Bien sûr, les véhicules hybrides peuvent aussi fonctionner avec des carburants fossiles, mais ils ne remplissent alors pas l'exigence de « renouvelable ». Des informations supplémentaires sur les carburants renouvelables sont compilées à l'annexe A3.

Dans le cas des véhicules hybrides plug-in, la batterie de traction peut être chargée à partir du secteur, alors que dans le cas des véhicules hybrides simples, la batterie est chargée exclusivement pendant le trajet.

Comme les bus électriques, les bus hybrides peuvent récupérer l'énergie de freinage et la stocker dans la batterie. Cette énergie est ensuite à nouveau disponible au moment du démarrage. Cela contribue au fait que les bus hybrides sont nettement plus efficaces en énergie que les bus diesel classiques. Le fait que le moteur à combustion des véhicules hybrides puisse fonctionner à une charge assez constante, proche de l'optimum énergétique, augmente également le rendement. Cela est possible parce que le moteur électrique couvre les charges de pointe et que la puissance qui n'est pas nécessaire à l'entraînement peut être fournie à la batterie.

Comme pour les bus électriques à batterie, la taille de la batterie des véhicules hybrides plug-in, ainsi que la fréquence et la durée de la recharge à partir du réseau, déterminent la part du fonctionnement à partir du réseau.

Les bus hybrides plug-in disponibles aujourd'hui possèdent une batterie relativement petite (50-100 kWh), qui est chargée au dépôt. Cela signifie que seule une très petite partie de la distance parcourue (20-30 km) peut être couverte par l'électricité du réseau. On peut également imaginer des véhicules à recharge rapide qui peuvent être rechargés dans des stations de recharge par biberonnage, ainsi que des véhicules hybrides à recharge au dépôt dotés de plus grosses batteries. Avec ces deux systèmes, une grande partie des kilomètres parcourus peut être obtenue avec l'électricité du secteur. Dans le cas limite, le moteur diesel ne serait en fait qu'une unité de secours, mais il augmenterait le prix du véhicule et les coûts d'entretien, et il coûterait de la charge utile.

Cependant, les véhicules hybrides plug-in développent leur force dans les applications où la capacité de la batterie est souvent suffisante et où le moteur à combustion n'est pas nécessaire, mais où le kilométrage quotidien est plus important. De telles exigences sont plutôt rares pour les bus en service de ligne. Par conséquent, les véhicules hybrides plug-in ne constitueront probablement la solution techniquement optimale que dans quelques cas.

3.2.5. Comparaison des coûts des véhicules

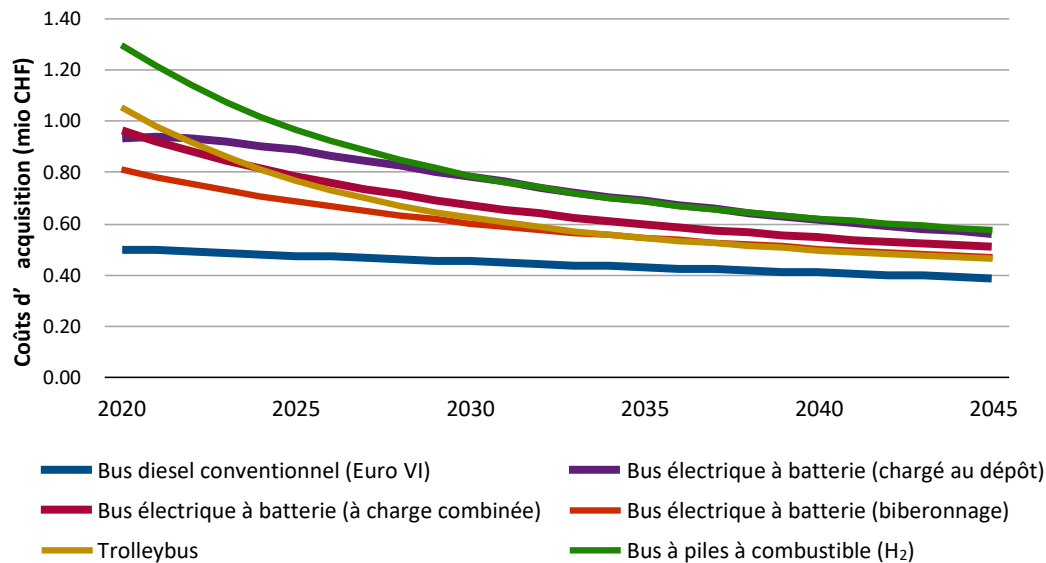
En réalité, les coûts des véhicules équipés des différents systèmes de propulsion varient considérablement. Cela peut s'expliquer par des fabricants, des équipements et/ou des situations de marché différents. L'évolution attendue des coûts dépend fortement de la technologie d'entraînement. Les bus diesel traditionnels sont établis depuis longtemps et largement utilisés, de sorte que le potentiel d'optimisation des coûts est faible. Avec les nouvelles technologies, en revanche, un apprentissage important et des économies d'échelle sont encore possibles, ce qui entraînera des réductions de prix marquées.

Afin de parvenir à des déclarations génériques significatives, les prix des véhicules sont modélisés dans cette étude. Le modèle se base sur les prix des bus diesel de différentes tailles. Pour les autres systèmes de propulsion, des suppléments sont définis en plus de ce prix de base, sur la base des prix du marché actuels. Pour les bus électriques, ces suppléments n'incluent pas encore les batteries et/ou les piles à combustible. Ceux-ci sont pris en compte séparément. Il est ainsi très facile de modifier la taille de la batterie d'un bus dans le modèle.

L'évolution du coût des bus est représentée par l'évolution des coûts de base et des suppléments. Cela tient compte, par exemple, du fait que les coûts spécifiques des batteries (par contenu énergétique) diminueront plus rapidement que les coûts d'un bus diesel ou d'un entraînement électrique. La figure 12 montre l'évolution des coûts d'acquisition des différentes technologies à partir de l'exemple d'un bus articulé. Les paramètres du modèle pour tous les systèmes de propulsion sont énumérés à l'annexe A5.

Figure 12 : coûts d'acquisition des options de propulsion dans le temps

Bus articulé (18 m)



Pour le bus chargé au dépôt (violet), une légère augmentation des coûts peut être observée jusqu'en 2025. Cela est dû au fait que, dans le cas des bus rechargés au dépôt, on suppose que la capacité des batteries augmentera encore d'ici 2025 sur la base des développements prévus. Une capacité visée de la batterie et une masse maximale de la batterie sont spécifiées dans le modèle. Pour les bus équipés de grandes batteries, la masse de la batterie reste le critère limitatif. La capacité visée n'est donc pas encore atteinte. Comme la densité énergétique des batteries s'améliore au fil du temps, la capacité à la masse maximale des batteries devient de plus en plus grande jusqu'à ce qu'elle atteigne finalement la valeur cible. À partir de ce moment, la capacité est maintenue constante et la masse devient légèrement plus petite chaque année.

Graphique INFRAS.

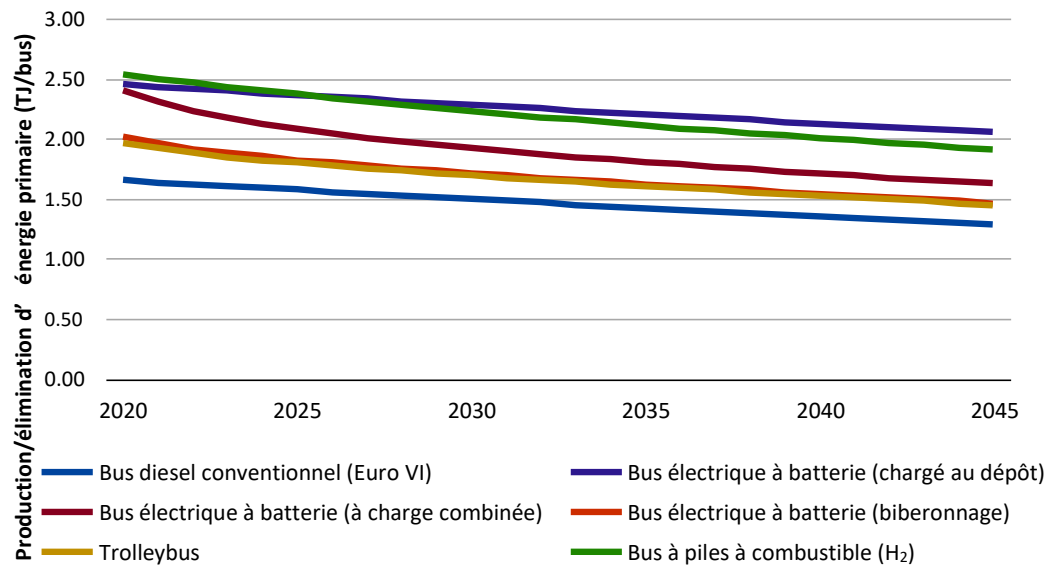
3.2.6. Comparaison des aspects environnementaux de la production de véhicules

Les aspects environnementaux de la production et de l'élimination des véhicules sont calculés sur la base de la masse du bus divisée entre la masse de la structure¹⁵, des organes de transmission et de la batterie. Les facteurs d'émission pour la production et l'élimination des composants proviennent de la base de données ecoinvent (v3.6) et d'analyses spécifiques du bilan écologique, qui obtiennent également des données de base d'ecoinvent. Les sources utilisées sont compilées dans l'annexe A1.1. La figure 13 et la figure 14 montrent les résultats correspondants dans le temps. L'évolution intervient entièrement grâce à la diminution du poids des véhicules et des batteries. Les facteurs d'émission par composant kilométrique sont supposés être constants.

¹⁵ Nous suivons la définition de Notter et al. 2010 pour désigner la part des véhicules indépendante de la technologie d'entraînement. La structure inclut par exemple le châssis, la carrosserie, l'habitacle, etc.

Figure 13 : besoin d'énergie primaire pour la production et l'élimination des options de propulsion au fil du temps

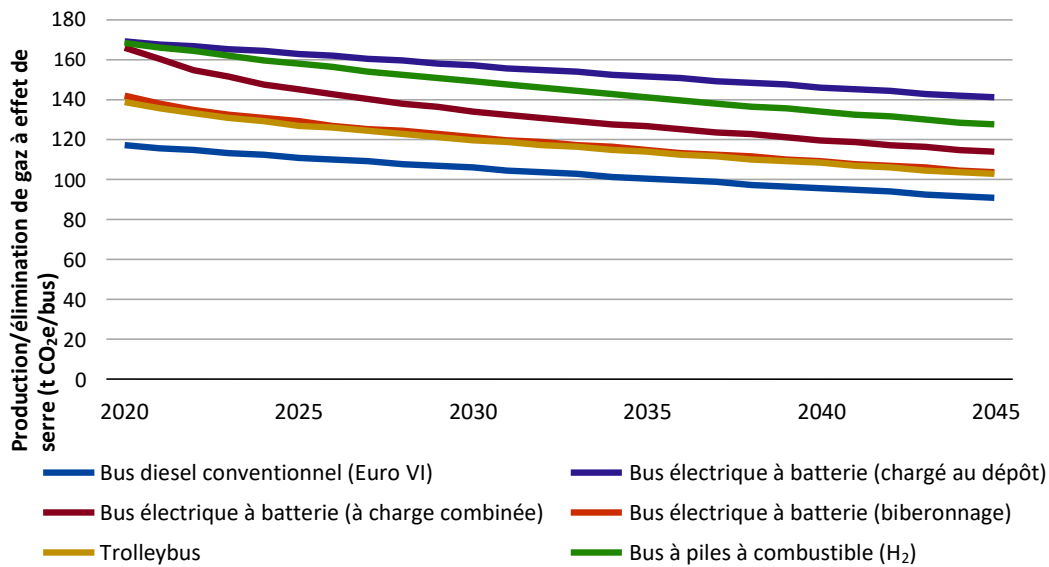
Bus articulé (18 m)



Graphique INFRAS.

Figure 14 : émissions de gaz à effet de serre provenant de la production et de l'élimination des options de propulsion au fil du temps

Bus articulé (18 m)



Graphique INFRAS.

3.3. Potentiels d'application technique en Suisse

Conformément à la décision prise lors de la dernière réunion du groupe de suivi, les options suivantes de propulsion sans carburant fossile seront approfondies :

- Bus électrique avec recharge au dépôt
- Bus électrique avec biberonnage statique le long du trajet
- Bus électrique à charge combinée
- Trolleybus à batterie
- Bus électrique avec pile à combustible classique ou plug-in
- Bus biodiesel conventionnel ou plug-in
- Bus à biogaz conventionnel

Évaluation d'un point de vue technique et opérationnel

Ces options sont examinées ci-dessous en fonction de leur potentiel d'application technique et opérationnel. De notre point de vue, il est important de ne pas évaluer uniquement les aspects purement techniques de l'option d'entraînement, car les options susmentionnées sont toutes techniquement possibles en principe. Selon la situation opérationnelle, elles atteignent toutefois leurs limites (par exemple, en raison d'une autonomie insuffisante ou d'un manque de temps de recharge aux terminus). Nous aimerions également nous pencher sur les premières considérations concernant les coûts d'infrastructure et leur proportionnalité dans les différents domaines d'application.

Les tableaux suivants montrent les possibilités et les limites des différentes options d'un point de vue technique et opérationnel :

Technologie d'entraînement	Possibilités	Limites
Bus électrique avec recharge au dépôt	▪ Utilisable pour le trafic local et régional ▪ Grande flexibilité opérationnelle dans le cadre de l'autonomie possible, car elle est indépendante de l'infrastructure de recharge le long du trajet, par exemple également pour les exploitations de remplacement ou pour les événements spéciaux	▪ Autonomies encore limitées à court/moyen terme. Aujourd'hui, il est possible de parcourir environ 150 km sans recharge (sans trop solliciter la batterie et donc en réduisant sa durée de vie) ; à plus long terme (2030/2035), il faut s'attendre à des autonomies de 350 à 400 km. ▪ Puissances de connexion élevées dans les dépôts. ▪ Utilisation limitée la nuit ou en pleine exploitation pendant 24 heures en raison du temps de recharge.

Remarque sur les bus rechargés au dépôt :

- Les autonomies des bus rechargés au dépôt dépendent aussi, entre autres, de la consommation d'énergie des composants auxiliaires, notamment pour le chauffage/la ventilation/la climatisation. Les autonomies présentées ci-dessus (ou sur la page suivante) sont supposées être conservatrices dans le contexte des améliorations prévisibles de l'efficacité dans ce domaine.

- Dimensionnement des autonomies : la question se pose de savoir s'il faut se baser sur les jours les plus froids ou si le remplacement d'un véhicule peut être envisagé lors de ces jours (ponctuels) très froids. Selon la région, les différentes conditions climatiques doivent être prises en compte (par exemple, les lignes sur le Plateau ou dans les régions de montagne). Comme alternative à l'approche de « remplacement des véhicules », des systèmes de chauffage d'appoint thermique peuvent également être envisagés pour les jours les plus froids.

Technologie d'entraînement	Possibilités	Limites
Bus électrique alimenté par biberonnage statique le long du trajet	▪ Utilisable pour le trafic local et régional. ▪ Convient aux lignes avec des temps d'arrêt suffisants aux terminus pour recharger les batteries (pour les valeurs indicatives des temps de charge, voir ci-dessous) ▪ En principe, la recharge intermédiaire aux stations intermédiaires est également possible (similaire au système TOSA à Genève) ; alors que des capacités de recharge de 450 kW sont généralement supposées pour les stations de recharge aux terminus, ces stations de recharge intermédiaires nécessitent des capacités de recharge plus élevées afin d'éviter de longs temps d'arrêt (peu attrayants pour les clients). Dans ce cas, on parle de recharge rapide (environ 30 secondes de charge avec 600 kW, ce qui fournit de l'énergie pour environ 1 km de conduite).	▪ Autonomie très limitée par charge (20-30 km/charge). ▪ Afin de garantir la stabilité de l'horaire, des temps de rebroussement sont nécessaires en plus des temps de charge pour assurer la qualité de l'exploitation / la sécurité de la connexion. ▪ En l'absence de tels temps de rebroussement, cette technologie de propulsion déclenche des rotations de bus supplémentaires avec les conséquences correspondantes en termes de coûts. ▪ Étant donné que, pour des raisons économiques, les offres sont généralement conçues pour des temps de séjour en terminus les plus courts possibles, les possibilités d'utilisation sont fondamentalement limitées. ▪ En cas de modifications de l'offre (par exemple, prolongement / raccourcissement des lignes ou étoffement de la cadence), le concept ne pourrait plus fonctionner. ▪ Un système de recharge intermédiaire tel que TOSA nécessite des stations de recharge à de nombreux arrêts, ce qui rend la solution très coûteuse.

Le tableau suivant indique les temps de recharge nécessaires pour des lignes de bus standard avec recharge aux terminus, en fonction de la longueur de la ligne et du fait que la recharge n'est possible que d'un côté ou aux deux extrémités de la ligne.

Longueur de la ligne	Valeurs indicatives approximatives pour le temps de charge des bus standard au terminus à une puissance de charge de 450 kW	
	Charge aux deux extrémités de la ligne	Charge à l'extrémité d'une ligne seulement
5 km	2 - 3 minutes	4 - 5 minutes
15 km	4 - 5 minutes	8 - 10 minutes
25 km	6 - 8 minutes	12 - 15 minutes

Estimation du besoin en énergie pour des bus standard : 1,5 à 2 kWh/km ; les temps de charge des bus articulés sont plus longs en raison du besoin en énergie plus élevé.

Technologie d'entraînement	Possibilités	Limites
Bus électrique à charge combinée (recharge au dépôt et recharge <u>statique</u> le long du trajet)	- Utilisable pour le trafic local et régional. - Convient aux lignes dont les temps de rebroussement sont insuffisants pour la recharge pendant les heures de pointe, mais dont les temps de rebroussement sont suffisamment importants pendant les heures creuses pour permettre une recharge continue. - La taille de la batterie est basée sur le besoin en énergie du nombre de rotations aux heures de pointe, pour lesquelles une recharge suffisante aux terminus n'est pas possible.	- Il doit y avoir une situation spéciale correspondante (par exemple, l'essai pilote de la ligne 17 de Bernmobil). - En cas de modifications de l'offre (par exemple, prolongement / raccourcissement des lignes ou étoffement de la cadence), le concept ne pourrait plus fonctionner.

Technologie d'entraînement	Possibilités	Limites
Bus électrique alimenté par biberonnage <u>dynamique</u> le long du trajet (« trolleybus à batterie »)	- Convient au trafic local avec une cadence élevée - Le trolleybus à batterie présente l'avantage (par rapport au trolleybus classique) de pouvoir parcourir de plus longs tronçons sans caténaire, ce qui le rend plus flexible en termes de conception de l'offre, mais aussi en cas de perturbations/interruptions de l'exploitation sur le trajet. - Un avantage du trolleybus à batterie est la possibilité d'utiliser un bus à double articulation (théoriquement également possible avec d'autres formes d'entraînement, mais encore rarement pratiqué)	- Autonomie très limitée par charge (20 - 30 km/charge). - Ne convient pas au trafic régional, ou n'est pas rentable, en raison des longues lignes et des offres moins denses (et donc des infrastructures coûteuses).

Remarques sur le trolleybus à batterie :

Sur la base de l'expérience actuelle avec le Swisstrolley plus, le trolleybus à batteries avec recharge dynamique sur l'itinéraire est (économiquement) intéressant pour les domaines d'application où un réseau de caténaires existe déjà et peut être partagé. Les valeurs indicatives suivantes s'appliquent :

- Pour un fonctionnement fiable, environ 50 à 60 pour cent de la ligne devrait être équipé de caténaires ; selon la situation, des pourcentages inférieurs sont également possibles.
- Si environ 50 pour cent de la longueur du réseau de caténaires nécessaire est déjà disponible, le concept de trolleybus à batterie est économiquement intéressant.
- Le réseau de lignes existant doit être en mesure de fournir la puissance supplémentaire pour les bus supplémentaires ou simplement être renforcé.
- Dans le cadre de la présente étude, seules les situations où le trolleybus à batterie remplace des lignes de bus diesel sont prises en compte, contrairement au remplacement de « vieux » trolleybus par des trolleybus à batterie modernes.

Technologie d'entraînement	Possibilités	Limites
Bus électrique avec pile à combustible classique ou plug-in	▪ Utilisable pour le trafic local et régional. ▪ Possibilité d'obtenir des autonomies comparables à celles d'un bus diesel et donc une flexibilité opérationnelle maximale	▪ Infrastructure de ravitaillement en hydrogène coûteuse et logistiquement complexe ; disponibilité de l'hydrogène par électrolyse (donc renouvelable).
Bus biodiesel conventionnel ou plug-in	▪ Comme pour la pile à combustible	
Bus à biogaz conventionnel	▪ Comme pour la pile à combustible	

Vue d'ensemble

Le tableau suivant présente l'évaluation des différentes options de propulsion d'un point de vue purement technique et également d'un point de vue opérationnel. Comme nous l'avons déjà indiqué dans l'introduction, l'utilisation des sept options de propulsion est possible sur le plan purement technique, tant pour le TRV que pour le trafic local, à l'exception du trolleybus à batterie, qui n'est pas adapté aux lignes régionales en raison de l'investissement élevé dans un réseau de base. Pour les lignes d'agglomération qui quittent les villes dotées d'un réseau de trolleybus, cependant, le trolleybus à batterie est tout à fait envisageable. Si l'on considère le potentiel de déploiement opérationnel, on peut dire ce qui suit :

- Les utilisations possibles du bus électrique avec recharge au dépôt dépendent de l'autonomie journalière requise. Ici, le potentiel d'utilisation à court/moyen terme est encore limité. À long terme, toutefois, un bus chargé au dépôt sera capable de couvrir des distances de 350 à 400 km sans recharge.
- La possibilité d'utilisation du bus électrique alimenté par biberonnage aux terminus dépend des particularités d'une ligne donnée. Comme il n'y a généralement pas assez de temps de séjour en terminus pour la recharge (sans mettre en danger la stabilité de l'horaire de la ligne), les options de déploiement sont limitées ou cette option de propulsion donnera lieu à des rotations supplémentaires de véhicules et donc des coûts supplémentaires de véhicules et, surtout, de personnel de conduite (les coûts de personnel de conduite représentent généralement environ 50-60 pour cent des coûts de la ligne). Un autre facteur limitant pour le bus alimenté par biberonnage statique est le fait qu'en raison de l'autonomie très limitée des petites batteries courantes, il n'est guère possible d'en faire un usage spécial en dehors du fonctionnement régulier. Il en va de même pour les bus à charge combinée en ce qui concerne les conditions spécifiques à respecter pour leur utilisation. Toujours est-il qu'ils sont plus flexibles pour une utilisation en dehors de l'offre de l'horaire grâce à leur batterie plus importante.
- Les bus à pile à combustible ainsi que les bus au biodiesel ou à biogaz sont comparables aux bus diesel en termes d'utilisation opérationnelle.

Figure 15 : évaluation des options de propulsion d'un point de vue technique et opérationnel

	Convient pour une utilisation dans le			
	Trafic local		Trafic régional	
	technique	opérationnel	technique	opérationnel
Bus électrique avec recharge au dépôt	✓	✓ dépend de l'autonomie ; le potentiel à court/moyen terme reste limité	✓	✓ dépend de l'autonomie ; le potentiel à court/moyen terme reste limité
Bus électrique avec biberonnage statique le long du trajet	✓	(✓) Condition préalable : temps de rebroussement suffisants	✓	(✓) Condition préalable : temps de rebroussement suffisants
Bus électrique à charge combinée	✓	(✓) Selon situation spécifique	✓	(✓) Selon situation spécifique
Trolleybus à batterie	✓	✓	✗	✗
Bus électrique avec pile à combustible conventionnelle ou en tant que plug-in	✓	✓	✓	✓
Bus biodiesel conventionnel ou plug-in	✓	✓	✓	✓
Bus à biogaz conventionnel	✓	✓	✓	✓

Légende : ✓ adapté, (✓) partiellement adapté, ✗ non adapté

Graphique INFRAS.

4. Analyse d'impact

4.1. Procédure et critères

Les options de propulsion à énergies non fossiles appropriées définies au chapitre 3.3 sont examinées plus en détail à l'aide d'études de cas représentant différents domaines d'application en Suisse. D'une part, les coûts sont présentés. D'autre part, les potentiels de réduction du CO₂ et d'autres effets écologiques sont analysés. En outre, d'autres critères pour les différentes options de propulsion sont évalués (sur le plan qualitatif).

Prise en compte des coûts

La quantification des effets sur les coûts est effectuée au moyen d'un calcul économique dynamique selon la méthode de la valeur actuelle nette, qui prend en compte tous les flux de coûts sur une période définie (par exemple une génération de véhicules), c'est-à-dire également le remplacement de composants individuels tels que les batteries sur les véhicules. Par rapport à une comptabilité analytique statique avec des coûts annuels, cela permet de mieux représenter les sensibilités relatives à l'évolution des batteries. Le calcul économique prend en compte les aspects suivants, qui diffèrent sensiblement entre les options de propulsion :

- Infrastructure le long des lignes et dans les dépôts/ateliers : coûts d'investissement et de maintenance/d'entretien,
- Véhicules avec batterie : coûts d'acquisition et de maintenance,
- Coûts énergétiques,
- Coûts supplémentaires du personnel de conduite en raison de l'impact opérationnel de l'option correspondante (par exemple, rotations supplémentaires des véhicules en raison des opérations de recharge).

Afin de mettre en évidence les effets du progrès technologique de manière aussi transparente que possible, les coûts des différentes options de propulsion sont comparés pour différents horizons de mise en œuvre (2021, 2025, 2030 et 2035). En particulier pour le bus à batterie chargé au dépôt – en fonction du développement de la gamme –, des potentiels de réduction des coûts d'exploitation significatifs sont à prévoir au cours des 15 à 20 prochaines années (cf. également l'annexe A1).

Pour les coûts individuels, des hypothèses sont faites d'une part sur la base des prix actuels et d'autre part sur l'évolution future des prix.

Les différences entre les éléments de coût considérés sont également placées dans le contexte des coûts complets dans chaque cas : dans quelle mesure les options de propulsion alternatives sont-elles plus coûteuses que l'exploitation conventionnelle d'un bus diesel¹⁶ ?

Les hypothèses les plus importantes sont résumées en annexe. On obtient ainsi les surcoûts / économies des concepts de propulsion à énergies non fossiles par rapport à la technologie de référence (bus diesel Euro 6) pour différents domaines d'application et différents horizons temporels.

Autres remarques importantes sur la prise en compte ou la délimitation des coûts :

- Pour le bus à pile à combustible, aucun coût pour le système de ravitaillement n'est pris en compte car il n'est pas réaliste de penser qu'un système de ravitaillement en hydrogène soit créé pour une ligne.
- Pour les options biodiesel et biogaz ainsi que pour la référence diesel, les coûts de la station-service sont inclus dans le prix du carburant (au prorata).
- Avec le bus alimenté par biberonnage statique, on suppose la présence d'une station de recharge le long de l'itinéraire. La batterie est dimensionnée en conséquence, de manière à couvrir les besoins en énergie d'une course. La question de la redondance (panne de la station de recharge) n'est pas prise en compte au niveau de la ligne individuelle.
- Pour les bus rechargés au dépôt équipés de batteries lourdes et volumineuses, on suppose que le poids de la batterie n'a qu'une influence insignifiante sur la consommation moyenne d'énergie. Des études montrent que le poids des véhicules électriques ne joue pas un rôle déterminant dans leur autonomie¹⁷.

Impact écologique

La quantification des impacts écologiques est réalisée à l'aide d'une approche simplifiée du bilan écologique et du cycle de vie. Outre l'exploitation des véhicules, le calcul du besoin en énergie et de l'impact sur le climat tient également compte de la production des véhicules et des batteries, y compris leur élimination, ainsi que de l'approvisionnement en énergie (p. ex. la production d'électricité), puisque l'électrification des véhicules transfère une part importante de l'impact environnemental total vers ces phases. Pour les émissions de polluants atmosphériques pertinentes au niveau local, cependant, seule la phase d'exploitation est prise en compte.

¹⁶ À cette fin, les hypothèses suivantes sont faites concernant la part des éléments de coût considérés dans les coûts totaux d'une ligne : ligne de bus articulé 35 pour cent, ligne de bus standard et bus midi 30 pour cent, ligne de minibus 25 pour cent.

¹⁷ Source : <https://www.elektroauto-news.net/2017/gewicht-keine-entscheidende-rolle-reichweite/>

Les résultats spécifiques (par véhicule-km) sont calculés pour les indicateurs suivants tandis que les potentiels de réduction spécifiques par rapport à la technologie de référence (bus diesel Euro 6) sont quantifiés :

- Emissions de gaz à effet de serre (*cradle-to-grave*)
- Consommation d'énergie primaire (*cradle-to-grave*)
- Émissions locales de polluants atmosphériques : particules (y compris l'abrasion et la remise en suspension des pneus, des freins, des caténaires) et oxydes d'azote (phase d'exploitation uniquement).
- Émissions de bruits (quantification approximative au niveau des véhicules)

Les publications scientifiques (p. ex. Althaus et al. 2009¹⁸, Althaus 2012¹⁹, Cox 2018²⁰, Miotti et al. 2015²¹), la base de données ecoinvent version 3.6, le manuel HBEFA 4.1 ainsi que le modèle SonRoad constituent la base principale.

Ainsi, il est possible d'estimer les potentiels de réduction des concepts de propulsion non fossile dans les domaines des émissions de gaz à effet de serre, des besoins d'énergie primaire, des émissions de polluants atmosphériques et des émissions de bruit par rapport à la technologie de référence (bus diesel Euro 6). Les impacts environnementaux spécifiques sont comparés par analogie aux considérations de coûts pour les différentes années de référence (2021, 2025, 2030 et 2035).

Autres critères

En outre, les aspects qualitatifs suivants sont examinés pour les différents systèmes de propulsion :

- Aspects d'exploitation et liés à la planification de l'offre :
 - Flexibilité de l'ensemble de la flotte de véhicules (p. ex. bus de remplacement, exploitation de remplacement pendant les chantiers, trajets supplémentaires, services de navette pour les événements),
 - Interventions en cas d'incidents techniques (p. ex. retards, blocages de lignes),
 - Déploiement du personnel/planification du service,
 - Flexibilité pour la structuration et le développement de l'offre,
 - Exploitation sur 24 heures,
 - Possibilités d'utilisation des bus à double articulation.
- Espace urbain/esthétique (p. ex. les nuisances dues aux infrastructures de recharge, comme les lignes de trolleybus ou les stations de recharge dans les espaces urbains ou les centres-villes sensibles du point de vue de la conservation des monuments).
- Avantages pour le client (p. ex., le confort de conduite).

¹⁸ Althaus H.J., De Haan P. and Scholz R.W. 2009. Traffic noise in LCA Part 2: Analysis of existing methods and proposition of a new framework for consistent, context-sensitive LCI modeling of road transport noise emission. *International Journal of Life Cycle Assessment* 14(7): 676-686.

¹⁹ Althaus H.J. (2012) Vehicle and context specific inclusion of road transport noise impacts in Life Cycle Assessment. Empa Working Paper. DOI: 10.13140/RG.2.2.29925.60643

²⁰ Cox, Brian (2018). Mobility and the Energy Transition: A Life Cycle Assessment of Swiss Passenger Transport Technologies including Developments until 2050., ETH Zurich, Vol. 25081

Cox, B., Mutel, C., Bauer, C., Mendoza Beltran, A. and van Vuuren, D. (2018). The uncertain environmental footprint of current and future battery electric vehicles, *Environmental Science & Technology*, doi:10.1021/acs.est.8b00261

²¹ Miotti, M., Hofer, J., Bauer, C. (2015) Integrated environmental and economic assessment of current and future fuel cell vehicles. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, doi:10.1007/s11367-015-0986-4

- Exigences relatives à l'alimentation électrique ou aux puissances connectées dans les garages à bus. Les bus rechargés au dépôt et leurs grandes batteries imposent notamment des exigences élevées en termes de puissances connectées et de gestion de la charge dans les dépôts pour les grandes flottes de bus.
- Aspects de la mise en œuvre et procédures de planification.

4.2. Études de cas

4.2.1. Vue d'ensemble

L'analyse se fonde sur neuf études de cas. Ces derniers diffèrent selon la zone d'exploitation (ligne locale/agglomération ainsi que ligne régionale Plateau et région de montagne) et la taille des bus (bus articulé, bus standard, bus midi et minibus). En outre, on distingue deux cadences différentes, à savoir les lignes avec une cadence constante tout au long de la journée (cadence intégrale) et les lignes avec une cadence de base et des cadences densifiées aux heures de pointe du lundi au vendredi (cadence densifiée aux HDP). Cette distinction a pour but de montrer l'influence que la cadence peut avoir sur l'adéquation des différents concepts de charge. Par exemple, sur une ligne avec des cadences densifiées aux heures de pointe, le bus chargé au dépôt peut également être utilisé même avec une autonomie encore limitée sans avoir besoin de véhicules supplémentaires. En effet, les véhicules d'appoint aux heures de pointe peuvent être utilisés pour soulager les courses de base afin que ces véhicules puissent se recharger.

Figure 16 : études de cas examinées

Type de ligne	Abréviation	Taille du bus	Abréviation	Cadence	Abréviation	Désignation
Ligne locale/agglomération	TL	Bus articulé	BA	intégrale	Int	TL_BA_Int
		Bus standard	BS	densifiée aux HDP	D-HDP	TL_BS_D-HDP
Ligne régionale Plateau	TR-P	Bus articulé	BA	intégrale	Int	TR-P_BA_Int
				densifiée aux HDP	D-HDP	TR-P_BA_D-HDP
		Bus standard	BS	intégrale	Int	TR-P_BS_Int
				densifiée aux HDP	D-HDP	TR-P_BS_D-HDP
Ligne régionale région de montagne	TR-M	Bus midi	MDB	intégrale	Int	TR-P_MDB_Int
		Bus standard	BS	intégrale	Int	TR-M_BS_Int
		Minibus	MNB	intégrale	Int	TR-M_MNB_Int

Graphique INFRAS.

La figure 17 ci-dessous présente les options de propulsion à énergies non fossiles analysées sur le plan quantitatif en fonction des différentes études de cas. L'option de propulsion par trolleybus à batterie n'est étudiée que pour les lignes locales/d'agglomération à forte demande ou les lignes à offre dense. En raison de l'investissement kilométrique nécessaire, le trolleybus à batterie n'est pas adapté aux lignes régionales d'un point de vue économique (offres moins denses, longues lignes).

Le bus à charge combinée n'est examiné que dans le cadre d'une seule étude de cas, car des conditions très spécifiques doivent prévaloir (fenêtres de temps avec des temps de rebroussement trop courts pour la recharge [par exemple pendant les heures de pointe] et fenêtres de temps avec des temps de rebroussement suffisants pour la recharge [par exemple pendant les heures creuses]). L'étude de cas correspondante (TR-P_BA_D-HDP) est définie comme suit.

Pour l'étude de cas avec un minibus, l'option d'alimentation par biberonnage n'est pas considérée de manière statique, car les minibus sont peu adaptés à l'infrastructure de charge correspondante sur le véhicule.

Les véhicules hybrides plug-in (par exemple pour le biodiesel, le biogaz ou les piles à combustible) ne sont pas explicitement calculés comme une option ; les déclarations sont faites par analogie. Les hybrides (plug-in) basés sur le diesel ne constituent pas une option car ils ne sont pas exempts de fossiles dans cette combinaison.

Figure 17 : aperçu des options de propulsion calculées dans l'analyse d'impact

		Lignes locales / agglo.		Ligne régionale Plateau						Ligne régionale	
		Bus standard		Bus		Bus standard		Bus midi	Bus standard		Minibus
		TL_BA_Int	TL_BS_D-HDP	TR-P_BA_Int	TR-P_BA_D-HDP	TR-P_BS_Int	TR-P_BS_D-HDP	TR_MNB_Int	TR-M_BS_Int	TR-	
Option d'entraînement	Forme courte										
Trolleybus à batterie	<i>E-trolley</i>	X	X	O	O	O	O	O	O	O	O
Bus électrique à biberonnage statique	<i>E-statique</i>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	O
Bus électrique avec recharge au dépôt	<i>E-dépôt</i>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Bus électrique à charge combinée	<i>E-combi</i>	O	O	O	X	O	O	O	O	O	O
Bus électrique avec pile à combustible	<i>E-pile</i>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Bus à biodiesel	<i>Biodiesel</i>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Bus à biogaz	<i>Biogaz</i>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Bus diesel Euro 6 (=référence)	<i>Diesel = REF</i>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

X = calculé

O = non calculé

Graphique INFRAS.

4.2.2. Définition des études de cas du trafic local

Indicateurs de ligne

Tableau 4 : indicateurs généraux pour les études de cas dans le trafic local

	TL_BA_Int	TL_BS_D-HDP
Groupe de lignes	Ligne locale/agglomération	Ligne locale/agglomération
Taille du bus	Bus articulé	Bus standard
Cadence	intégrale	densifiée aux HDP
Offre/intervalle lun-ven heures de pointe	10 min	7,5 min
lun-ven heures creuses	10 min	15 min
sam/dim	10/20 min	15 min
Horaires d'exploitation	06 – 24h	06 – 20h
Longueur de la ligne	12 km	6 km
Temps de parcours (aller simple)	35 min	18 min
Ø Vitesse	21 km/h	20 km/h
Temps de rotation	80 min	45 min
Temps d'arrêt terminus A	5 min	4,5 min
Temps d'arrêt terminus B	5 min	4,5 min
Nb. véhicules offre de base	8 bus	3 bus
Nb. véhicules densification HDP	--	3 bus
Utilisation maximale du véhicule	280 - 350 km/j	300 km/j
Kilométrage annuel	700'000 km/a	400'000 km/a

Tableau INFRAS.

Spécification des options de bus à batterie

Dans ce qui suit, les bus à batterie (trolleybus à batterie, bus alimentés par biberonnage statique et bus rechargés au dépôt) sont spécifiés, à savoir les tailles de batterie, les autonomies, les temps de charge et les hypothèses sur les coûts d'exploitation supplémentaires en raison des processus de charge (pour le biberonnage statique) ou des autonomies insuffisantes (pour les bus rechargés au dépôt).

Dimensionnement de la taille de la batterie pour le biberonnage :

Tableau 5 : spécification des bus à batterie pour le trafic local

		TL_BA_Int	TL_BS_D-HDP
	Groupe de lignes	Ligne locale/agglo.	Ligne locale/agglo.
	Taille du bus	Bus articulé	Bus standard
	Cadence	intégrale	densifiée aux HDP
Option de propulsion : trolleybus à batterie			
Taille de la batterie		75 kWh	75 kWh
Puissance de charge au cours du trajet en cas d'IMC		120 kW	120 kW
Alimentation en énergie par km de caténaire au cours du trajet		6 kWh/km	6 kWh/km
Valeur cible de la proportion de caténaires dans la longueur de la ligne		60% / 7,2 km	60% / 3,6 km
Proportion existante de caténaires sur le tronçon		30% / 3,6 km	30% / 1,8 km
Proportion de nouvelles caténaires sur le tronçon		30% / 3,6 km	30% / 1,8 km
Option de propulsion : bus alimentés par biberonnage statique			
Taille de la batterie (donc 1 seule station de charge)		100 kWh	75 kWh
Autonomie max. par charge		25 km	25 km
Besoin en énergie d'un trajet simple		24 kWh	9 kWh
Besoin en énergie par rotation		48 kWh	18 kWh
Temps de charge des stations de chargement des deux côtés (450 kW)		4 min	2 min
Temps de charge des stations de chargement d'un seul côté (450 kW)		8 min	4 min
Nombre de stations de chargement		1	1
Rotations supplémentaires		+ 1 rotation	Aucune
Véhicules supplémentaires		+ 1 bus	Aucun
Option de propulsion : bus rechargés au dépôt			
Taille de la batterie		4 tonnes*	3,5 tonnes
Capacité des batteries en 2021 (100%)		560 kWh	480 kWh
Autonomie par charge à l'horizon temporel : (60% utilisable)	2021	550 kWh/130 km	500 kWh/160 km
	2025	800 kWh/200 km	700 kWh/240 km
	2030	1'000 kWh/260 km	880 kWh/310 km
	2035	1'150 kWh/310 km	1'000 kWh/360 km
Véhicules supplémentaires dus aux processus de recharge à l'horizon temporel :	2021	+ 4 bus	Aucun
	2025	+ 4 bus	Aucun
	2030	+ 2 bus	Aucun
	2035	Aucun	Aucun
Distance du dépôt – exploitation de la ligne (pour le calcul des trajets à vide supplémentaires)		3 km	3 km

* Un bus articulé chargé au dépôt avec une masse de batterie de 4 t et un poids total autorisé de 29 t a encore une capacité d'environ 8 t pour les passagers ; avec un poids moyen par passager de 75 kg, cela correspond à une charge de plus de 100 passagers ou à un taux d'utilisation de plus de 4 personnes/m² d'espace debout (= charge maximale d'exploitation des bus).

Tableau INFRAS.

4.2.3. Définition des études de cas du trafic régional du Plateau

Indicateurs de ligne

Tableau 6 : indicateurs généraux pour les études de cas dans le trafic régional du Plateau

	LR-P_BA_Int	LR-P_BA_D-HDP	LR-P_BS_Int	LR-P_BS_D-HDP	LR-P_MDB_Int
Groupe de lignes	Ligne régionale Plateau	Ligne régionale Plateau	Ligne régionale Plateau	Ligne régionale Plateau	Ligne régionale Plateau
Taille du bus	Bus articulé	Bus articulé	Bus standard	Bus standard	Bus midi
Cadence	intégrale	densifiée aux HDP	intégrale	densifiée aux HDP	intégrale
Offre/intervalle lun-ven heures de pointe	15 min	15 min	30 min	30 min	30 min
lun-ven heures creuses	15 min	30 min	30 min	60 min	30 min
sam/dim	15/30 min	30 min	30 min	60 min	30 min
Horaires d'exploitation	06 – 24h	06 – 24h	06 – 24h	06 – 24h	06 – 20h
Longueur de la ligne	10 km	10 km	18 km	15 km	14 km
Temps de parcours (aller simple)	25 min	20 min	35 min	25 min	26 min
Ø Vitesse	24 km/h	30 km/h	31 km/h	36 km/h	32 km/h
Temps de rotation	60 min	45 min	90 min	60 min	60 min
Temps d'arrêt terminus A	5 min	2,5/10 min ²²	10 min	5 min	4 min
Temps d'arrêt terminus B	5 min	2,5/10 min	10 min	5 min	4 min
Nb. véhicules offre de base	4 bus	2 bus	3 bus	1 bus	2 bus
Nb. véhicules densification HDP	--	1 bus	--	1 bus	--
Utilisation maximale du véhicule	400 km/j	400 km/j	350 km/j	500 km/j	250 km
Kilométrage annuel	450'000 km/a	320'000 km/a	400'000 km/a	270'000 km/a	280'000 km/a

Tableau INFRAS.

Spécification des options de bus à batterie

Dans ce qui suit, les bus à batterie (bus alimentés par biberonnage statique, bus rechargés au dépôt et bus à charge combinée) sont spécifiés, à savoir les tailles de batterie, les autonomies, les temps de charge et les hypothèses sur les coûts d'exploitation supplémentaires en raison des processus de charge (pour le biberonnage statique) ou des autonomies insuffisantes (pour les bus rechargés au dépôt).

²² Aux heures de pointe, avec des intervalles de 15 minutes et l'utilisation de 3 bus, il n'y a que des temps de rebroussement minimes de 2 à 3 minutes aux deux extrémités de la ligne. Pendant les heures creuses, lorsque l'horaire est réduit à des intervalles de 30 minutes avec 2 bus, il en résulte des temps de rebroussement généreux de 10 minutes à chaque extrémité de la ligne et donc également un temps de chargement suffisant au terminus.

Tableau 7 : spécification des bus à batterie pour le trafic régional du Plateau : bus articulés

		LR-P_BA_Int	LR-P_BA_D-HDP
	Groupe de lignes	Ligne régionale Plateau	Ligne régionale Plateau
	Taille du bus	Bus articulé	Bus articulé
	Cadence	intégrale	densifiée aux HDP
Option de propulsion : bus alimentés par biberonnage statique			
Taille de la batterie (donc 1 seule station de charge)		100 kWh	100 kWh
Autonomie max. par charge		25 km	25 km
Besoin en énergie d'un trajet simple		20 kWh	20 kWh
Besoin en énergie par rotation		40 kWh	40 kWh
Temps de charge des stations de chargement des deux côtés (450 kW)		3 min	3 min
Temps de charge des stations de chargement d'un seul côté (450 kW)		6 min	6 min
Nombre de stations de chargement		1	1
Rotations supplémentaires		+ 1 rotation	+ 1 rotation
Véhicules supplémentaires		1 bus	1 bus
Option de propulsion : bus chargé au dépôt			
Taille de la batterie		4 tonnes	4 tonnes
Capacité des batteries en 2021 (100%)		560 kWh	560 kWh
Autonomie par charge à l'horizon temporel : (60% utilisable)	2021	130 km	130 km
	2025	200 km	200 km
	2030	260 km	260 km
	2035	310 km	310 km
Véhicules supplémentaires dus aux processus de recharge à l'horizon temporel :	2021	+ 2 bus	+ 1 bus
	2025	+ 2 bus	+ 1 bus
	2030	+ 1 bus	+ 1 bus
	2035	+ 1 bus	+ 1 bus
Distance du dépôt – exploitation de la ligne (pour le calcul des trajets à vide supplémentaires)		3 km	3 km
Option de propulsion : bus à charge combinée			
Taille de la batterie			3 tonnes
Capacité des batteries en 2021 (100%)		Non examiné	420 kWh
Autonomie par charge (60% utilisable)		Non examiné	100 km
Nombre de stations de chargement (sur la ligne)		Non examiné	1
Véhicules supplémentaires en raison des opérations de chargement			Aucun

Tableau INFRAS.

Tableau 8 : spécification des bus à batterie pour le trafic régional du Plateau : bus standard et bus midi

	Groupe de lignes	Taille du bus	Cadence	LR-P_BS_Int	LR-P_BS_D-HDP	LR-P_MDB_Int
				Ligne régionale Plateau	Ligne régionale Plateau	Ligne régionale Plateau
				Bus standard	Bus standard	Bus midi
				intégrale	densifiée aux HDP	intégrale
Option de propulsion : bus alimentés par biberonnage statique						
Taille de la batterie				120 kWh	100 kWh	65 kWh
Autonomie max. par charge				40 km	32 km	28 km
Besoin en énergie d'un trajet simple				27 kWh	22 kWh	15 kWh
Besoin en énergie par rotation				54 kWh	44 kWh	30 kWh
Temps de charge des stations de chargement des deux côtés				4 min	3 min	3 min
Temps de charge des stations de chargement d'un seul côté				8 min	6 min	6 min
Nombre de stations de chargement				2	1	1
Rotations supplémentaires				Aucun	+ 1 rotation	+ 1 rotation
Véhicules supplémentaires				Aucun	1 bus	1 bus
Option de propulsion : bus chargé au dépôt						
Taille de la batterie				3,5 tonnes	3,5 tonnes	2,5 tonnes
Capacité des batteries en 2021 (100%)				560 kWh	480 kWh	350 kWh
Autonomie par charge à l'horizon temporel : (60% utilisable)	2021			160 km	160 km	150 km
	2025			240 km	240 km	230 km
	2030			310 km	310 km	300 km
	2035			360 km	360 km	350 km
Véhicules supplémentaires dus aux processus de recharge à l'horizon temporel :	2021			+ 2 bus	+ 1 bus	+ 1 bus
	2025			+ 2 bus	+ 1 bus	Aucun
	2030			Aucun	+ 1 bus	Aucun
	2035			Aucun	+ 1 bus	Aucun
Distance du dépôt – exploitation de la ligne (pour le calcul des trajets à vide supplémentaires)				3 km	3 km	3 km

Tableau INFRAS.

4.2.4. Définition des études de cas du trafic régional – région de montagne

Indicateurs de ligne

Tableau 9 : indicateurs généraux pour les études de cas dans le trafic régional en région de montagne

	LR-M_BS_Int	LR-M_MNB_Int
Groupe de lignes	Ligne de montagne	Ligne de montagne
Taille du bus	Bus standard	Minibus
Cadence	intégrale	intégrale
Offre/intervalle lun-ven heures de pointe	30 min	30 min
lun-ven heures creuses	30 min	30 min
sam/dim	30 min	60 min
Horaires d'exploitation	06 – 20h	07 – 19h
Longueur de la ligne	25 km	12 km
Temps de parcours (aller simple)	55 min	27 min
Ø Vitesse	27 km/h	27 km/h
Temps de rotation	120 min	60 min
Temps d'arrêt terminus A	5 min	3 min
Temps d'arrêt terminus B	5 min	3 min
Nb. véhicules offre de base	4 bus	2 bus
Nb. véhicules densification HDP	--	
Utilisation maximale du véhicule	300 km/j	300 km/j
Kilométrage annuel	500'000 km/a	200'000 km/a

Tableau INFRAS.

Spécification des options de bus à batterie

Dans ce qui suit, les bus à batterie (bus alimentés par biberonnage statique et bus rechargés au dépôt) sont spécifiés, à savoir les tailles de batterie, les autonomies, les temps de charge et les hypothèses sur les coûts d'exploitation supplémentaires en raison des processus de charge (pour le biberonnage statique) ou des autonomies insuffisantes (pour les bus rechargés au dépôt).

Le besoin d'énergie spécifique par km et l'autonomie des bus rechargés au dépôt sur les lignes de montagne ont été supposés être les mêmes que pour les lignes du Plateau. **Ainsi, un système de chauffage supplémentaire au biocarburant est prévu pour couvrir les périodes froides de l'hiver.**

Tableau 10 : spécification des bus à batterie pour le trafic régional d'une région de montagne

		LR-M_BS_Int	LR-M_MNB_Int
Groupe de lignes		Ligne locale/agglo.	Ligne locale/agglo.
Taille du bus		Bus articulé	Bus standard
Cadence		intégrale	densifiée aux HDP
Option de propulsion : bus alimentés par biberonnage statique			
Taille de la batterie		200 kWh	Non envisageable
Autonomie max. par charge		65 km	
Besoin en énergie d'un trajet simple		37 kWh	Non envisageable
Besoin en énergie par rotation		74 kWh	
Temps de charge des stations de chargement des deux côtés		5 min	Non envisageable
Temps de charge des stations de chargement d'un seul côté		10 min	
Nombre de stations de chargement		1	
Rotations supplémentaires		+ 1 rotation	
Véhicules supplémentaires		1 bus	
Option de propulsion : bus chargé au dépôt			
Taille de la batterie		3,5 tonnes	1,5 tonne
Capacité des batteries en 2021 (100%)		480 kWh	210 kWh
Autonomie par charge à l'horizon temporel : (60% utilisable)	2021	160 km	130 km
	2025	240 km	190 km
	2030	310 km	250 km
	2035	360 km	290 km
Véhicules supplémentaires dus aux processus de recharge à l'horizon temporel :	2021	+ 2 bus	1 bus
	2025	+ 2 bus	1 bus
	2030	Aucun	1 bus
	2035	Aucun	Aucun
Distance du dépôt – exploitation de la ligne (pour le calcul des trajets à vide supplémentaires)		3 km	3 km

Tableau INFRAS.

4.3. Coûts

Remarque préliminaire sur les coûts : les blocs de coûts analysés en détail sont ceux qui diffèrent de manière significative entre les options examinées (investissements dans les véhicules, entretien des véhicules, coûts énergétiques, investissements et entretien des infrastructures de recharge et, éventuellement, coûts supplémentaires pour le personnel de conduite en raison des processus de recharge). Les coûts supplémentaires absolus ainsi calculés sont placés dans le contexte des coûts complets (y compris le personnel de conduite, les coûts administratifs et autres frais généraux) d'un bus ou d'une ligne. Les déclarations sur les surcoûts relatifs qui en résultent se rapportent donc toujours aux coûts complets.

4.3.1. Résultats pour le trafic local

Principales conclusions

La figure 18 présente les surcoûts des différentes options de propulsion sans fossile par rapport à la technologie de référence qu'est le bus diesel Euro 6 (sur la base des coûts complets). Les détails sur les surcoûts absolus différenciés selon les différents blocs de coûts ainsi que les hypothèses se trouvent dans l'annexe.

On peut dire ce qui suit au sujet de l'impact sur les coûts :

- À court terme, les bus à batterie avec biberonnage statique et recharge au dépôt sont plus chers que les bus diesel. À plus long terme, cependant, les bus à batterie rattrapent fortement leur retard. Dans des conditions d'exploitation favorables (pas de véhicules ou de coûts de personnel de conduite supplémentaires), les surcoûts par rapport aux bus diesel ne dépasseront pas 10 pour cent à l'horizon 2030/2035 aux prix de l'énergie supposés (diesel 1 CHF/l, électricité 0,15 CHF/kWh).
- Le résultat du trolleybus à batterie dépend fortement de la proportion de nouvelles caténaires à construire. Dans la figure 18, on suppose que 60 pour cent de la longueur de la ligne doit être équipé d'une caténaire pour un fonctionnement fiable et que la moitié de cette longueur est déjà disponible et peut être partagée. Cela signifie que le tronçon de ligne à électrifier représente environ 30 pour cent de la ligne entière. Si seulement 15 pour cent de la longueur totale du trajet devait être nouvellement électrifié, les surcoûts du trolleybus à batterie seraient d'un ordre de grandeur similaire à ceux du bus alimenté par biberonnage statique ou du bus chargé au dépôt, à savoir environ 15 pour cent à court terme dans des conditions d'exploitation idéales et environ 10 pour cent à long terme.

- Le bus alimenté par biberonnage statique est intéressant s'il ne nécessite qu'une seule station de recharge sur la ligne et que les temps de rebroussement en extrémité de ligne sont suffisants pour recharger sans mettre en danger la stabilité de l'horaire. Dans ces conditions (exemple à droite dans la figure 18), il entraîne déjà à court terme des surcoûts de 10 à 15 pour cent par rapport au bus diesel.
- Si l'horaire du bus alimenté par biberonnage statique exige une rotation supplémentaire du véhicule afin qu'il y ait suffisamment de temps de recharge à l'extrémité de ligne (exemple à gauche dans la figure 18), cette option (avec un horaire inchangé) reste onéreuse à long terme avec des surcoûts de l'ordre de 20 pour cent par rapport au bus diesel ; l'évolution positive des coûts des bus à batterie est partiellement compensée par les surcoûts liés à l'exploitation, à l'inverse des bus rechargés au dépôt. En raison d'une autonomie encore insuffisante, cette dernière option est aussi comparativement plus onéreuse à court terme (selon le nombre de véhicules supplémentaires, entre +20 et 30 pour cent). Cependant, le bus chargé au dépôt et son autonomie bénéficient grandement du développement des batteries, de sorte que les surcoûts par rapport au bus diesel tombent en dessous de +10 pour cent à long terme, si les utilisations quotidiennes d'aujourd'hui peuvent être couvertes sans recharge et qu'aucun remplacement de véhicule n'est nécessaire (exemple de gauche dans la figure 18). L'autonomie passera d'environ 150 km aujourd'hui à 300-350 km par charge à l'horizon 2030/2035.
- Cependant, le bus chargé au dépôt est également intéressant pour des utilisations sur des lignes avec des offres de densification pendant les heures de pointe. En effet, les véhicules d'appoint aux heures de pointe peuvent être utilisés pour soulager les courses de base afin que ces véhicules puissent se recharger. Toutefois, à court terme, cette option entraîne également des surcoûts comparativement élevés, de l'ordre de 20 pour cent, en raison des batteries de grande taille, plus onéreuses, par rapport à un bus alimenté par biberonnage (exemple à droite dans la figure 18). À plus long terme, toutefois, ces surcoûts seront réduits grâce à l'évolution des batteries, de sorte que cette option sera moins onéreuse qu'un bus alimenté par biberonnage statique avec circulation de véhicules supplémentaires.
- Le bus à pile à combustible représente l'option la plus onéreuse, même si l'infrastructure de ravitaillement de H₂, comme le montrent les résultats de la figure 18, n'est pas prise en compte. Les surcoûts par rapport au bus diesel sont d'environ 40 pour cent à court terme, tandis que la différence tombe à environ 30 pour cent à plus long terme.
- Si les conditions cadres spécifiques d'une ligne sont données, le bus à charge combinée (bus chargé au dépôt avec possibilité de recharge sur la ligne) peut également être intéressant pour le trafic local en termes de coûts (cf. explications sur les lignes régionales au chapitre 4.3.2).

²³ Prix présumés de l'énergie : biodiesel 2 CHF/l, biogaz 2,20 CHF/kg

- À court terme, l'option la moins onéreuse ou nettement moins onéreuse que les bus à batterie, généralement encore chers, serait celle des biocarburants (biodiesel ou biogaz²³), avec un surcoût d'environ 10 pour cent par rapport à un bus diesel. À plus long terme, toutefois, ils perdront cet avantage en termes de coût par rapport aux bus à batterie, qui, à l'horizon 2030/2035, dans des conditions d'exploitation optimales, auront le potentiel d'être encore moins onéreux que les bus alimentés par des biocarburants. En outre, la question fondamentale de la disponibilité se pose pour les biocarburants (voir également l'annexe A3).

Conclusion

Du point de vue des coûts, il faut faire la distinction entre la situation à court terme et les évolutions prévisibles. À court terme, les bus alimentés par batterie sont comparativement onéreux et leur potentiel d'utilisation pratique est limité (notamment pour le bus chargé au dépôt dont l'autonomie par charge est encore insuffisante). À plus long terme, toutefois, les bus à batterie pourraient être les options les plus rentables, en fonction des conditions d'utilisation et des hypothèses relatives à la durée de vie des batteries. La suppression du remboursement de l'impôt sur les huiles minérales, qui favorise actuellement les bus diesel, aurait également un effet positif en faveur des bus à batterie.

À court terme, les biocarburants sont généralement les options les moins chères. Il faut toutefois se demander s'il est judicieux de passer à ces options durant la période de transition nécessaire aux bus à batterie pour déployer tout leur potentiel. Pour cela, il faudrait mettre en place des stations-service de biodiesel et de biogaz, adapter les ateliers d'entretien et former le personnel pour cette technologie de transition. Un autre argument contre les biocarburants est leur disponibilité limitée, notamment pour les biocarburants produits en Suisse. Le biodiesel CH issu d'huiles de cuisson usagées, par exemple, ne suffira probablement pas pour tous les bus des transports publics en Suisse et ne pourrait donc être une option que sur certaines lignes. Il faut donc aussi se demander si, dans une vision globale allant au-delà de l'utilisation dans les transports publics, il faut privilégier l'utilisation de ces biocarburants dans les domaines où les alternatives pour réduire les émissions de gaz à effet de serre font encore défaut, à savoir les poids lourds effectuant de longues distances, les navires de haute mer ou le trafic aérien.

Figure 18 : surcoûts dans le trafic local/d'agglomération par rapport au bus diesel Euro 6 (analyse des coûts complets)

Hypothèses de base (avec remboursement de l'impôt sur les huiles minérales pour ETC)

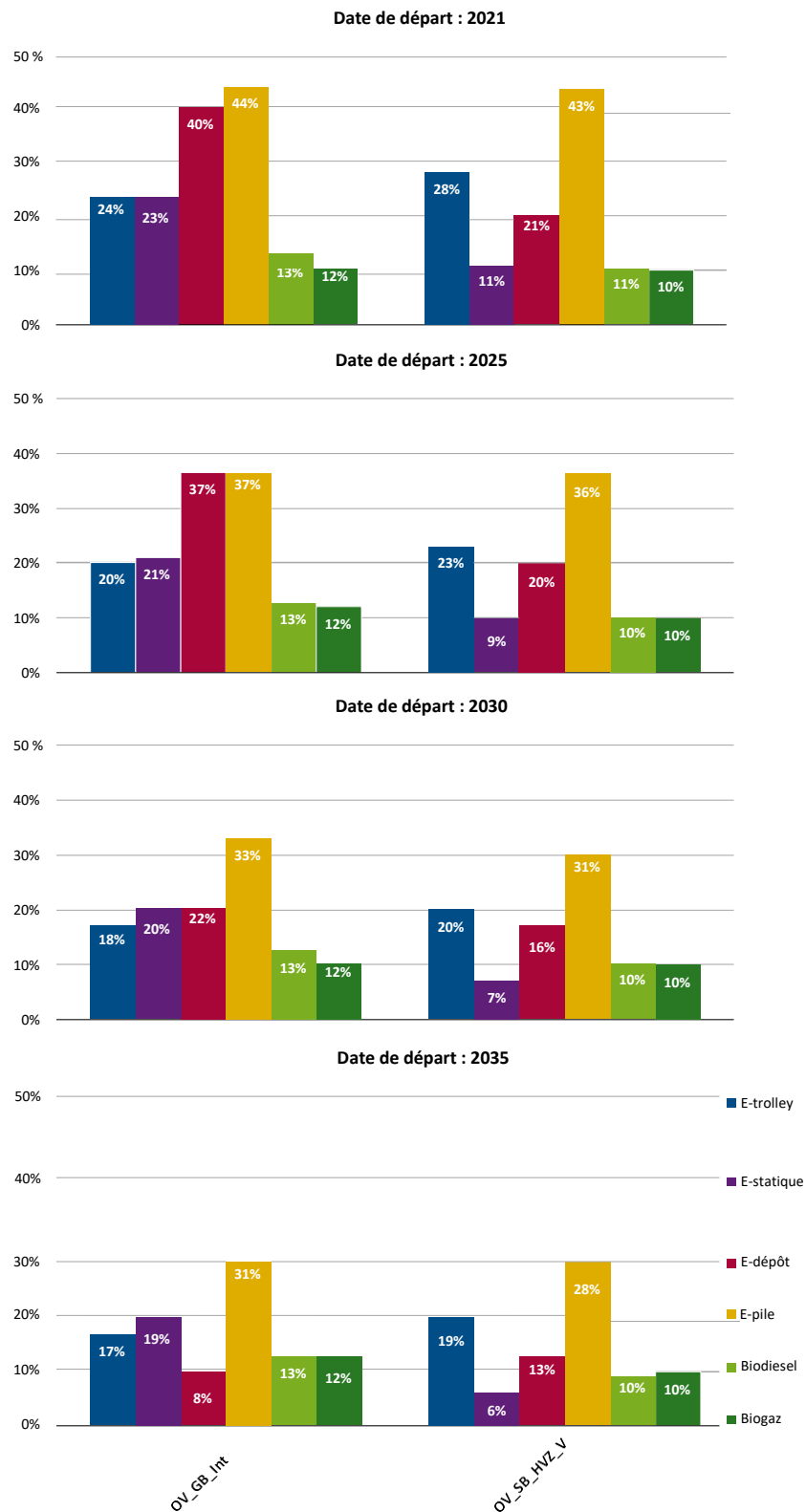


Tableau INFRAS.

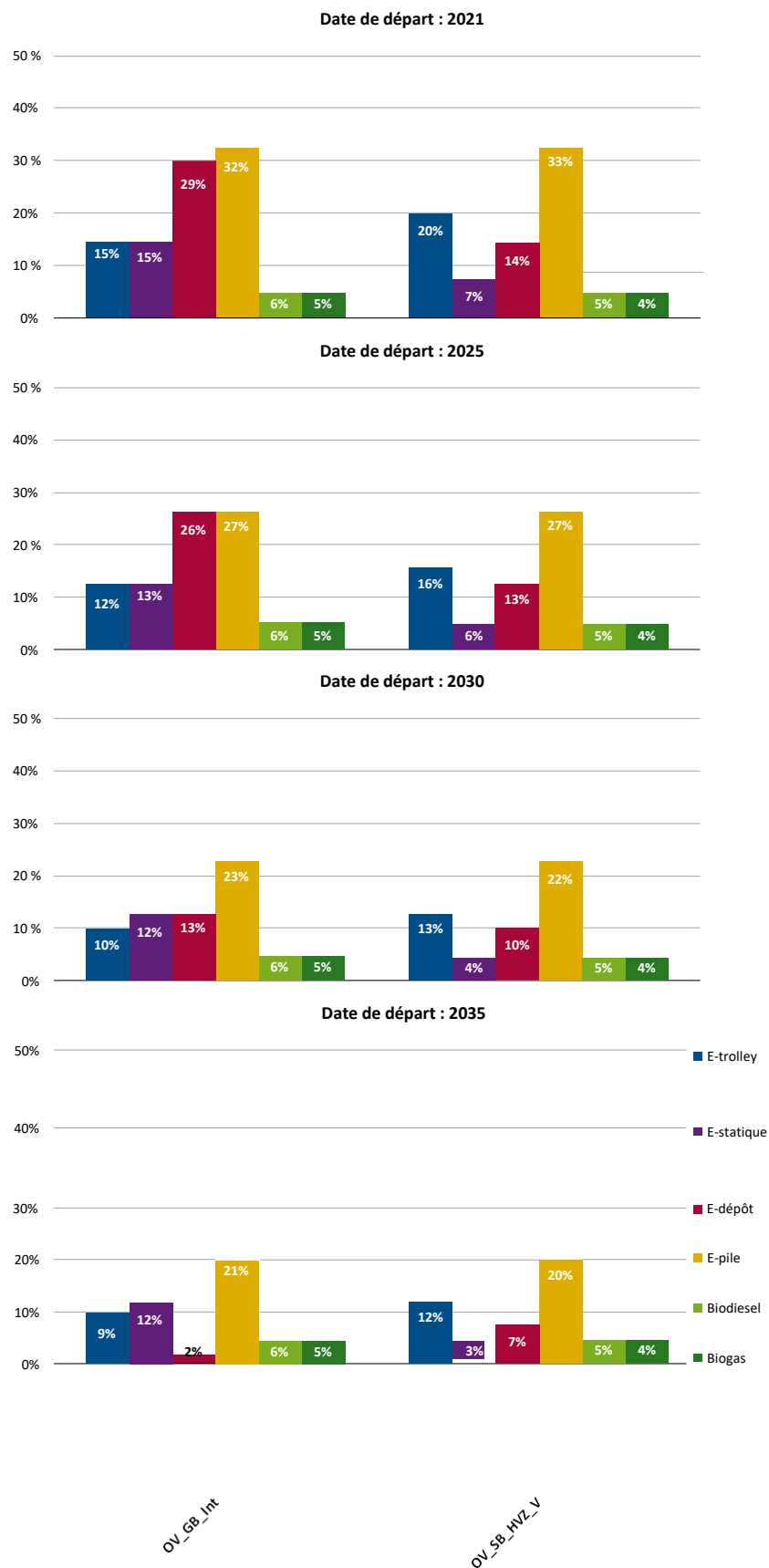
Sensibilités

- Suppression du remboursement de l'impôt sur les huiles minérales : si l'on renonce au remboursement de l'impôt sur les huiles minérales pour les ETC (0,59 CHF/l de diesel), la variante de référence du bus diesel devient plus onéreuse et les surcoûts des options de propulsion sans fossile diminuent en conséquence. Comme le montre la figure 19, les surcoûts des bus à batterie sont réduits de 5 à 10 points de pourcentage. Pour les biocarburants, les surcoûts sont réduits d'environ 5 points de pourcentage par rapport aux bus diesel.
- Durée de vie de la batterie plus longue – 12 ans au lieu de 6 ans : cela rendra notamment moins chers les bus rechargés de dépôt avec leurs batteries de grande taille, qui sont coûteuses. À court/moyen terme, les surcoûts sont réduits de près de 10 points de pourcentage ; à plus long terme, à l'horizon 2030/2035, ils diminuent d'environ 5 points de pourcentage par rapport au bus diesel (cf. figure 20). L'effet est beaucoup plus faible pour les bus alimentés par biberonnage, qui utilisent des batteries plus petites et moins chères. Les surcoûts par rapport au bus diesel ne sont réduits que de 1 à 2 pour cent. Et dans le cas de la pile à combustible, où cette sensibilité suppose que la pile à combustible elle-même a également une durée de vie de 12 ans, les surcoûts sont réduits d'environ 5-6 pour cent par rapport au bus diesel. Si l'on suppose également que le remboursement de l'impôt sur les huiles minérales sera supprimé, les bus à batterie seront même moins onéreux que les bus diesel à long terme. Selon les explications sur la durée de vie des batteries en annexe A1.1 (à partir de la page 197), une durée de vie de 12 ans est tout à fait réaliste pour les grandes batteries de bus rechargés au dépôt qui sont chargées une fois par jour. En revanche, pour les bus alimentés par biberonnage, dont les batteries sont rechargées plusieurs fois par jour, une durée de vie de 12 ans semble irréaliste. Cependant, comme expliqué ci-dessus, l'hypothèse concernant la durée de vie des batteries n'est pas aussi sensible pour le bus alimenté par biberonnage que pour le bus chargé au dépôt.
- Une durée de vie plus longue des bus électriques, de 20 ans au lieu de 12 ans comme pour le bus diesel ; pour les batteries, on suppose qu'elles seront remplacées une fois au cours de leur durée de vie (après 10 ans) : Les surcoûts par rapport au diesel sont encore plus réduits qu'avec la sensibilité « 12 ans de véhicules/12 ans de batterie », à savoir de 10-15 pour cent pour le bus chargé au dépôt et de 5-6 pour cent pour le bus alimenté par biberonnage (cf. figure 21). Les coûts des bus rechargés au dépôt et des bus alimentés par biberonnage se rapprochent des coûts des bus diesel à long terme si les conditions d'exploitation sont favorables (pas de bus supplémentaires). Si le remboursement de l'impôt sur les huiles minérales est supprimé, les bus à batterie deviendraient même moins chers que les bus diesel à long terme.

Avec cette sensibilité, il faut toutefois noter que l'on ne suppose pas de coûts d'entretien plus élevés avec l'augmentation de l'âge des véhicules ni de mesures de réaménagement à l'intérieur des véhicules pour maintenir le confort des passagers. Toutefois, ces deux aspects deviennent pertinents avec une durée de vie de 20 ans. Les effets de cette sensibilité sont surestimés en conséquence.

Figure 19 : surcoûts dans le trafic local/d'agglomération par rapport au bus diesel Euro 6 (analyse des coûts complets)

Sensibilité : pas de remboursement de l'impôt sur les huiles minérales pour les ETC / durée de vie de tous les véhicules de 12 ans et de la batterie de 6 ans.



Tableau

Figure 20 : surcoûts dans le trafic local/d'agglomération par rapport au bus diesel Euro 6 (analyse des coûts complets)

Sensibilité : avec remboursement de l'impôt sur les huiles minérales pour les ETC / durée de vie de tous les véhicules de 12 ans et de la batterie de 12 ans.

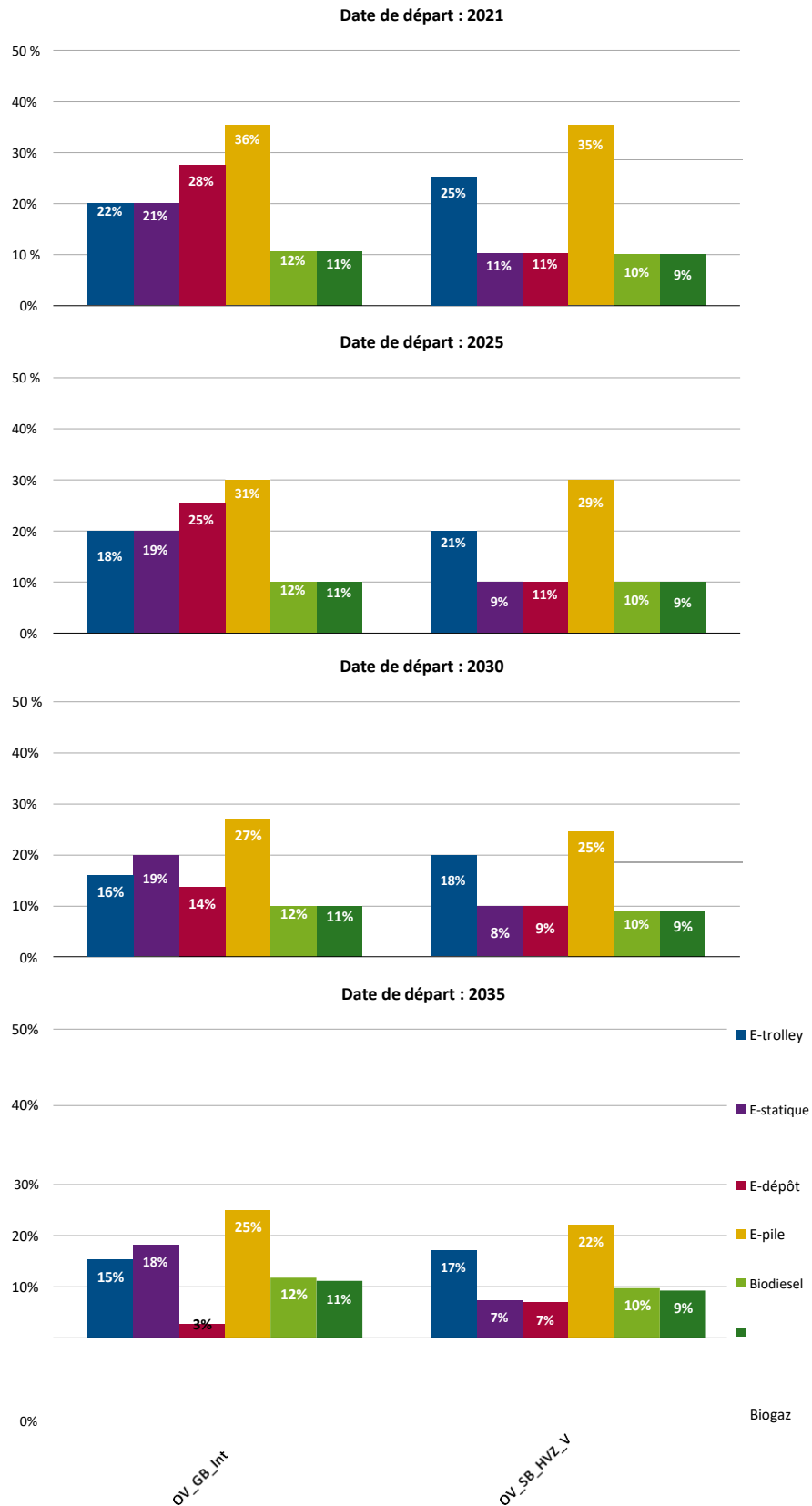
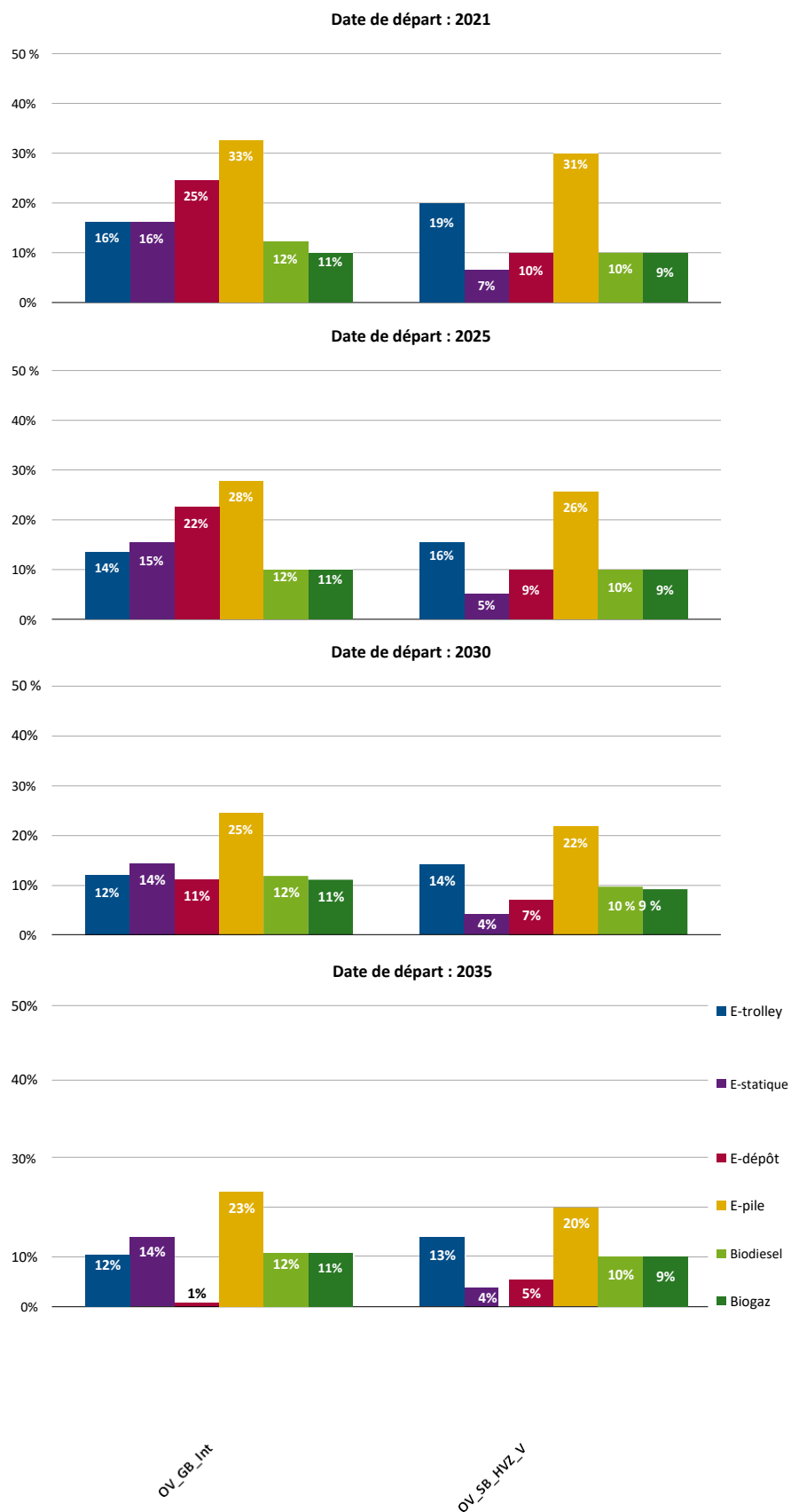


Tableau INFRAS.

Figure 21 : surcoûts dans le trafic local/d'agglomération par rapport au bus diesel Euro 6 (analyse des coûts complets)

Sensibilité : avec remboursement de l'impôt sur les huiles minérales pour les ETC / durée de vie de tous les véhicules de 20 ans et de la batterie de 10 ans.



Tableau

4.3.2. Résultats pour le trafic régional du Plateau

Principales conclusions

La figure 22 présente les surcoûts des différentes options de propulsion sans fossile par rapport à la technologie de référence qu'est le bus diesel Euro 6. Les détails sur les surcoûts différenciés selon les différents blocs de coûts ainsi que les hypothèses se trouvent dans l'annexe.

On peut dire ce qui suit au sujet des effets sur les coûts pour les lignes régionales du Plateau :

- En principe, des déclarations similaires s'appliquent aux lignes régionales concernant les effets à court et à long terme en termes de surcoûts par rapport à l'entraînement diesel (cf. chapitre 4.3.1).
- Si les conditions cadres spécifiques d'une ligne sont données, le bus à charge combinée (bus chargé au dépôt avec possibilité de recharge sur le trajet) est déjà une option rentable à court terme avec des surcoûts de 10-15 pour cent par rapport au bus diesel (2^e étude de cas à partir de la gauche dans la figure 22). Le bus à charge combinée est surtout adapté aux lignes dont les temps de rebroussement sont trop courts pour permettre la recharge aux heures de pointe, alors qu'aux heures creuses avec un horaire restreint, il y a suffisamment de temps aux extrémités de la ligne pour la recharge²⁴.
- Comme pour le trafic local, le bus alimenté par biberonnage statique est intéressant s'il ne nécessite qu'une seule station de recharge sur la ligne (et qu'il peut éventuellement être utilisé par plusieurs lignes) et si les temps de rebroussement en extrémité de ligne sont suffisants pour la recharge sans mettre en danger la stabilité de l'horaire. Dans ces conditions (3^e étude de cas à partir de la gauche dans la figure 22), il entraîne déjà des surcoûts de seulement +10-15 pour cent à court terme par rapport au bus diesel.
- Le bus alimenté par biberonnage statique déclenche des surcoûts élevés si une rotation supplémentaire du véhicule est nécessaire en raison de temps de recharge insuffisants dans l'horaire. Ils sont particulièrement élevés avec jusqu'à +70 pour cent pour les lignes avec une offre faible et peu de véhicules (études de cas à droite dans la figure 22). Mais même avec une fréquence de 15 minutes, les surcoûts pour une rotation supplémentaire sont comparativement élevés, à savoir +30 pour cent.

En général, les stations de recharge des lignes régionales ont une part des coûts plus élevée que les lignes locales plus denses.

- Comme pour le trafic local, le bus chargé au dépôt constitue une option onéreuse à court terme en raison de l'autonomie encore insuffisante, car il augmente les besoins en véhicules. À long terme, cependant, il a le potentiel de devenir le mode de propulsion sans carburant fossile le moins cher, avec des surcoûts de l'ordre de +5 pour cent, à condition que la prestation quotidienne d'aujourd'hui puisse être couverte sans recharge. C'est le cas des lignes dont l'exploitation quotidienne est inférieure à 400 km (3^e et 5^e études de cas à partir de la gauche dans la figure 22).

²⁴ Ces conditions cadres sont données, par exemple, dans l'essai pilote actuel de la ligne 17 à Berne.

- Le bus à pile à combustible représente aussi l'option la plus onéreuse pour les lignes régionales, même si l'infrastructure de ravitaillement de H₂, comme le montrent les résultats de la figure 22, n'est pas prise en compte. Les surcoûts par rapport au bus diesel à court terme sont d'environ 40 pour cent pour les lignes de bus articulés et standards et d'environ 30 pour cent pour les lignes de bus midi ; à plus long terme, la différence tombe à environ 30 pour cent et 20 pour cent respectivement. Toutefois, en fonction des conditions locales, le bus à pile à combustible peut certainement être une option, par exemple si une prestation quotidienne très élevée est nécessaire.
- À court terme, l'option la moins onéreuse ou nettement moins onéreuse que les bus à batterie, généralement encore chers, serait celle des biocarburants (biodiesel ou biogaz²⁵), avec un surcoût d'environ 10 pour cent par rapport à un bus diesel. À plus long terme, toutefois, ils perdent cet avantage en termes de coût par rapport aux bus à batterie, qui pourraient même être moins chers que les bus à carburant à l'horizon 2030/2035 dans des conditions d'exploitation optimales. En outre, la question fondamentale de la disponibilité se pose pour les biocarburants (voir également l'annexe A3).

Conclusion

Du point de vue des coûts, il faut faire la distinction entre la situation à court terme et les évolutions prévisibles. À court terme, les bus alimentés par batterie sont comparativement onéreux aussi dans le trafic régional et leur potentiel d'utilisation pratique est limité (notamment pour le bus chargé au dépôt dont l'autonomie par charge est encore insuffisante). Comme pour le trafic local, les bus à batterie pourraient toutefois être les options les plus rentables à plus long terme, en fonction des conditions d'utilisation et des hypothèses relatives à la durée de vie des batteries. La suppression du remboursement de l'impôt sur les huiles minérales, qui favorise actuellement les bus diesel, aurait également un effet positif en faveur des bus à batterie.

À court terme, les biocarburants sont généralement aussi les options les moins chères dans le trafic régional. En ce qui concerne l'adéquation et la disponibilité des biocarburants dans les transports publics, les commentaires sont les mêmes que pour le trafic local.

Sensibilités

Les mêmes déclarations s'appliquent aux sensibilités « pas de remboursement de l'impôt sur les huiles minérales », « durée de vie de tous les bus de 12 ans et des batteries de 12 ans » et « durée de vie des bus électriques de 20 ans et des batteries de 12 ans » telles que décrites pour le trafic local au chapitre 4.3.1.

²⁵ Prix présumés de l'énergie : biodiesel 2 CHF/l, biogaz 2,20 CHF/kg

Figure 22 : surcoûts dans le trafic régional du plateau par rapport au bus diesel Euro 6 (analyse des coûts complets)

Hypothèses de base (avec remboursement de l'impôt sur les huiles minérales pour ETC)

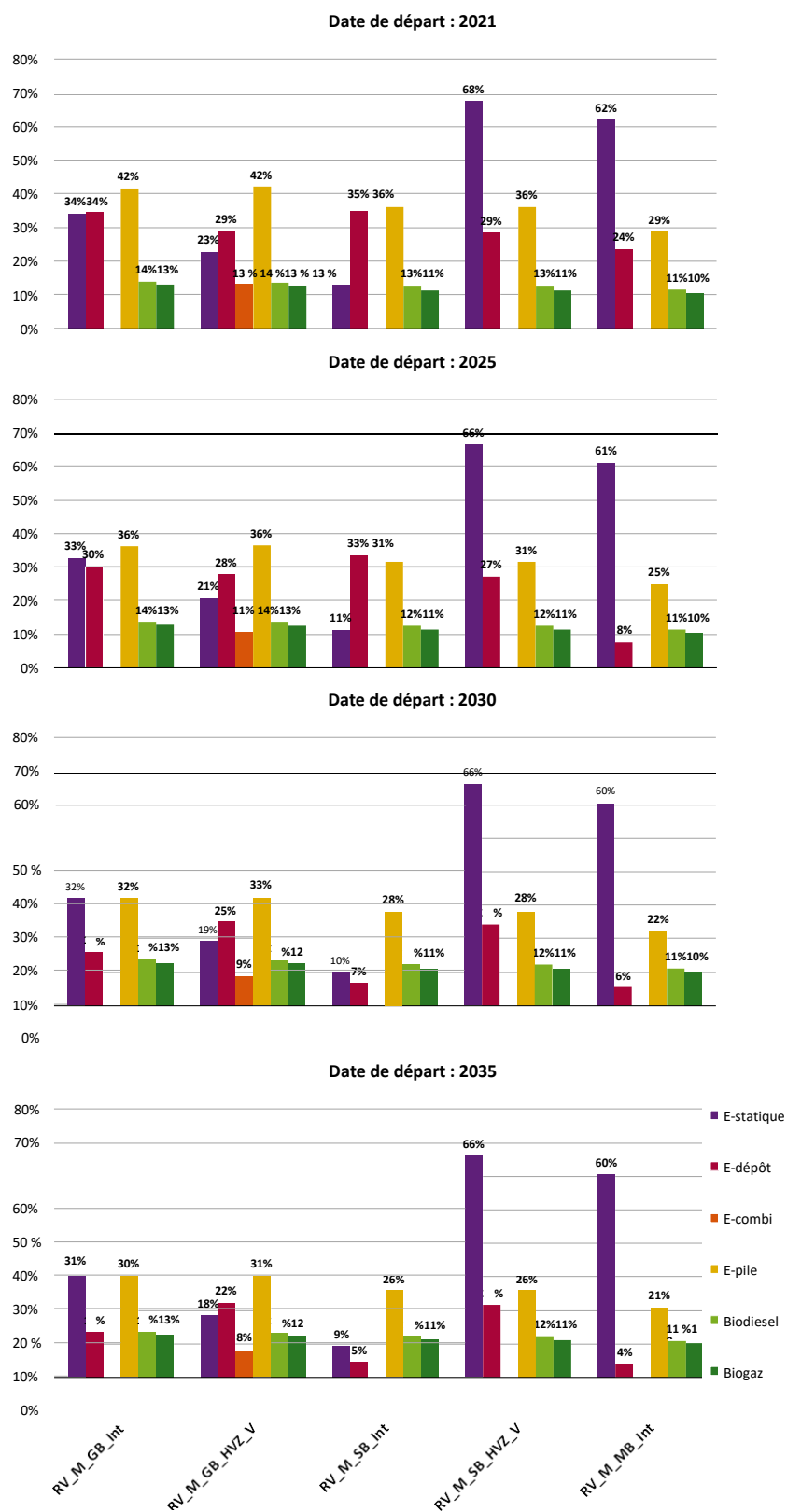


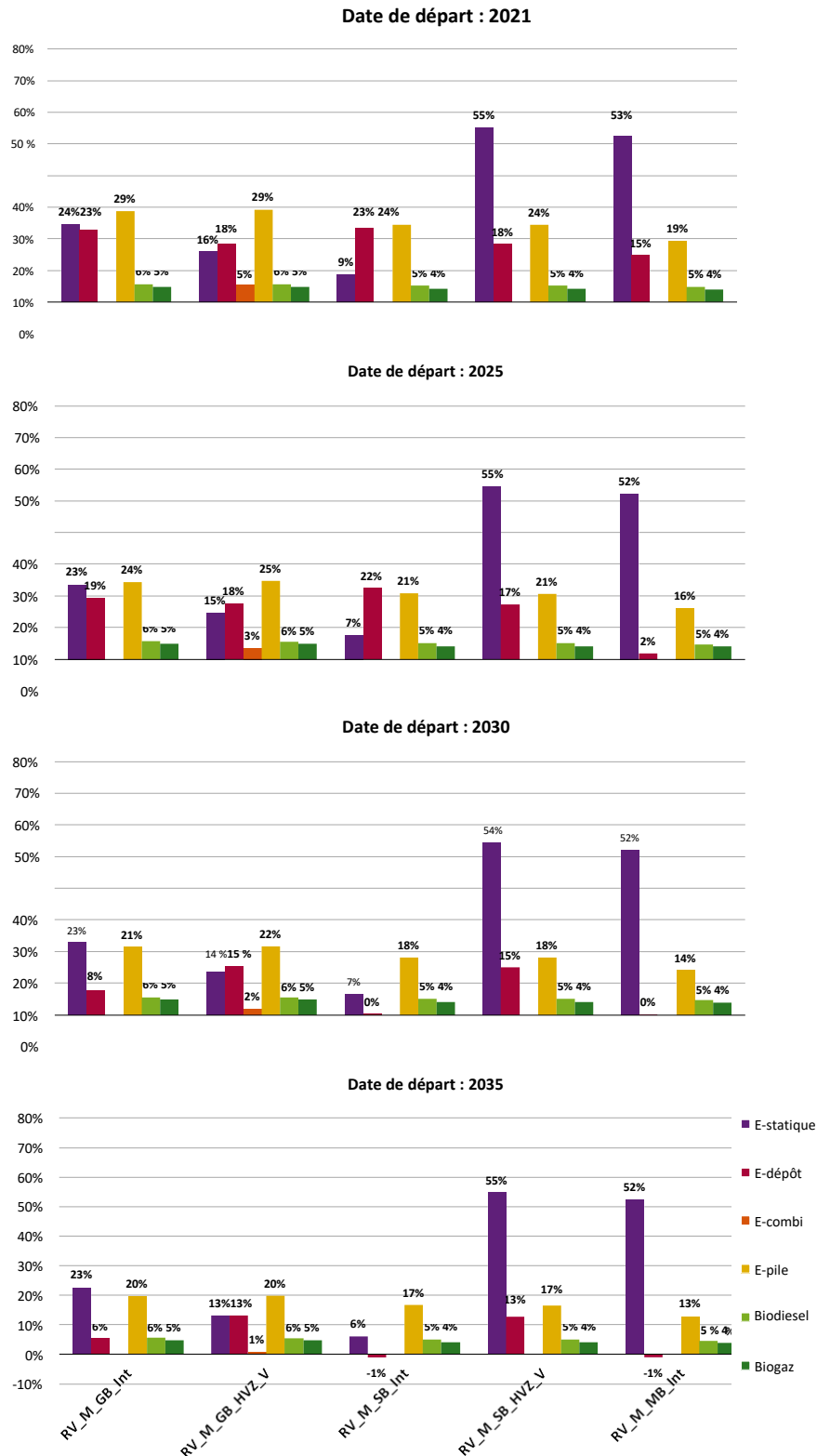
Figure 23 : surcoûts dans le trafic régional du plateau par rapport au bus diesel Euro 6 (analyse des coûts complets)Sensibilité : pas de remboursement de l'impôt sur les huiles minérales pour ETC

Tableau INFRAS.

4.3.3. Résultats pour le trafic régional d'une région de montagne

Principales conclusions

La figure 24 présente les surcoûts des différentes options de propulsion sans fossile par rapport à la technologie de référence qu'est le bus diesel Euro 6. Les détails sur les surcoûts différenciés selon les différents blocs de coûts ainsi que les hypothèses se trouvent dans l'annexe.

On peut dire ce qui suit au sujet des effets sur les coûts pour les lignes régionales de région de montagne :

- Comme pour le trafic local et les lignes régionales du Plateau, le bus alimenté par biberonnage statique n'a d'intérêt que si les temps de rebroussement en extrémité de ligne sont suffisants pour la recharge sans mettre en danger la stabilité de l'horaire. Dans l'étude de cas examinée pour une ligne avec des bus standards (figure 24, à gauche), ce n'est pas le cas : les temps de rebroussement sont trop courts, de sorte que le bus alimenté par biberonnage statique nécessite une rotation supplémentaire, avec des surcoûts d'environ 35 pour cent par rapport au bus diesel.
- Comme pour le trafic local, le bus chargé au dépôt constitue une option onéreuse à court terme en raison de l'autonomie encore insuffisante, car il augmente les besoins en véhicules. À long terme, cependant, il a le potentiel de devenir le mode de propulsion sans énergie fossile le moins cher, avec des surcoûts de l'ordre de +5 pour cent pour les lignes de bus standard et de +10 pour cent pour les minibus, à condition que la prestation quotidienne d'aujourd'hui puisse être couverte sans recharge. C'est le cas pour les deux lignes étudiées, dont l'utilisation quotidienne maximale est d'environ 300 km.
- Le bus à pile à combustible est aussi coûteux à court terme pour les lignes de montagne que les bus à batterie. À long terme, il sera moins coûteux que le bus alimenté par biberonnage statique, si ce dernier nécessite une rotation de bus supplémentaire pour la recharge. Toutefois, le bus à pile à combustible est nettement plus cher que le bus chargé au dépôt si ses autonomies sont suffisamment importantes pour qu'aucun remplacement de véhicule ne soit nécessaire. En fonction des conditions locales, le bus à pile à combustible peut néanmoins certainement être une option, par exemple si une prestation quotidienne très élevée est nécessaire.
- Les mêmes explications s'appliquent aux options avec les biocarburants et aux lignes régionales sur le Plateau (cf. chapitre 4.3.2).

Conclusion

Les mêmes commentaires s'appliquent ici que pour les lignes locales et régionales du Plateau.

Sensibilités

Les mêmes déclarations s'appliquent aux sensibilités « pas de remboursement de l'impôt sur les huiles minérales », « durée de vie de tous les bus de 12 ans et des batteries de 12 ans » et « durée de vie des bus électriques de 20 ans et des batteries de 12 ans » telles que décrites pour le trafic local au chapitre 4.3.1.

Figure 24 : surcoûts dans le trafic régional des régions de montagne par rapport au bus diesel Euro 6 (analyse des coûts complets)

Hypothèses de base (avec remboursement de l'impôt sur les huiles minérales pour ETC)

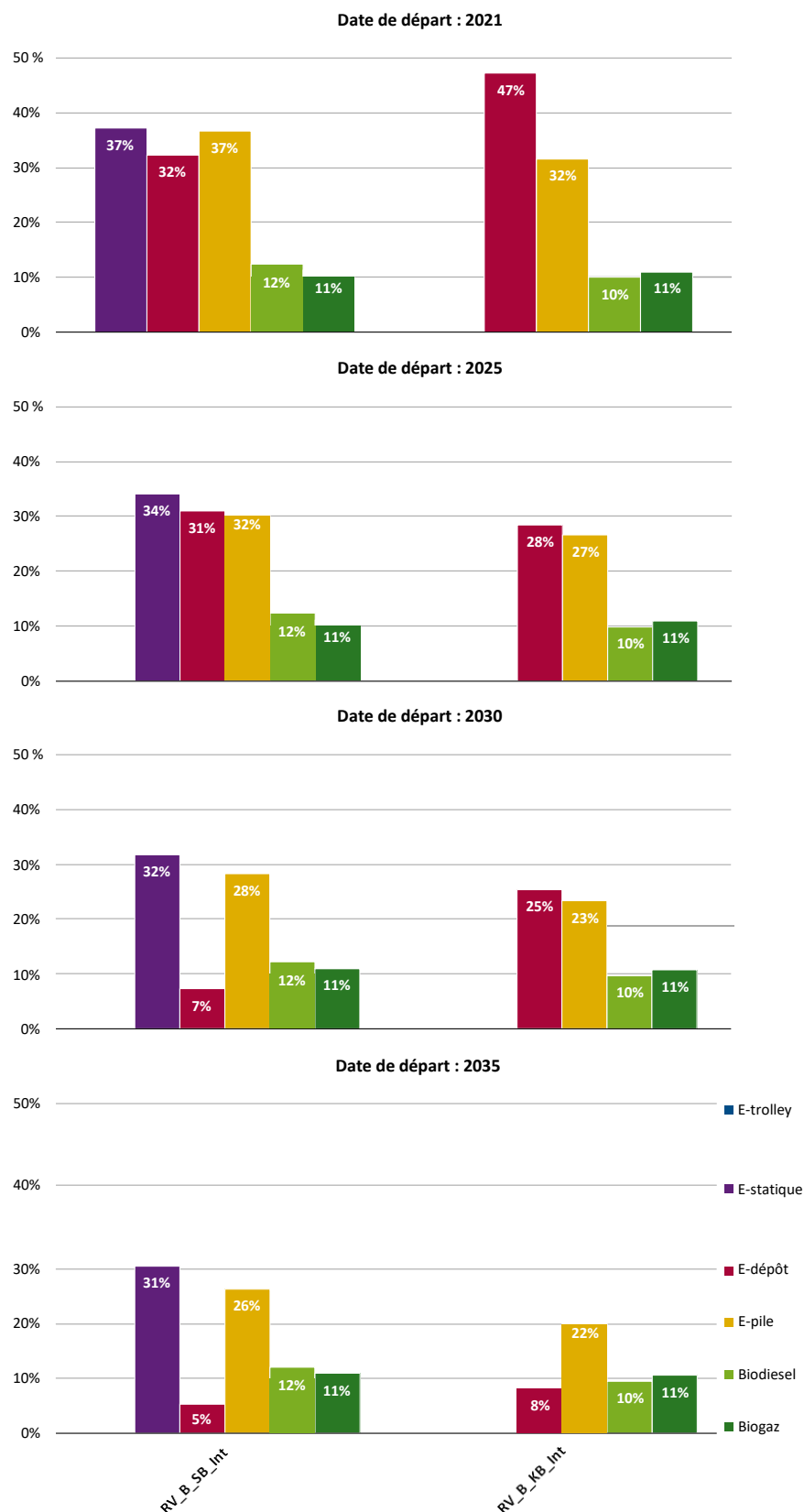


Tableau INFRAS.

Figure 25 : surcoûts dans le trafic régional des régions de montagne par rapport au bus diesel Euro 6 (analyse des coûts complets)

Sensibilité : pas de remboursement de l'impôt sur les huiles minérales pour ETC

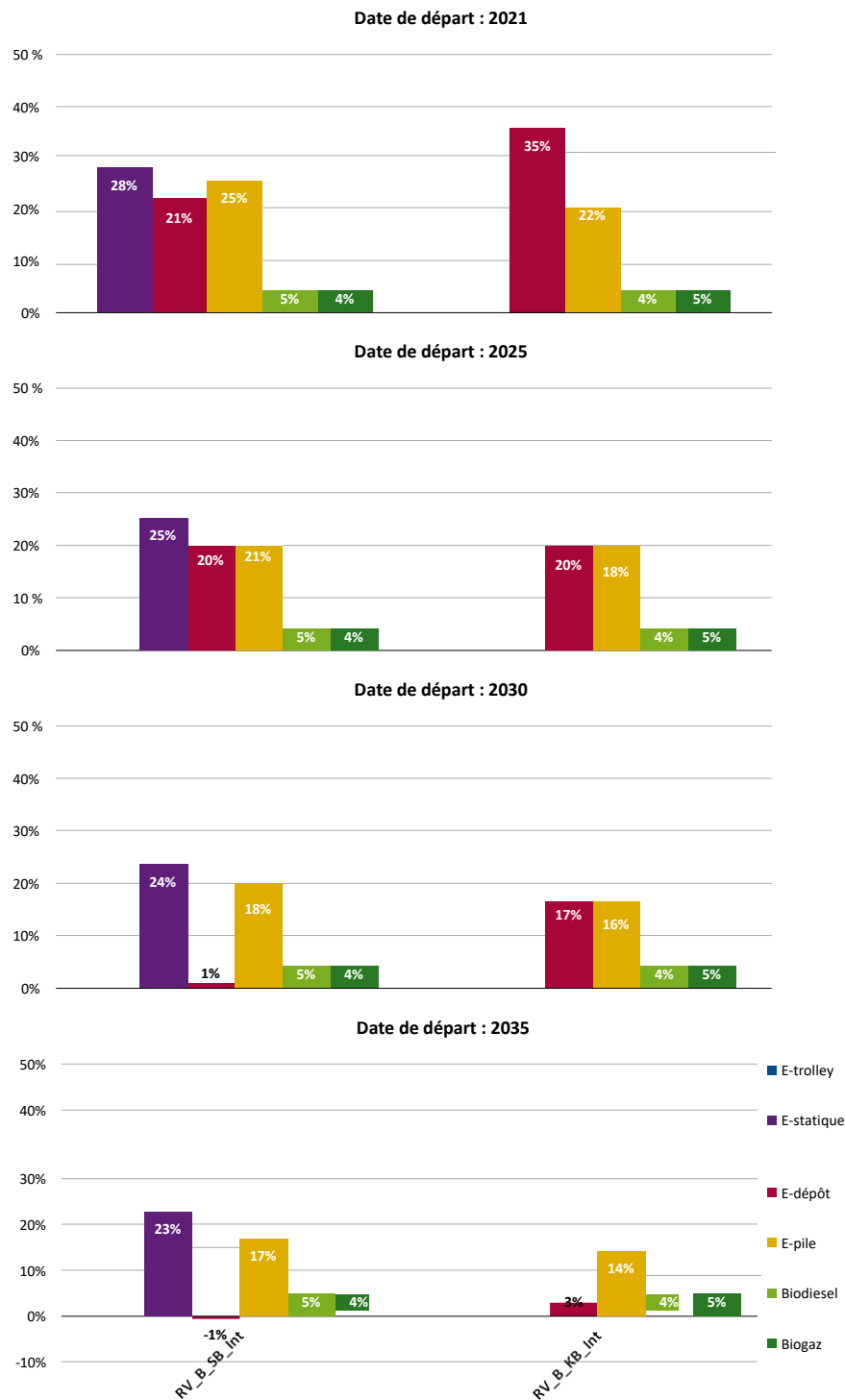


Tableau INFRAS.

4.3.4. Bus hybrides

Les coûts des bus hybrides (plug-in) ne sont pas indiqués dans les études de cas car ils dépendent fortement des caractéristiques spécifiques du bus. Comme décrit au chapitre 3.2.1, nous abordons ici les bus hybrides biodiesel, les bus hybrides plug-in ainsi que les bus hybrides à biogaz.

Les bus hybrides conventionnels, c'est-à-dire ceux qui n'ont pas la possibilité de recharger la batterie à partir du réseau, ont des coûts d'acquisition légèrement plus élevés (5-10 pour cent) que les bus non hybrides. Les frais d'entretien sont également plus élevés. En revanche, la consommation de carburant est généralement inférieure de 10 à 20 pour cent à celle des bus diesel classiques. Pour les bus au biodiesel classiques, l'acquisition et l'entretien représentent ensemble environ 45 % et l'énergie environ 55 % des coûts du véhicule. Ainsi, dans l'ensemble, les bus hybrides au biodiesel et à biogaz ont tendance à avoir des coûts totaux légèrement inférieurs à ceux des bus non hybrides comparables.

En termes de prix d'achat, les bus hybrides plug-in se situent généralement entre les bus hybrides diesel et les bus rechargés au dépôt. Ils sont donc certainement plus chers que les bus diesel. Plus la batterie est grosse, plus le prix se rapproche de celui des bus rechargés au dépôt. Si la batterie d'un bus hybride plug-in était aussi importante que celle d'un bus chargé au dépôt comparable, ce bus serait également plus cher que le bus chargé au dépôt. Un bus hybride plug-in est comparable à un bus hybride classique en termes d'entretien. Les coûts énergétiques dépendent de la taille de la batterie et de son utilisation. Plus la batterie est grande et donc plus la proportion de la distance journalière qui peut être parcourue avec l'électricité du secteur est importante, moins l'énergie nécessaire est chère. Il est donc généralement admis que les véhicules qui sont plus chers à l'achat ont des coûts énergétiques plus faibles. Globalement, les coûts des bus hybrides plug-in se situent également entre ceux des bus hybrides et des bus rechargés au dépôt. Étant donné que les coûts énergétiques par km des bus rechargés au dépôt sont plus de trois fois inférieurs à ceux des bus au biodiesel, mais que les coûts d'achat et d'entretien ne sont supérieurs que d'environ 25 pour cent, le coût optimal serait celui des bus hybrides plug-in dotés de batteries relativement grandes.

En conclusion, il est toutefois nécessaire de répéter ce qui a déjà été dit au chapitre 3.2.4 : les véhicules hybrides plug-in développent leur force dans les applications où la capacité de la batterie est souvent suffisante et où le moteur à combustion n'est pas nécessaire, mais où le kilométrage quotidien est plus important. Par conséquent, les véhicules hybrides plug-in ne constitueront probablement la solution économique optimale que dans quelques cas.

4.4. Écologie

Remarque préliminaire sur l'impact écologique des bus électriques : l'objectif déclaré de cette option de propulsion est d'utiliser de l'électricité provenant de sources 100 pour cent renouvelables. Pour cette raison, aucune étude de sensibilité du mix électrique n'est effectuée.

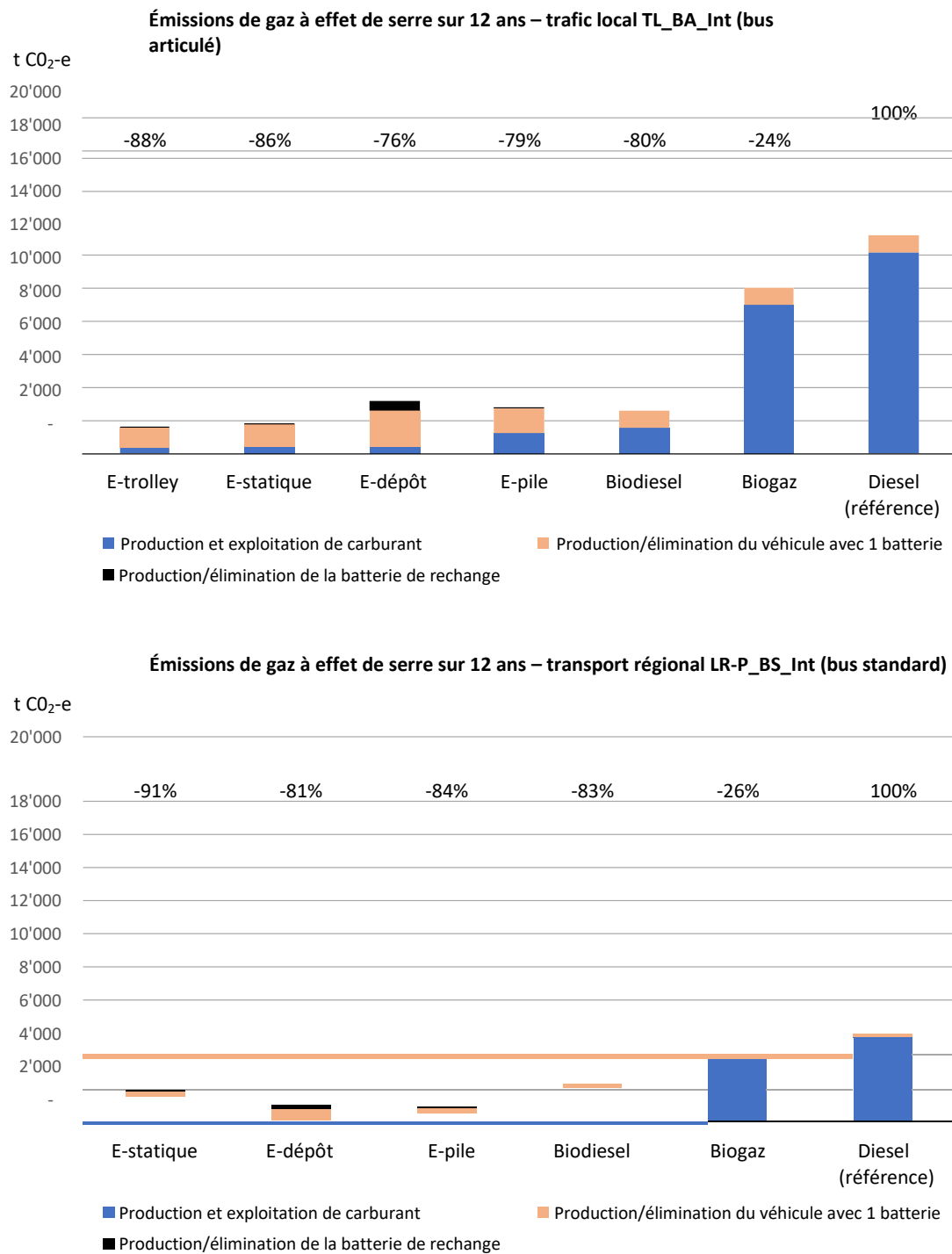
4.4.1. Émissions de gaz à effet de serre

La figure 26 montre le potentiel de réduction des gaz à effet de serre (GES) des options de propulsion non fossile par rapport aux bus diesel en prenant l'exemple d'une ligne de trafic local avec des bus articulés et d'une ligne de trafic régional avec des bus standard. Il en résulte que ce potentiel est du même ordre de grandeur pour les trafics locaux et régionaux. Il en va de même pour les autres études de cas qui ne sont pas explicitement présentées ici. On peut dire ce qui suit au sujet des différentes options de propulsion :

- Le potentiel de réduction des GES des bus électriques alimentés par de l'électricité renouvelable se situe entre 75 et 90 pour cent.
- Dans les bus à batteries, les bus alimentés par biberonnage statique avec les petites batteries sont légèrement plus performants (réduction de 85-90 pour cent) que les bus rechargés au dépôt avec leurs grandes batteries (réduction de 75-80 pour cent), dont les émissions de GES sont plus élevées pendant la production.
- Malgré une batterie plus petite, le bus à pile à combustible a des émissions de GES aussi élevées que le bus chargé au dépôt, car la production de la pile à combustible et de l'hydrogène émet également des GES en conséquence.
- Le potentiel de réduction des bus au biodiesel est comparable à celui des bus rechargés au dépôt et des bus à pile à combustible, en supposant que le biodiesel est produit à partir d'huiles de cuisson usagées²⁶.
- Par rapport aux autres options, les bus fonctionnant au biogaz n'ont qu'un faible potentiel de réduction des gaz à effet de serre, d'environ 20 pour cent. La raison en est le « glissement de méthane » lors de la production de biogaz. Les hypothèses faites ici à partir d'ecoinvent v3.6 semblent être plutôt conservatrices, car les usines plus récentes montrent des valeurs nettement meilleures en ce qui concerne le glissement de méthane. Le potentiel de réduction des gaz à effet de serre du biogaz est par conséquent sous-estimé ici.

²⁶ Ce carburant ne sera certainement pas suffisant pour tous les bus des transports publics en Suisse, mais il peut tout à fait être une option sur certains trajets. Plus d'informations sur les carburants renouvelables dans l'annexe A3

Figure 26 : potentiel de réduction des gaz à effet de serre des options de propulsion sans fossile par rapport au bus diesel (=100 %)



En comparant les deux études de cas pour un bus articulé et un bus standard, il faut noter que le nombre de bus n'est pas identique (étude de cas ci-dessus avec 8 bus articulés et étude de cas ci-dessous avec 3 bus standards). La différence d'émissions de GES entre un bus articulé et un bus standard n'est donc pas directement lisible.

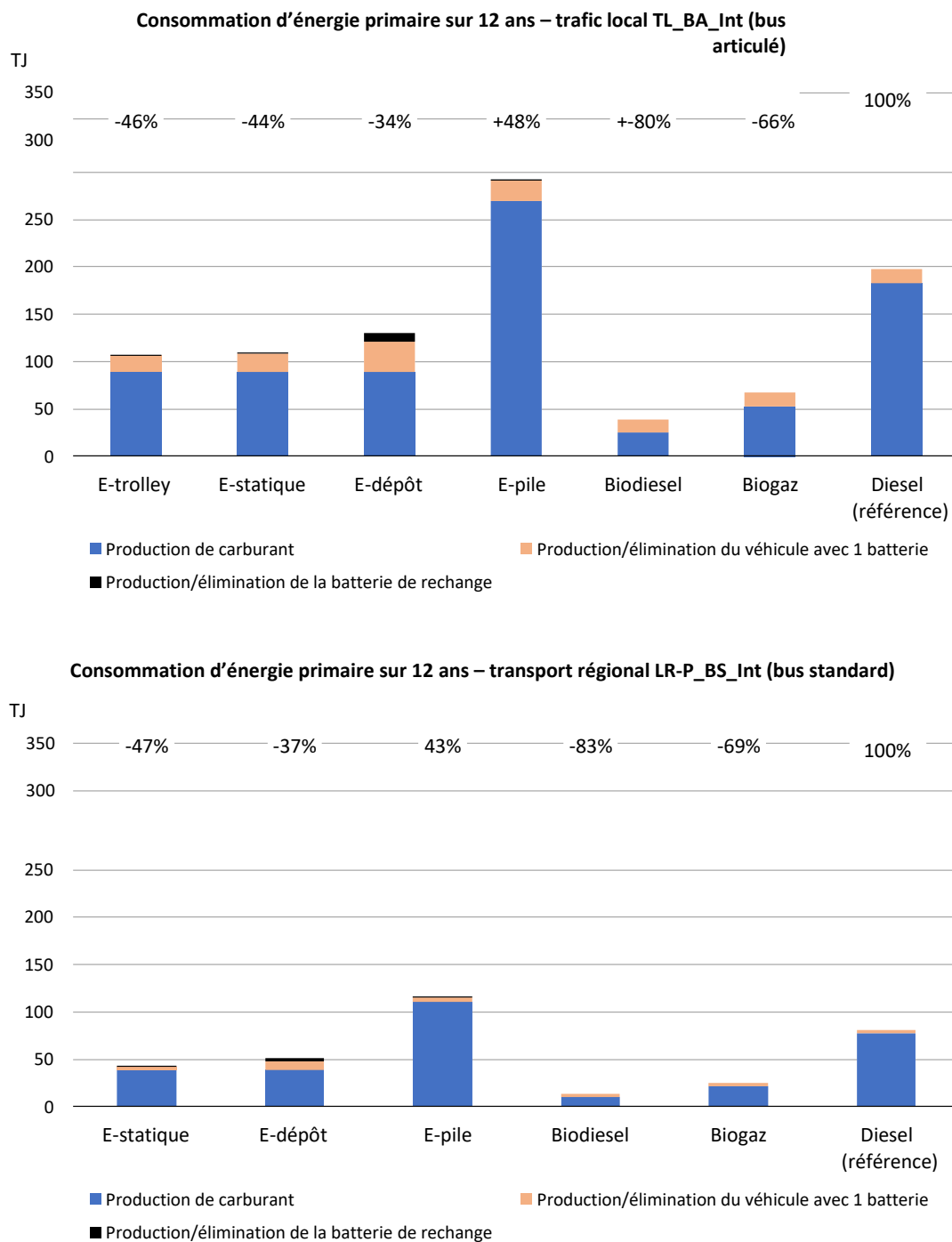
Graphique INFRAS.

4.4.2. Consommation d'énergie primaire

La figure 27 montre la consommation d'énergie primaire des options de propulsion non fossile par rapport aux bus diesel en prenant l'exemple d'une ligne de trafic local avec des bus articulés et d'une ligne de trafic régional avec des bus standards. Il en résulte que le besoin d'énergie primaire est du même ordre de grandeur pour les trafic locaux et régionaux. Il en va de même pour les autres études de cas qui ne sont pas explicitement présentées ici. On peut dire ce qui suit au sujet des différentes options de propulsion :

- En général, la part la plus importante résulte de la production de carburant ou d'électricité. La fourchette s'étend d'une part de 70 pour cent pour les bus rechargés au dépôt à 95 pour cent pour le biodiesel. La part de la production du véhicule et de la batterie ou de la pile à combustible est donc faible.
- Les trois options de bus à batterie réduisent les besoins d'énergie primaire de 40 à 50 pour cent par rapport au bus diesel. En raison de leur petite batterie, les deux bus alimentés par biberonnage ont tendance à être légèrement plus performants que le bus chargé au dépôt avec sa grande batterie.
- En revanche, l'option pile à combustible entraîne un besoin d'énergie primaire supplémentaire de 40 à 50 pour cent par rapport au bus diesel. La raison en est la production d'hydrogène, qui consomme beaucoup d'énergie.
- Comme l'indique la figure 27, les options biodiesel (à partir d'huiles de cuisson usagées) et biogaz réduisent les besoins d'énergie primaire par rapport au bus diesel encore plus que le bus à batterie, à savoir de plus de 60 pour cent. La limite supposée du système doit être prise en compte ici. En effet, seule la dernière étape du traitement du biodiesel (estérification) et du biogaz (fermentation des boues d'épuration) est prise en compte ici. Il s'agit de la méthode dite « cut-off » en ce qui concerne les limites du système de recyclage et des déchets. Pour la détermination des besoins d'énergie primaire du biodiesel et du biogaz, cela signifie que la teneur énergétique des matières premières n'est pas imputée aux biocarburants, mais aux processus en amont.

Figure 27 : consommation d'énergie primaire des options de propulsion sans fossile par rapport au bus diesel (=100 %)



L'infrastructure de recharge n'est pas prise en compte.

Graphique INFRAS.

4.4.3. Émissions locales de polluants atmosphériques

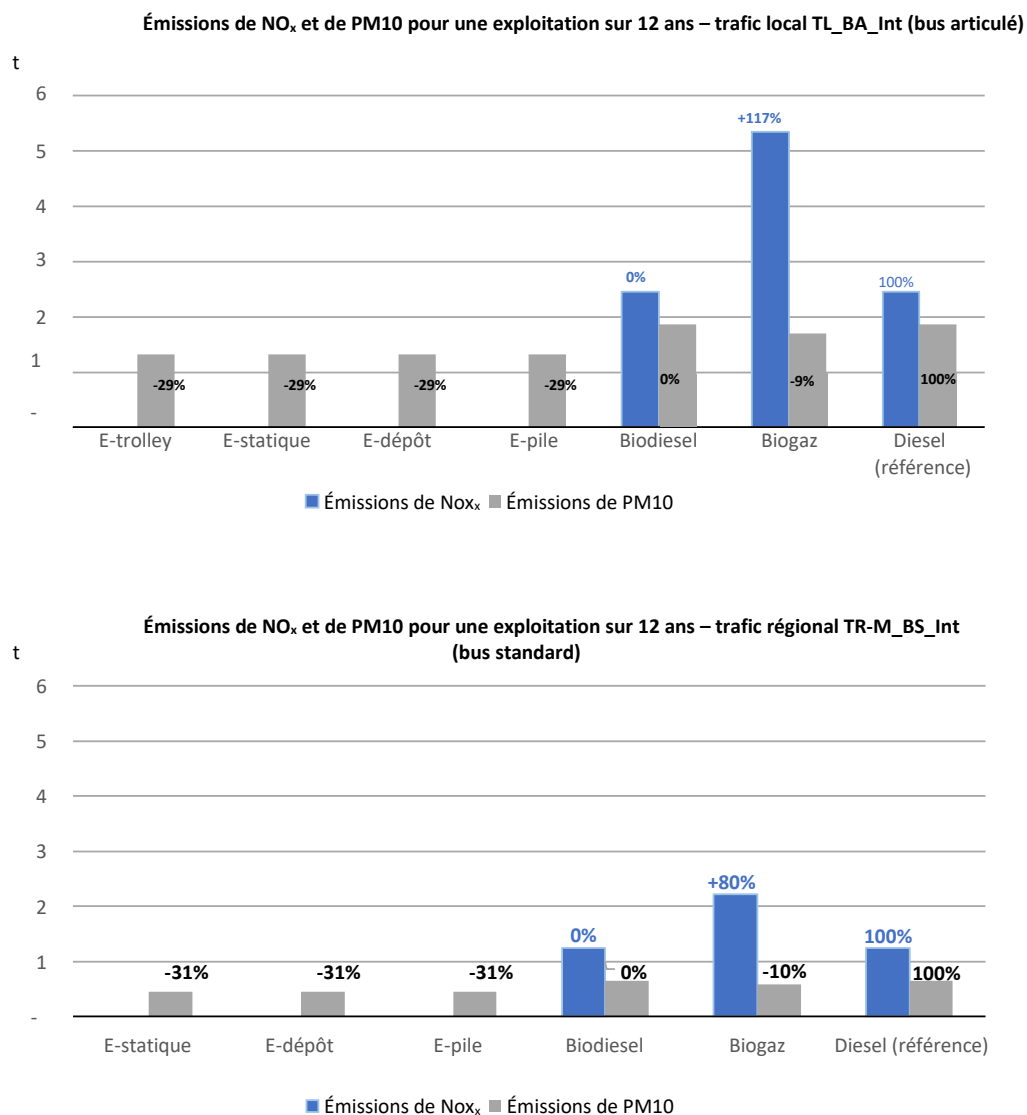
La figure 28 montre les répercussions sur les polluants atmosphériques locaux des options de propulsion non fossile par rapport aux bus diesel en prenant l'exemple d'une ligne de trafic locale avec des bus articulés et d'une ligne de trafic régionale avec des bus standards. Comme pour les besoins d'énergie primaire et les émissions de gaz à effet de serre, une image similaire se dégage de toutes les études de cas. On peut dire ce qui suit au sujet des différentes options de propulsion :

- Les bus à batterie et à pile à combustible n'émettent pas de No_x en exploitation. Le bus au biodiesel est comparable au bus diesel conventionnel. Le bus à biogaz, quant à lui, entraîne des émissions supplémentaires d'oxyde d'azote. Cette déclaration s'appuie sur des mesures effectuées par l'Université de technologie de Graz pour des bus GNC et diesel, qui ont été incluses dans le manuel HBEFA 4.1 et calculées pour des conditions de conduite suisses.
- Dans le cas des émissions de PM_{10} , il faut faire la distinction entre les émissions de gaz d'échappement et les émissions de « gaz hors échappement », c'est-à-dire les émissions dues aux remises en suspension ainsi qu'à l'abrasion des freins et des pneus. Avec les bus électriques, les PM_{10} provenant des gaz d'échappement sont nuls. En raison de la possibilité de récupération, les émissions dues à l'abrasion des freins sont environ deux fois moins élevées que celles d'un bus équipé d'un moteur à combustion²⁷. En revanche, l'abrasion des pneus et de la route ainsi que les remises en suspension de la route sont comparables entre les bus électriques et les bus diesel. En réalité, les bus électriques peuvent présenter une usure des pneus légèrement plus élevée, car le couple disponible aux roues est plus important au démarrage et que l'accélération est plus rapide. Dans l'ensemble, les bus électriques entraînent une réduction des émissions de PM_{10} d'environ 30 pour cent par rapport au bus diesel.

Du point de vue des émissions de polluants atmosphériques locaux, les effets sur le trafic local et régional sont d'une ampleur similaire. Du point de vue des immissions ou de l'impact, les effets sont toutefois plus importants dans le trafic local que dans le trafic régional, car un plus grand nombre de personnes en bénéficient en raison des zones d'habitation plus denses (ou, dans le cas du biogaz, un plus grand nombre de personnes sont touchées par l'augmentation des oxydes d'azote).

²⁷ Source : Althaus H.J. and Gauch M. 2010. Vergleichende Ökobilanz individueller Mobilität Elektromobilität versus konventionelle Mobilität mit Bio- und fossilen Treibstoffen. Empa, Dübendorf, Suisse. DOI: 10.13140/RG.2.1.4191.8482.

Figure 28 : émissions de polluants atmosphériques des options de propulsion sans fossile en fonctionnement par rapport au bus diesel (=100 %)



Graphique INFRAS.

4.4.4. Émissions de bruit

Le bruit des bus affecte les passagers d'une part et les personnes à l'extérieur du bus qui sont exposées au bruit d'autre part. Dans le second cas, il faut faire la distinction entre le bruit des bus en mouvement et le bruit des bus à l'arrêt (y compris le bruit des stations de recharge / processus de recharge). Des informations plus détaillées sur le bruit se trouvent à l'annexe A4.

Des enquêtes menées auprès des passagers de bus électriques ont montré que ceux-ci sont considérés comme plus silencieux et donc plus confortables que les bus diesel. Cela correspond au fait que le bruit du moteur, que l'on entend toujours dans le véhicule, est pratiquement éliminé avec les bus électriques.

L'élimination du bruit du moteur fait également une différence en exploitation. Ce phénomène est particulièrement notable à faible vitesse (démarrage, circulation en ville) et en montée. À des vitesses plus élevées, le bruit de roulement prédomine, et est pratiquement le même pour les bus diesel et les bus électriques. En principe, on peut également dire que sur une route très fréquentée et bruyante, la contribution d'un bus diesel ou d'un bus électrique aux émissions de la route est faible, alors que sur une route calme avec peu de trafic, la contribution peut être relativement importante pour un bus diesel et nettement plus faible pour un bus électrique. En d'autres termes, le remplacement des bus diesel par des bus électriques fait une différence particulièrement importante en termes de bruit dans les quartiers et pendant les heures creuses.

Lorsqu'ils attendent aux arrêts de bus, les bus électriques sont également plus silencieux que les bus diesel dont le moteur tourne. Le bruit peut être causé par la climatisation ou la ventilation. Dans le cas des bus alimentés par biberonnage, le refroidissement de l'infrastructure de charge peut également entraîner des émissions sonores gênantes pour les riverains. Dans ce cas, il faut veiller à assurer une bonne isolation acoustique des systèmes de refroidissement.

4.5. Coûts d'évitement du CO₂

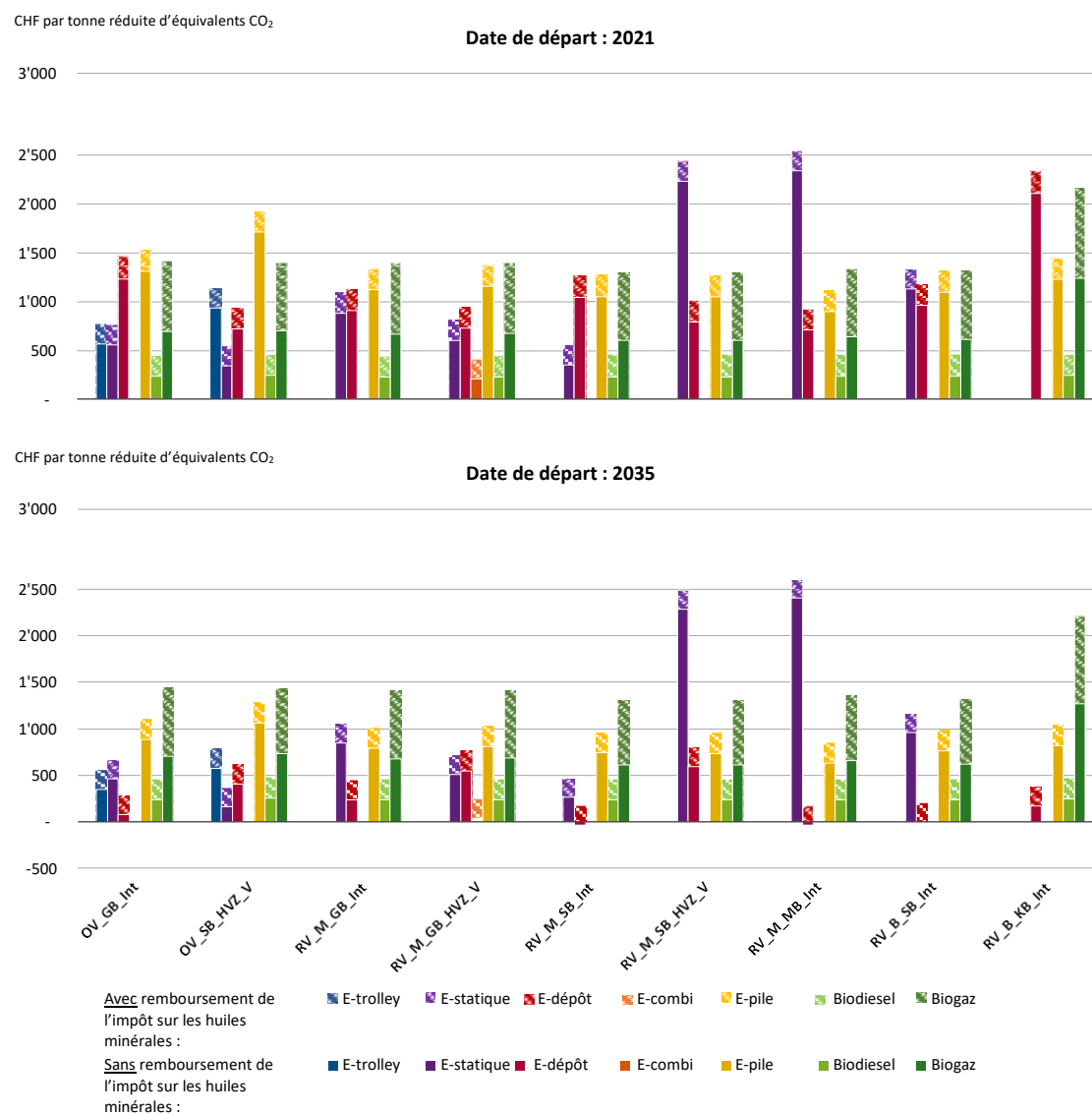
La figure 29 montre, sur la base des résultats de l'analyse d'impact sur les coûts supplémentaires, (chapitre 4.3) les coûts d'évitement par tonne de CO₂ et les potentiels de réduction du CO₂ (chapitre 4.4.1). Les options de propulsion sans fossile les plus favorables à court terme présentent des coûts de réduction de l'ordre de 500 francs par tonne d'équivalent CO₂, compte tenu des conditions cadres actuelles avec le remboursement de l'impôt sur les huiles minérales dans les transports publics. Il s'agit du bus biodiesel, du bus à batterie alimenté par biberonnage statique – à condition qu'aucune rotation supplémentaire de véhicules ne soit nécessaire – et du bus à charge combinée dans des conditions appropriées. Pour le trolleybus à batterie, des coûts de réduction de l'ordre de 500 francs par tonne de CO₂ sont également possibles à court terme, à condition qu'aucune ou seulement quelques nouvelles caténaires supplémentaires ne soient nécessaires. Par rapport à d'autres secteurs, ces coûts d'évitement semblent élevés.

Par exemple, les coûts d'évitement des mesures individuelles dans le secteur du bâtiment s'élèvent au maximum à CHF 140.–/tCO₂ (Ecoplan 2012). Toutefois, c'est la méthode utilisée pour déterminer les coûts d'évitement qui est pertinente ici. Lors de la comparaison des coûts d'évitement, le cas de référence est également décisif. Si les coûts d'évitement du CO₂ des bus électriques sont si élevés dans les conditions cadres actuelles des bus diesel dans les transports publics, c'est principalement parce qu'aujourd'hui, avec le remboursement de l'impôt sur les huiles minérales, il existe une incitation financière inopportune qui fait que le cas de référence (bus diesel) semble artificiellement moins cher.

Il faut également tenir compte du fait que la réduction des émissions de gaz à effet de serre n'est pas le seul argument écologique en faveur de la conversion des bus aux énergies renouvelables. Ainsi, les bus électriques permettent d'éviter des coûts externes supplémentaires dans les domaines du bruit et des polluants atmosphériques, contrairement aux bus alimentés par des biocarburants. Les surcoûts ne doivent donc pas être considérés uniquement par rapport à la réduction du CO₂.

À plus long terme (horizon 2030/2035), avec le bus chargé au dépôt dans des domaines d'application où les autonomies actuelles d'environ 350 km/charge sont suffisantes, ainsi qu'avec les bus alimentés par biberonnage dans des conditions d'exploitation idéales, des coûts d'évitement de moins de 200 francs par tonne de CO₂ sont possibles, et donc aussi nettement inférieurs au biodiesel. Si le remboursement de l'impôt sur les huiles minérales était supprimé, les bus à batterie ne seraient plus chers que les bus diesel à l'horizon 2030/2035, c'est-à-dire que les coûts d'évitement tomberaient vers zéro (cf. figure 29).

Figure 29 : coûts de réduction par tonne d'équivalent CO₂ à court/long terme, avec/sans remboursement de l'impôt sur les huiles minérales



Graphique INFRAS.

4.6. Autres critères

La figure suivante donne un aperçu de l'évaluation qualitative des autres critères. Des explications sur les différents aspects suivent.

Figure 30 : évaluation qualitative d'autres critères

	Évaluation qualitative par rapport au bus diesel					
	Trolley à batterie	E-statique	E-dépôt	E-pile	Biodiesel	Biogaz
Exploitation/offre						
▪ Flexibilité de l'ensemble de la flotte de véhicules			*			
▪ Interventions en cas d'incidents techniques						
▪ Déploiement du personnel/planification du service			*			
▪ Planification de l'offre/flexibilité						
▪ Exploitation sur 24 heures						
▪ Utilisation de bus à double articulation						
▪ Adaptations des garages/ateliers						
Espace urbain						
Confort des passagers						
Procédure de mise en œuvre/d'approbation						

moins bon	légèrement moins bon	comme REF = diesel	légèrement mieux	mieux
-----------	----------------------	--------------------	------------------	-------

* avec une autonomie suffisante

Graphique INFRAS.

Explications sur les aspects liés à l'exploitation et à la planification de l'offre

- Flexibilité de l'ensemble de la flotte de véhicules
 - Pour les bus électriques, avantages pour le bus chargé au dépôt (par exemple, bus de remplacement, exploitation de remplacement pendant les chantiers, trajets supplémentaires, services de navette pour les événements), car il ne dépend pas d'une infrastructure de recharge basée sur les itinéraires et possède une autonomie à long terme d'au moins 350 km.
 - Le bus à pile à combustible et les bus au biodiesel/biogaz ont la même flexibilité d'exploitation que le bus diesel.
- Interventions en cas d'incidents techniques (p. ex. retards, blocages de lignes)
 - Les bus rechargés au dépôt ont des avantages car le rebroussement anticipé est plus flexible. Dans le cas du bus alimenté par biberonnage statique, des stations de recharge intermédiaires seraient nécessaires, avec les conséquences financières correspondantes ; dans le cas du trolleybus à batterie, le réseau de caténaires devrait être aligné sur celui-ci, ce qui peut signifier notamment une plus grande proportion de caténaires. Les différents niveaux de charge de la batterie et les éventuelles autonomies résiduelles du bus chargé au dépôt peuvent rendre la programmation plus difficile en cas de panne.

- Le bus à pile à combustible et les bus au biodiesel/biogaz ont la même flexibilité d'exploitation que le bus diesel.
- Déploiement du personnel/planification du service
 - Les bus rechargés au dépôt peuvent avoir un impact négatif sur les concepts de déploiement du personnel, car les concepts d'échange de véhicules entraînent davantage de services courts ou fragmentés. Cet inconvénient est relativisé sur l'axe du temps ou avec des autonomies croissantes.
- Planification de l'offre/flexibilité
 - Le bus chargé au dépôt présente des conditions préalables similaires à celles d'un bus diesel ou des alternatives non fossiles que sont la pile à combustible et le bus au biodiesel/biogaz.
 - Avec le bus alimenté par biberonnage statique, le concept de recharge conduit à une flexibilité limitée :
 - Peu approprié pour les lignes diagonales aux centres de transport public, car les recharges intermédiaires entraînent des temps d'attente plus longs dans le centre, ce qui n'est pas intéressant du point de vue du client ;
 - En cas de prolongement ou de raccourcissement de lignes (par exemple pour des offres de densification), les bornes de recharge doivent être déplacées ou des bornes supplémentaires doivent être créées.
 - Les adaptations de projet peuvent entraîner une modification des temps de rebroussement et éventuellement des temps de recharge insuffisants.
 - Le trolleybus à batterie est également limité par la caténaire, mais grâce à la possibilité d'une exploitation sans caténaire, il a plus de flexibilité en ce qui concerne les extensions de lignes/les liaisons de ligne que le bus alimenté par biberonnage statique.
- Exploitation sur 24 heures
 - Les temps de recharge nécessaires dans le garage limitent la flexibilité opérationnelle des bus rechargés au dépôt pour un fonctionnement 24 heures sur 24 (par exemple, pour les services de nuit le week-end ou les festivals urbains de plusieurs jours avec des horaires spéciaux)
 - Il est vrai que les capacités des batteries ne cesseront d'augmenter à l'avenir. Dans le même temps, cependant, le temps de recharge augmente également. Pour les bus qui ne restent que 4 à 5 heures au dépôt pendant la nuit, la fenêtre de recharge peut être trop courte. Cela entraînerait le besoin de véhicules supplémentaires, ou bien la puissance de charge dans les dépôts devrait être nettement supérieure à 150 kW. Il faut également tenir compte du préconditionnement de la batterie (environ 30 min avant le départ) et du temps de débranchement (environ 30 min après le retour). Cela réduit le temps de charge disponible d'environ 1 heure.
- Utilisation de bus à double articulation :
 - Le trolleybus à batterie offre de bonnes conditions pour l'utilisation de bus à double articulation (qui impliquerait de très grandes batteries ou une autonomie insuffisante dans le cas du bus chargé au dépôt, et des temps de recharge trop longs à l'extrémité de ligne et donc des rotations supplémentaires pour le bus alimenté par biberonnage). L'utilisation de bus à double articulation est théoriquement possible avec des bus diesel ou à gaz, mais n'a jusqu'à présent été que peu pratiquée sur le marché.
- Adaptations des garages/ateliers :
 - Les bus électriques nécessitent des infrastructures de charge correspondantes, y compris

l'alimentation électrique avec les exigences d'espace correspondantes.

- Des stations-service de biodiesel doivent être créées pour le bus biodiesel.
- Pour le bus à biogaz, des stations-service de gaz doivent être mises en place et des précautions prises dans le cadre de la protection contre les explosions.

Explications sur l'aspect de l'espace urbain

- Les caténaires et les stations de recharge peuvent interférer avec l'espace urbain dans les zones sensibles (du point de vue de la conservation des monuments, notamment dans les centres-villes). Dans les endroits particulièrement délicats, le trolleybus à batterie peut toutefois se passer de caténaire.
- Les stations de recharge pour bus alimentés par biberonnage statique posent des exigences élevées en matière d'espace dans les centres de transports publics (par exemple les gares), qui ne sont souvent pas données (plusieurs lignes arrivent généralement en même temps pour des raisons de correspondance => les synergies pour l'utilisation multiple des stations de recharge par plusieurs lignes ne sont pas données).

Explications sur l'aspect du confort des passagers

- Les trois options de bus à batterie et celle du bus à pile à combustible sont équivalentes et présentent des avantages par rapport aux modes de propulsion à moteur à combustion, grâce à une conduite plus douce et plus confortable et à une réduction du bruit intérieur. Cette évaluation est confirmée par les enquêtes menées auprès des clients dans le cadre des essais techniques du bus électrique.

Explications sur les procédures de mise en œuvre/d'approbation

- Ici, ce sont surtout les options de bus électrique avec des infrastructures de recharge dans l'espace public, c'est-à-dire le trolleybus à batterie avec des caténaires supplémentaires et le bus alimenté par biberonnage statique avec des stations de recharge le long de la ligne, qui sont évaluées négativement. En effet, les risques d'oppositions sont considérablement plus élevés pour ces options, avec des procédures d'approbation plus complexes en conséquence, par rapport aux autres options, qui prévoient uniquement des infrastructures dans les dépôts des sociétés de transport.

4.7. Besoins en alimentation électrique pour les bus à batteries

C'est surtout le bus chargé au dépôt avec recharge des batteries pendant la nuit qui nécessite des capacités de raccordement électrique plus élevées qu'aujourd'hui dans les garages de bus. Par exemple, pour charger simultanément 30 bus d'une puissance de charge de 150 kW, une puissance de connexion de 4-5 MW est nécessaire. Sur les sites typiques des dépôts de bus en ville et en région (zones commerciales/industrielles), une puissance de connexion de 5 MW est généralement possible. Les systèmes de gestion intelligente de la charge dans les garages à bus sont importants, notamment pour éviter les pics de consommation, afin de minimiser le besoin en énergie.

Les bus alimentés par biberonnage ont également besoin d'une infrastructure de recharge dans les dépôts. En raison des batteries relativement petites de ces bus, la puissance de charge requise par bus est faible. Ainsi, même une grande flotte de bus alimentés par biberonnage n'impose pas des exigences particulièrement élevées à la capacité de charge du dépôt.

Dans le cas des trolleybus avec biberonnage dynamique, le besoin de puissance de la caténaire sera environ le double de celui des trolleybus classiques, car en plus de l'électricité pour la conduite, de l'électricité est également nécessaire pour recharger la batterie. En particulier sur les sections de ligne qui sont utilisées par plusieurs lignes, il peut être nécessaire d'augmenter la puissance d'alimentation (ou de raccourcir les sections d'alimentation). En effet, la puissance injectée dépend, entre autres, de la proportion de caténaires le long d'une ligne. Si cette proportion est minimisée, les exigences en matière de puissance de charge ou d'alimentation augmentent.

4.8. Principales conclusions – résumé

La figure 31 montre le résultat de l'analyse d'impact sous la forme de profils d'évaluation pour les options de propulsion sans fossile en alternative au bus diesel. En résumé, les conclusions les plus importantes sont les suivantes :

- D'un point de vue écologique, les bus à batterie présentent des avantages évidents, tant en termes d'émissions de GES et de besoin d'énergie primaire que de polluants atmosphériques locaux et de bruit dans les quartiers. Du côté des émissions, les effets positifs en termes de pollution de l'environnement sont d'une ampleur similaire pour le trafic local et le trafic régional. Toutefois, du point de vue des immissions et de l'impact, les effets du trafic local sont plus importants que ceux du trafic régional, car un plus grand nombre de personnes en bénéficient en raison de la densité des zones d'habitation.

Les bus électriques, en particulier les bus rechargés au dépôt avec de grandes batteries, nécessitent davantage de matériaux potentiellement critiques par rapport aux bus diesel. Les plus importants sont le lithium, le cobalt, le graphite et les terres rares. Les trois premiers sont principalement contenus dans les piles, tandis que les terres rares sont surtout présentes dans les moteurs électriques. Avec les procédés de recyclage connus aujourd'hui, presque 100 pour cent de ces matériaux peuvent être récupérés.

Dans le cas des batteries de bus, on peut supposer que le recyclage aura effectivement lieu à la fin de la vie de la batterie en raison de la valeur matérielle stockée dans la batterie. Néanmoins, avec l'augmentation du nombre de véhicules alimentés par des batteries (notamment dans le secteur des voitures particulières), la demande de ces matériaux pourrait augmenter au point de provoquer des pénuries à long terme. Cependant, comme tous ces matériaux sont substituables dans les véhicules électriques, il y aura certainement des options pour faire face à toute pénurie.

Les biocarburants présentent un besoin d'énergie primaire inférieur à toutes les autres options (en utilisant la méthodologie dite « cut-off » concernant les limites du système des produits recyclés et des déchets). Toutefois, leur potentiel de réduction des GES (biogaz) est inférieur à celui des bus électriques et ils n'apportent pas d'améliorations significatives en matière d'émissions de polluants atmosphériques locaux et de bruit par rapport aux bus diesel (biogaz et biodiesel).

Le bus à pile à combustible a pratiquement les mêmes performances que le bus à batterie en termes de GES et de polluants atmosphériques locaux, mais son besoin d'énergie primaire est très élevé.

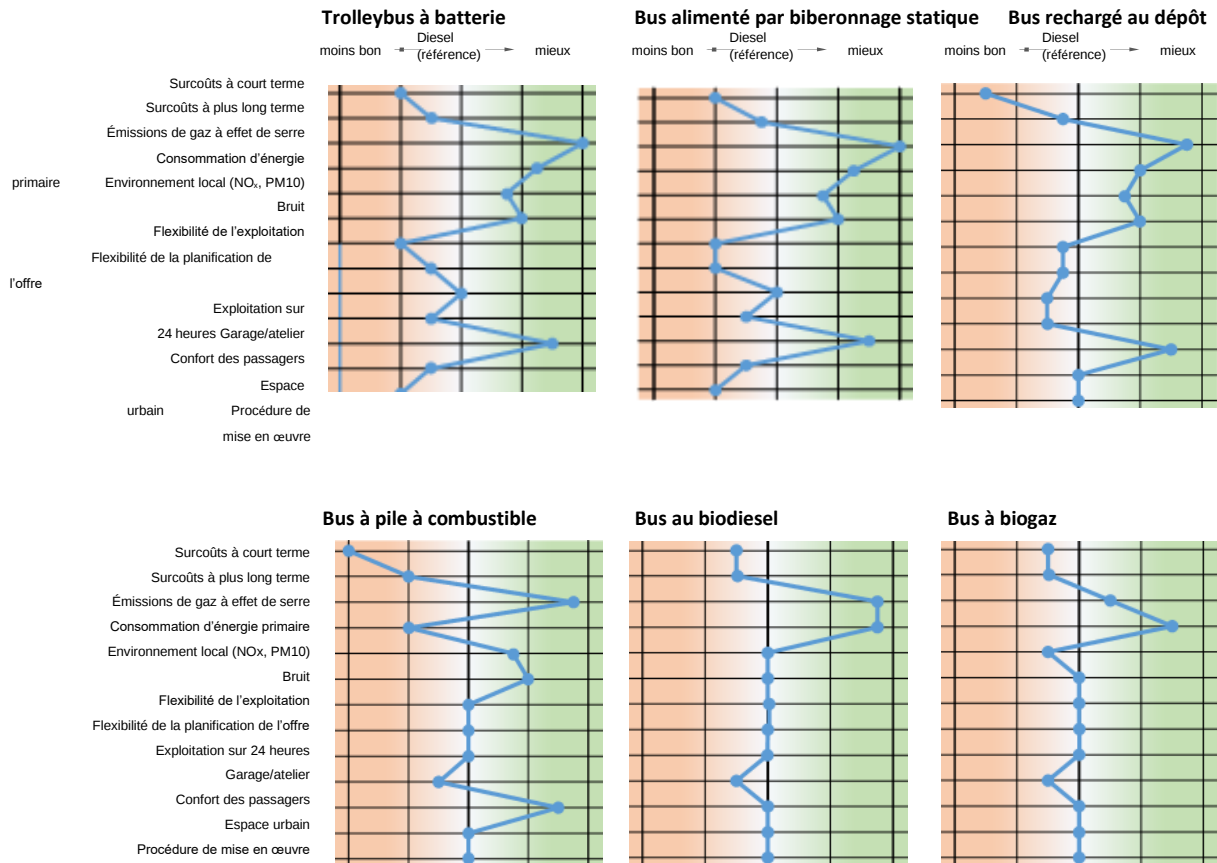
- Du point de vue des coûts, il faut faire la distinction entre la situation à court terme et les évolutions prévisibles. Les conditions-cadres des prix sont également pertinentes, qui dépendent en partie des dispositions réglementaires (par exemple, le remboursement de l'impôt sur les huiles minérales, cf. chap. 5). Dans les conditions générales actuelles, les bus à batterie sont encore comparativement chers à court terme et le potentiel d'utilisation pratique est encore limité (surtout pour le bus chargé au dépôt). À plus long terme, toutefois, les bus à batterie pourraient être les options les plus rentables, en fonction des conditions d'utilisation et des hypothèses relatives à la durée de vie des batteries. La suppression du remboursement de l'impôt sur les huiles minérales aurait également un effet positif en faveur des bus à batterie.

À court terme, les biocarburants sont généralement les options les moins chères. Toutefois, la question se pose de savoir s'il faut passer à ces options durant la période de transition nécessaire aux bus à batterie pour déployer tout leur potentiel (installation de stations-service de biodiesel ou de biogaz, adaptation des ateliers d'entretien/formation du personnel à cette technologie de transition). Un autre argument contre les biocarburants est leur disponibilité limitée, notamment pour les biocarburants produits en Suisse. Le biodiesel CH issu d'huiles de cuisson usagées, par exemple, ne suffira probablement pas pour tous les bus des transports publics en Suisse et ne pourrait donc être une option que sur certaines lignes. En outre, la question se pose également de savoir si, dans une perspective globale allant au-delà des transports publics, l'utilisation des biocarburants devrait être prioritaire dans les domaines où d'autres alternatives de réduction des émissions de gaz à effet de serre font actuellement défaut, par exemple dans le trafic routier de marchandises à longue distance, les bateaux de haute mer ou le trafic aérien ; cf. également les commentaires de l'annexe A3.1 à partir de la page 217).

Il en va de même pour les bus hybrides plug-in avec biocarburants en ce qui concerne leur utilité en tant que technologie de transition.

Du point de vue du coût global et de l'environnement, l'accent devrait être mis sur les **bus électriques en tant qu'alternative sans fossile aux bus diesel**, et ce, dès le court/moyen terme, mais uniquement pour les utilisations adaptées du point de vue du coût. À plus long terme, les développements prévisibles des bus à batterie, tant en termes de technologie que de coût, augmenteront considérablement le potentiel d'utilisation appropriée dans le trafic local et régional. Cela permet également de réduire de manière significative les coûts d'évitement du CO₂ à court terme, comparativement élevés, des bus électriques à des valeurs inférieures à 200 francs par tonne de CO₂. Dans le cas d'une suppression du remboursement de l'impôt sur les huiles minérales, ils tombent même vers zéro – dans des conditions d'exploitation idéales. En ce qui concerne les coûts d'évitement du CO₂ encore élevés, surtout à court terme, il faut tenir compte du fait que les bus électriques permettent d'éviter d'autres coûts externes dans les domaines du bruit et des polluants atmosphériques, contrairement aux bus fonctionnant aux biocarburants. Les surcoûts ne doivent donc pas être considérés uniquement par rapport à la réduction du CO₂. Le choix du bus électrique – trolleybus à batterie, bus chargé au dépôt, bus alimenté par biberonnage statique ou bus à pile à combustible, par exemple si de longues distances d'exploitation de plus de 400-500 km par jour sont requises –, dépend dans chaque cas des conditions environnementales spécifiques d'une ligne ou d'un réseau de lignes ainsi que des conditions locales. Cela ne peut et ne doit pas être précisé dans cette étude de base.

Figure 31 : profils d'évaluation des options de propulsion sans fossile étudiées



Graphique INFRAS (version corrigée du 08.04.2021 : biodiesel avec évaluation positive pour la consommation d'énergie primaire).

5. Cadre réglementaire, financement des transports publics et possibilités de financement

5.1. Remarques préliminaires

Les instruments de soutien peuvent fournir des incitations du côté de la demande (« *pull-effect* ») ou du côté de l'offre (« *push-effect* »). L'étude de base se concentre – au sens du postulat – sur les soutiens du côté de la demande et notamment sur les mesures financières (tableau 11). En termes de mesures financières, nous faisons la distinction entre les mesures directes et indirectes. Par mesures financières directes, nous entendons les subventions ou les contributions (au sens de revenus) ainsi que les prêts²⁸. Les mesures financières indirectes peuvent être, par exemple, des réductions de taxes ou de prélèvements et des remboursements ou des cautionnements qui entraînent une réduction des coûts.

Les mesures de soutien financier du côté de la demande peuvent poursuivre divers objectifs :

- Promouvoir le développement et l'essai de nouvelles technologies de véhicules efficaces en énergie et sans énergie fossile, ainsi que des infrastructures de ravitaillement et de recharge correspondantes (à l'interface entre les fabricants et les exploitants)
- Promouvoir le déploiement commercial accéléré des nouvelles technologies automobiles, c'est-à-dire soutenir leur introduction et leur croissance sur le marché (diffusion), dans le but de
 - augmenter les impacts environnementaux (par exemple, réduction des émissions de gaz à effet de serre),
 - réduire les coûts unitaires des nouvelles technologies grâce aux économies d'échelle,
 - donner l'exemple en matière de marchés publics.

²⁸ Des mesures tarifaires visant à augmenter les revenus des entreprises de transport concessionnaires (ETC) seraient également envisageables. Comme l'autonomie tarifaire relève des ET, ces mesures ne sont pas prises en compte dans cette étude de base.

Tableau 11 : systématisation des mesures de soutien de la demande en matière de transports publics

Type de mesure	Catégorie	Exemples
Mesures financières	directes	- Subventions²⁹ des pouvoirs publics (aides financières³⁰ et indemnités³¹) - Contributions d'encouragement des institutions privées - Prêts (remboursables)³²
	indirectes	- Cautionnements (pour réduire les coûts d'intérêt) - Allègements ou remboursements de taxes ou d'impôts (liés à l'entreprise, au véhicule ou au service), par exemple, exonération de l'impôt sur les véhicules automobiles pour les véhicules électriques, remboursement de l'impôt sur les huiles minérales pour les ETC - Services et prestations en nature gratuits ou à prix réduit (par exemple, conseils)
Mesures non financières	Réglementation et normes	- Établissement de normes environnementales pour les services de transport de voyageurs (commanditaire) - Établissement de normes environnementales pour l'entreprise (par le propriétaire) - Exigences relatives à l'acquisition de moyens d'exploitation par la loi, le propriétaire ou le commanditaire - Spécification des critères d'attribution pour les marchés publics
	Information, communication et coopération	- Campagnes d'information et de sensibilisation - Offre de formations continues - Promotion de l'échange d'expériences (par exemple, CDCTP) - Organisation de courses d'essai avec des véhicules d'autres ETC

CDCTP : Conférence des délégués cantonaux des transports publics, ETC : entreprises de transport concessionnaires, TP : transports publics, SMQ TRV : système de mesure de la qualité dans le trafic régional de voyageurs.

Tableau INFRAS.

Le postulat 19.300 se concentre sur la mise en place accélérée de bus climatiquement neutres dans tout le pays. Dans ce contexte, les conditions-cadres actuelles en matière de financement et de subventions pour les véhicules sans énergie fossile et les infrastructures de recharge correspondantes pour la Suisse (section 5.2) et certaines études de cas à l'étranger (section 5.2.4) sont résumées.

²⁹ Les subventions sont des aides financières et des indemnités.

³⁰ Les aides financières sont des avantages monnayables accordés à des bénéficiaires extérieurs à l'administration fédérale pour promouvoir ou maintenir l'accomplissement d'une tâche choisie par le bénéficiaire. Les avantages monnayables sont notamment les prestations en espèces non remboursables, les conditions préférentielles de prêts, les cautionnements et les services gratuits ou à prix réduit ainsi que les prestations en nature (art. 2 al. 1 LSu, RS 616.6).

³¹ Les indemnités sont des prestations accordées à des bénéficiaires extérieurs à l'administration fédérale pour atténuer ou compenser des charges financières découlant de l'accomplissement de tâches prescrites par le droit fédéral ou de tâches de droit public déléguées par la Confédération (art. 3, al. 2 LSu, RS 616.1).

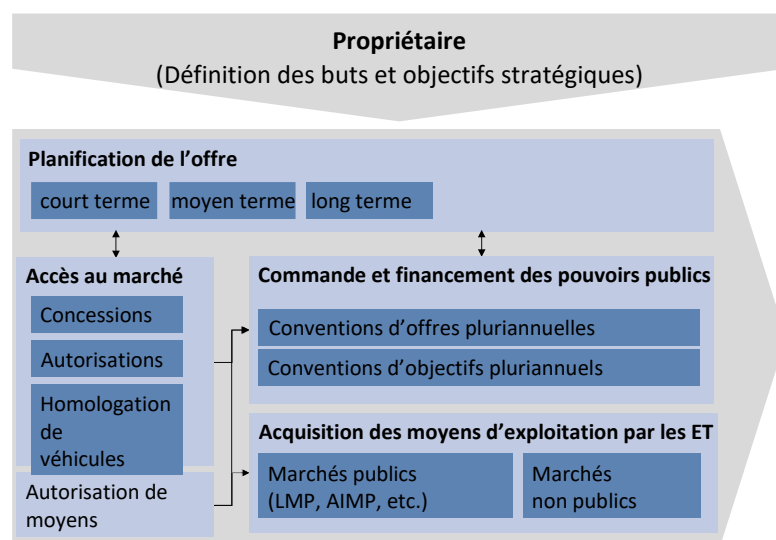
³² Les prêts du secteur public sont considérés comme une aide financière s'ils sont associés à des avantages monnayables (par exemple, un taux d'intérêt inférieur au niveau du marché).

5.2. Conditions cadres actuelles ainsi que financement et subventions en Suisse

5.2.1. Cadre réglementaire des entreprises de transport et financement des transports publics

Les principaux processus dans les transports publics commandés et financés sont résumés dans la figure 32 et brièvement décrits dans ce chapitre. Il convient de faire une distinction fondamentale entre les conditions-cadres fondées sur les bases juridiques et les dispositions de l'autorité concédante et des commanditaires de services de transport public d'une part (vue de la garantie), et les exigences du propriétaire pour une entreprise de transport d'autre part (vue du propriétaire). Même si cette étude se concentre sur le financement et l'acquisition de bus dans le secteur du transport de voyageurs au bénéfice d'une indemnisation, une entreprise doit également tenir compte du point de vue du propriétaire et de ses objectifs stratégiques, notamment lorsqu'elle prend des décisions d'investissement importantes. Par exemple, les exigences financières du propriétaire concernant l'endettement maximal d'une entreprise de transport peuvent avoir une influence sur l'acquisition de moyens d'exploitation et donc aussi sur la conversion de bus à motorisation alternative.

Figure 32 : aperçu des processus et des conditions cadres pour le financement des transports publics



LMP : loi fédérale sur les marchés publics ; AIMP : Accord intercantonal sur les marchés publics.

Graphique INFRAS.

Accès au marché et homologation des véhicules

Les entreprises de transport par route de voyageurs doivent obtenir une autorisation d'admission de l'Office fédéral des transports (OFT), conformément à la loi fédérale sur **les entreprises de transport par route** (LEnTR) du 20 mars 2009. Elle est accordée si l'entreprise satisfait aux critères d'honorabilité, a la capacité financière requise et a la capacité professionnelle requise.

En vertu de l'art. 81a de la Constitution fédérale, la Confédération et les cantons veillent à ce qu'une offre suffisante de transports publics par rail, route, voie navigable et installations à câbles soit proposée dans toutes les régions du pays. En vertu de l'art. 92 de la Constitution fédérale, la Confédération a le droit exclusif d'assurer le transport régulier et professionnel de voyageurs (régale du transport de voyageurs). Elle peut octroyer aux personnes physiques et morales une concession pour le transport professionnel et régulier de voyageurs en Suisse (**concession de transport de voyageurs**). La loi sur le transport de voyageurs (LTV) du 20 mars 2009 régit le transport de voyageurs soumis à la régale. L'ordonnance sur le transport de voyageurs (OTV) du 4 novembre 2009 règle les détails. Les concessions sont généralement valables pendant 10 ans (dans le cas du transport par bus)³³. Du point de vue des entreprises de transport concessionnaires (ETC), la concession offre une protection des investissements, car la durée de la concession dépasse nettement la durée de la convention d'offres pour les services de transport sans appel d'offres. La concession pour le transport régulier de voyageurs ne constitue pas une allocation de financement. Cependant, elle constitue la base de la délimitation des zones de marché et donc de la responsabilité respective de la commande et du financement des offres de transport de voyageurs.

L'OFT délivre une autorisation d'exploitation sous concession aux **véhicules routiers** (ainsi qu'aux bateaux) et les cantons délivrent l'admission supplémentaire requise pour la circulation routière (art. 25 OTV).

Procédure d'établissement de l'horaire et planification de l'offre

Avec la concession pour le transport régulier de voyageurs, les entreprises de transport sont tenues d'établir et de publier des horaires conformément à l'ordonnance sur les horaires (OH). L'horaire définit l'offre de transport public contraignante et coordonnée au niveau national pour une période donnée, qui dure généralement 2 ans.

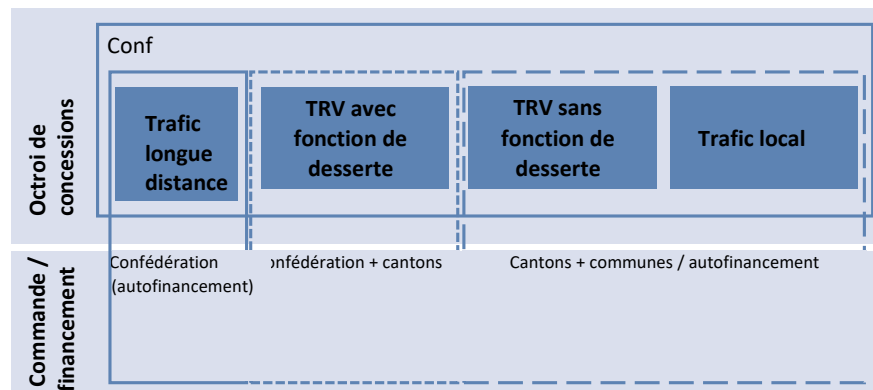
Sur la base de la conception du trafic longue distance des entreprises concernées, le trafic donnant droit à une réduction doit être planifié. Dans le cadre de la procédure d'établissement de l'horaire, les cantons consultent les parties intéressées. Les commanditaires des offres au bénéfice d'une indemnisation décident des offres à inclure dans l'horaire.

³³ Dans le rapport explicatif de la réforme du TRV, l'harmonisation de la durée de la concession (12 ans au lieu de 10) avec les autres procédés était prévue (DETEC 2019). En revanche, une modification du droit des concessions n'a pas été envisagée dans le cadre de la réforme du TRV. Une évaluation du droit sur les concessions est actuellement en cours pour le compte de l'OFT.

Commande et financement d'offres de transport (desserte de base)

Les responsabilités concernant l'octroi de concessions et la commande/le financement diffèrent (figure 33). La commande et le financement des offres de transport sont partagés entre la Confédération, les cantons et les communes. Étant donné que les cantons cofinancent le TRV ainsi que, en règle générale, le trafic local et le TRV sans fonction de desserte et qu'ils coordonnent la procédure d'établissement de l'horaire de la part du commanditaire dans les transports publics, ils ont un rôle central à jouer.

Figure 33 : responsabilités pour l'octroi de concessions et pour la commande / le financement dans les transports publics



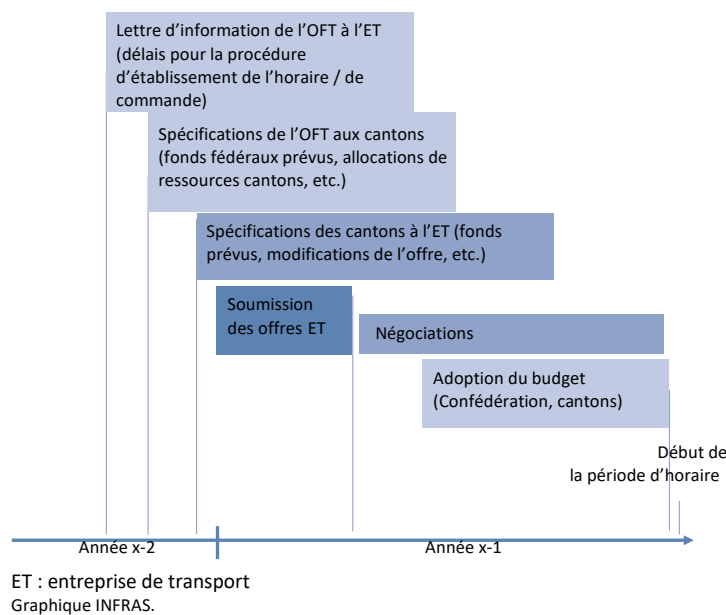
Graphique INFRAS.

La Confédération prend intégralement en charge les coûts non couverts planifiés des **prestations d'importance nationale** qu'elle commande (art. 28, al. 3 LTV). L'offre minimale du trafic longue distance est actuellement déterminée au moyen d'une concession fédérale pour transport de voyageurs et n'est pas financé par des fonds publics (autofinancement). À cet égard, le gouvernement fédéral ne commande pas de trafic longue distance. Avec la concession de transport de voyageurs pour le trafic longue distance, cependant, l'OFT impose non seulement le droit mais aussi l'obligation, y compris la définition d'une offre et d'une qualité minimales.

Pour la prestation du **transport régional de voyageurs avec fonction de desserte** qu'ils commandent conjointement, la Confédération et les cantons (commanditaires) indemnisent les entreprises pour les coûts non couverts selon les comptes planifiés (art. 28, al. 1, LTV). La demande est le principal facteur pris en compte pour déterminer l'offre de transport. Les autres critères sont une desserte de base appropriée, les enjeux en matière de politique régionale, d'aménagement du territoire et de protection de l'environnement, et les intérêts des personnes handicapées (art. 31a, al. 3 LTV). Si les entreprises parviennent à réaliser un produit excédentaire grâce à des gains d'efficacité ou à une augmentation de la demande, l'ET attribue au moins deux tiers de cet excédent à la réserve spéciale pour couvrir les déficits futurs des secteurs de transport au bénéfice d'une indemnisation. Si la réserve spéciale des secteurs de transports s'élève à 25 pour cent du chiffre d'affaires annuel des secteurs de transport au bénéfice d'une indemnisation ou si elle s'élève à 12 millions de francs, le bénéfice est à la libre disposition de l'entreprise.

La **procédure de commande du TRV** est basée sur la procédure d'établissement de l'horaire et est donc généralement effectuée tous les deux ans. Les cantons sont responsables de la procédure de commande du TRV, un canton se chargeant de la coordination. Les conventions d'offre sont conclues pour deux ans, certains cantons s'engageant à fournir des ressources financières sous condition sur la base du processus budgétaire annuel. En prenant en compte les directives de la Confédération et des cantons concernant l'horaire et les fonds disponibles attendus, les ET préparent des offres pour chaque ligne. Le processus prend environ 1,5 an jusqu'au début de l'exploitation au moment du changement d'horaire (figure 34). L'ordonnance sur l'indemnisation du trafic régional de voyageurs (OITRV) du 11 novembre 2009 fixe les détails de la procédure de commande du TRV.

Figure 34 : déroulement de la procédure de commande du TRV



Depuis 2018, les fonds TRV de la Confédération sont fixés avec un crédit d'engagement de quatre ans (conversion de l'enveloppe financière). Le prêt est principalement utilisé pour financer les prestations actuelles. Le montant du crédit d'engagement est donc basé sur la tenue à jour des fonds restants de l'ancien exercice budgétaire, en tenant compte des changements significatifs. Pour le **crédit d'engagement TRV de la Confédération pour les années 2022-2025**, cela signifie que les indemnités prévues pour l'année 2021 forment le point de départ. Les changements significatifs ont été estimés sur la base d'une enquête auprès d'une sélection d'ET sur des projets, d'une évolution générale des indemnités sans projets et d'une prévision d'inflation. Le surcroît de dépenses pour le passage aux bus à motorisation alternative dans le TRV n'a pas été directement pris en compte. D'après le retour de l'OFT à ce sujet, on suppose que les fonds supplémentaires demandés (sans projets) d'environ 10 à 11 millions de francs par an devraient également être suffisants pour le passage aux bus sans énergie fossile et efficaces en énergie, étant donné que l'hypothèse retenue est celle d'une mise en œuvre progressive. Une éventuelle extension du champ d'application est à examiner. Selon les informations de l'OFT, il ne s'agit toutefois pas d'une extension du champ d'application au trafic local.

Dans le cadre de la consultation sur la **réforme prévue du TRV**, la Confédération a proposé deux variantes : « optimisation » et « séparation partielle » (DETEC 2019). Sur la base des résultats de la procédure de consultation, la Confédération a décidé de poursuivre la variante « optimisation » (OFT 2020c). Il s'agit de définir les intentions financières de la Confédération pour quatre années supplémentaires en plus du crédit d'engagement de quatre ans et de préciser les critères de cofinancement. Les conventions d'objectifs doivent être renforcées et un étalonnage national des performances doit être introduit, tandis que de nouvelles possibilités de financement fédéral pour la promotion de l'innovation doivent renforcer le développement du secteur. La variante « séparation partielle », dans laquelle la Confédération aurait renoncé à la commande conjointe des lignes de bus du TRV ou aurait transféré cette compétence aux cantons et versé directement à ces derniers une contribution forfaitaire indexée pour le financement, est abandonnée. Le Conseil fédéral a chargé le DETEC d'élaborer le message d'ici à mars 2021.

Sur la base de l'art. 33, al. 2 Ltv et des art. 24 à 26 OTV, la Confédération et les cantons peuvent conclure avec les entreprises de transport des **conventions d'objectifs** pluriannuelles définissant à moyen ou long terme les objectifs de prestation en termes de qualité, de quantité, de recettes et de coûts et prévoir un système de bonus-malus (cf. également OFT 2016). Les conventions d'objectifs peuvent porter plusieurs lignes ou l'ensemble des lignes de l'ET et sont conclues pour au moins deux ans. L'instrument de la convention d'objectifs doit être renforcé (DETEC 2019). Les objectifs qualitatifs sont basés sur le **système de mesure de la qualité (SMQ) du TRV** et sur les **sondages cantonaux de satisfaction des clients**. Le SMQ TRV définit 15 critères pertinents pour l'évaluation. Ceux-ci prennent en compte la qualité perçue par les usagers des transports publics en termes d'information au client (véhicule, arrêt), de fonctionnement de l'équipement, d'ordre, de propreté, d'absence de dégâts, de compétence et comportement du personnel de conduite. L'aspect écologique d'un véhicule n'est donc pas enregistré et évalué. La prise en compte des objectifs environnementaux dans la définition des offres et les indemnités varient donc beaucoup d'un canton à un autre (cf. section 5.2.3).

Les offres du **TRV sans fonction de desserte et du trafic local** sont exclues des prestations fédérales (art. 28 al. 2 Ltv) ; elles sont commandées et financées par les cantons et les communes. La commande et le financement du TRV sans fonction de desserte et du trafic local sont réglés dans les lois cantonales correspondantes sur les transports publics. En principe, les procédures de commande sont basées sur la procédure d'établissement de l'horaire. En l'absence de réglementation cantonale, les règles fédérales relatives à la procédure de commande et aux conventions d'objectifs s'appliquent également de manière subsidiaire aux offres de transport commandées par les seuls cantons (DETEC 2019). La répartition des coûts entre le canton et les communes est réglementée de manière très différente. Il existe différents modèles :

- Le canton commande et finance l'offre de desserte de base (sans contribution des communes), les communes étant associées à la planification de l'offre (programme de transports publics).
- Le canton et les communes se partagent les coûts du TRV et du trafic local selon une clé de répartition des coûts ou selon une participation forfaitaire définie à l'avance (p. ex. 50 pour cent).
- Le canton commande l'offre du TRV, les communes l'offre du trafic local, une répartition mutuelle des coûts étant possible.

Le tableau 12 montre le montant du financement public dans les transports publics et sa répartition par collectivité (Litra 2019). Les cantons jouent un rôle central en tant que commanditaires des offres du TRV et du trafic local.

Tableau 12 : financement des transports publics par les pouvoirs publics

Zone de marché	Collectivité	Moyens financiers (millions de CHF) ¹		Part en %
Trafic régional	Confédération	969	969	26%
	Cantons	977	1'940	51%
Trafic local	Cantons	963		
	Communes	855	855	23%

¹ État : 2016 (communes), 2017 (cantons), 2018 (Confédération).

Tableau INFRAS. Source : Litra 2019, p. 31.

Acquisition des moyens d'exploitation par les ETC dans le TRV

Les **coûts subséquents des investissements dans le TRV** peuvent être intégrés dans les comptes prévisionnels d'une offre de transport si la Confédération et les cantons ont donné leur accord avant que l'investissement soit effectué (art. 19 al. 1 OITRV). L'autorisation est obligatoire pour le matériel roulant (rail), les ateliers et dépôts ferroviaires (du secteur TRV) ainsi que les installations de transport à câbles (TRV). Pour les autres moyens d'exploitation tels que les bus et les dépôts de bus, l'autorisation explicite n'était pas obligatoire jusqu'à présent, mais était déterminée au cas par cas. Ce point est vérifié dans le cadre de la procédure de commande sur la base du plan d'investissement (OFT 2017a). Selon le retour de l'OFT, il est maintenant prévu d'exiger de manière générale une autorisation OITRV pour les véhicules routiers à motorisation alternative afin que les coûts puissent être inclus dans les offres de TRV. Les directives de l'OFT seront adaptées en conséquence.

Pour le financement des investissements du TRV, la Confédération peut accorder une garantie fédérale dans le cadre des crédits alloués (art. 34 OITRV). Le **cautionnement solidaire de la Confédération** est accordé sur demande de l'ETC, à condition qu'une autorisation OITRV existe pour l'investissement et qu'une économie d'intérêts significative soit réalisée (OFT 2017a)³⁴. Le crédit-cadre correspondant expire fin 2020 et doit être renouvelé sur la base des expériences passées (IWSB et HSLU 2018). En juin 2020, le Conseil fédéral a décidé de prolonger de dix ans le crédit-cadre de cautionnement qui arrive à échéance (OFT 2020b).

Les entreprises de transport procèdent à l'acquisition des véhicules. Les ET qui reçoivent des indemnités pour l'exécution de tâches publiques (dans ce cas, le transport de voyageurs dans les transports publics) sont soumises au **droit des marchés publics** (voir parenthèse).

Parenthèse : droit des marchés publics

En Suisse, le droit des marchés publics est basé sur l'Accord sur les marchés publics (Organisation mondiale du commerce - Accord sur les marchés publics, AMP-OMC)³⁵. La Suisse a conclu un accord avec l'UE sur certains aspects des marchés publics en 1999³⁶.

La base légale de la Confédération est la loi fédérale sur les marchés publics (LMP) du 16 décembre 1994³⁷. La loi fédérale révisée sur les marchés publics du 21 juin 2019 est entrée en vigueur le 1^{er} janvier 2021. La LMP régit la procédure d'adjudication des marchés publics de fournitures, de services et de travaux de construction au niveau fédéral. Elle stipule actuellement que l'offre la plus avantageuse économiquement se voit attribuer le marché. Il convient désormais d'accorder plus d'importance aux critères d'adjudication performanciers et de renforcer la concurrence en matière de qualité par rapport à la concurrence sur les prix, ainsi que la durabilité.

³⁴ Des prêts sont également accordés par Eurofima pour l'acquisition de matériel roulant pour le transport ferroviaire par CFF SA.

³⁵ RS 0.632.231.422.

³⁶ RS 0.172.052.68.

³⁷ RS 172.056.1. La loi fédérale révisée sur les marchés publics du 21 juin 2019 est entrée en vigueur le 1^{er} janvier 2021.

Au niveau cantonal, les règles d'adjudication des marchés des accords internationaux sont fixées dans l'Accord intercantonal sur les marchés publics (AIMP) du 15 mars 2001. L'AIMP en tant que règlement-cadre a également été révisé en 2019 et aligné sur la loi fédérale révisée³⁸. Les marchés publics devraient également être davantage axés sur la qualité au niveau cantonal. La durabilité est un critère d'adjudication possible. Les cantons édictent des dispositions d'exécution.

Avec la révision du droit des marchés publics, l'aspect de la durabilité (économique / écologique / sociale) a gagné en importance. Les ET peuvent définir les critères d'adjudication correspondants et déterminer leur pondération dans le cadre de leurs appels d'offres pour leurs achats de véhicules. À notre connaissance, il n'existe pas en Suisse de réglementation des marchés publics telle que celle prévue par la directive européenne sur les véhicules propres concernant l'acquisition de bus (cf. chapitre 5.3.1).

Promotion de l'innovation

L'OFT soutient la recherche et l'innovation dans le domaine des transports publics, du transport de marchandises et des infrastructures ferroviaires à hauteur de 10 à 15 millions de francs suisses par an, afin de rendre leurs systèmes encore plus efficaces. Dans le cadre du crédit d'engagement TRV pour les années 2022-2025, l'OFT prévoit un financement annuel d'environ 5 millions de francs pour la promotion des innovations dans les transports publics (OFT 2020a).

La Confédération peut accorder des aides financières (contributions, prêts sans intérêts) pour l'acquisition de véhicules et l'aménagement d'installations et d'équipements afin de promouvoir des solutions innovantes (art. 31, al. 2, LTV). L'accent est mis sur la réduction des coûts et la valeur ajoutée pour les clients (OFT 2017b). Les innovations sont considérées dans ce contexte sur la base de l'art. 2, al. b de la loi fédérale sur l'encouragement de la recherche et de l'innovation (LERI) du 14 décembre 2012, c'est-à-dire comme le développement de nouveaux produits, procédés, processus et services pour l'économie et la société au moyen de la recherche et la mise en valeur de ses résultats (OFT 2017b). Les mesures visant à promouvoir les essais pilotes de produits existants et la pénétration du marché pour réaliser des économies d'échelle et accroître l'acceptation du marché sont exclues selon cette définition.

D'autres mesures de soutien financier sont résumées au chapitre 5.2.2.

³⁸ Révision totale de l'Accord intercantonal sur les marchés publics (AIMP) du 15 novembre 2019, message type, version 1.0 du 16 janvier 2020. Le processus de ratification dans les cantons a commencé. L'AIMP révisé entrera en vigueur dès que deux cantons y auront adhéré.

Exonérations et allègements fiscaux nationaux pour les ETC

Dans le secteur des transports, les activités concessionnaires sont **exonérées de l'impôt fédéral direct** si elles sont commandées et indemnisées (art. 56 let. d LIFD³⁹).

L'impôt sur les huiles minérales est remboursé en tout ou en partie pour les carburants utilisés par les ET autorisées par la Confédération (art. 18 al. 1bis Limpin). Le Conseil fédéral a stipulé que le **remboursement de l'impôt sur les huiles minérales** pour les ETC est différencié pour des raisons écologiques (art. 49 Oimpin). L'ordonnance du DFF sur les allègements fiscaux pour l'impôt sur les huiles minérales du 22 novembre 2013 en fixe les modalités (tableau 13). En moyenne, les ETC ont reçu des remboursements d'impôt sur les huiles minérales pour un total d'environ 70 millions de francs suisses par an. CarPostal SA en représente environ un tiers⁴⁰.

Tableau 13 : remboursement de l'impôt sur les huiles minérales pour les trajets effectués par des véhicules routiers destinés au transport de voyageurs sous concession fédérale

Véhicule	Remboursement
Véhicules routiers sans filtre à particules ni système équivalent	Surtaxe sur les huiles minérales (30 centimes/litre de diesel)
Véhicules routiers avec filtre à particules ou système équivalent ou véhicules répondant aux normes EURO IV, EURO V et EEV sans filtre à particules ni système équivalent qui, selon le permis de circulation, ont été admis pour la première fois à la circulation au plus tard le 31 décembre 2007	Surtaxe sur les huiles minérales et en partie impôt sur les huiles minérales (59 centimes/litre de diesel)

EEV : *Enhanced environmentally friendly vehicle*, ETC : entreprises de transport concessionnaires

Tableau INFRAS. Source : ordonnance du DFF sur les allègements fiscaux pour l'impôt sur les huiles minérales du 22 novembre 2013 (état le 1^{er} décembre 2019), RS 641.612

Les remboursements forfaitaires de l'impôt sur les huiles minérales favorisent l'acquisition et l'utilisation de véhicules diesel et constituent donc une mauvaise incitation à la promotion de véhicules respectueux de l'environnement. Dans le cadre de la révision totale de la loi sur le CO₂, une adaptation du remboursement de l'impôt sur les huiles minérales pour les ETC est en discussion (modification de la loi sur l'impôt sur les huiles minérales). Selon le dernier dépliant publié, la commission de l'environnement, de l'aménagement du territoire et de l'énergie du Conseil des États (CEATE) a préconisé en août 2020 la suppression du remboursement à partir de 2026 pour les véhicules des ETC dans le trafic local et à partir de 2030 pour tous les véhicules utilisés dans le transport concessionnaire⁴¹. Si les fonds économisés par la Confédération grâce à la suppression du remboursement de l'impôt sur les huiles minérales devaient être affectés à la promotion de systèmes de propulsion neutres en CO₂ et renouvelables dans les transports publics routiers, un nouvel instrument de promotion serait créé.

³⁹ RS 642.11.

⁴⁰ Interpellation Grossen du 22.03.2019 « Remboursement de l'impôt sur les huiles minérales. Va-t-on dans la bonne direction ? », 19.3375. ⁴¹ Révision totale de la loi sur le CO₂ pour la période postérieure à 2020 (17.071n), dépliant 2020 III S, <https://www.parlament.ch/centers/eparl/curia/2017/20170071/S4%20D.pdf>.

En principe, il faut noter que la suppression du remboursement de l'impôt sur les huiles minérales pour éliminer cette incitation inopportune conduit à une réduction des surcoûts des bus sans fossile par rapport aux bus diesel (référence), c'est-à-dire que les bus sans fossile sont moins chers par rapport à la référence et deviennent plus attractifs. Mais dans le même temps, les coûts non couverts des exploitants – en supposant des tarifs constants et donc des recettes pour les entreprises de transport – ainsi que le besoin en indemnisation augmentent également (effet de base au début). Les recettes supplémentaires du gouvernement fédéral provenant de l'impôt sur les huiles minérales sont en grande partie affectées à des fins spécifiques.

Les ETC en tant qu'entreprises publiques et les objectifs du propriétaire

Les entreprises de transport par route concessionnaires sont à la fois des entreprises privées et des entreprises publiques dont le capital est entièrement ou majoritairement public. En outre, les entreprises de transport peuvent faire partie de l'administration (par exemple, Verkehrsbetrieb Zürich).

La Confédération, les cantons et les communes, en tant que propriétaires des entreprises de transport par route, ont la possibilité de définir des objectifs stratégiques pour l'entreprise concernée et de fixer les objectifs correspondants.

La définition d'objectifs à la fois par le garant (commanditaire de prestations) et par le propriétaire des entreprises peut conduire à des objectifs contradictoires et à des incitations inopportunes. Par exemple, les directives sur l'endettement maximal d'une entreprise de transport peuvent avoir un impact sur les décisions d'investissement. Dans l'idéal, elles sont donc coordonnées entre elles.

5.2.2. Mesures d'encouragement nationales et autres instruments de financement fédéraux

Outre le financement régulier du TRV et du trafic local, l'acquisition de véhicules et d'infrastructures de recharge est encouragée par des mesures nationales supplémentaires.

Mesures de la Confédération

Sur la base de l'art. 49, al. 1 de la loi sur l'énergie du 26 juin 1998⁴², l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) encourage le développement orienté vers le marché de technologies et de solutions innovantes pour une utilisation économique et efficace de l'énergie et l'utilisation des énergies renouvelables par le biais du **programme de soutien aux projets pilotes et de démonstration et aux projets phares (programme P+D+L)**. Le programme P+D+L permet de tester et de présenter de nouvelles technologies et solutions afin de se faire une idée de leur faisabilité, de leur fonctionnalité technique, de leur applicabilité et de leur viabilité économique (OFEN 2016, OFEN 2019). Le budget de 30 à 35 millions de francs par an disponible pour la promotion des projets P+D+L de 2015 à 2017 n'a pas pu être entièrement utilisé. En 2018, l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) dispose de 24 millions de francs pour la promotion des projets pilotes et de démonstration et des projets phares (projets P+D+L) (INFRAS 2018). Les projets sont censés avoir contribué à l'introduction (accélérée) sur le marché de technologies innovantes.

⁴² RS 730.0.

Tableau 14 : promotion des projets pilotes et de démonstration et des projets phares (OFEN)

Programme d'encouragement	Promotion des projets pilotes et de démonstration et des projets phares
Soutien	Office fédéral de l'énergie
Durée	Depuis 2013, demandes toujours possibles
But et finalités	Promouvoir le développement et l'essai de technologies énergétiques innovantes pour l'utilisation économique et efficace de l'énergie ou l'utilisation d'énergies renouvelables
Objet	▪ Installations et projets pilotes qui servent à tester sur le plan technique des systèmes, méthodes ou concepts énergétiques et qui sont réalisés à une échelle permettant de déterminer des données scientifiques, techniques, économiques et sociétales ▪ Installations et projets de démonstration qui servent à prouver la fonctionnalité dans un environnement orienté vers marché et qui permettent une évaluation technique, économique et sociétale complète en ce qui concerne l'introduction effective sur le marché de technologies ou de solutions énergétiques innovantes ▪ Les installations et projets de démonstration peuvent être reconnus par l'OFEN comme des projets phares s'ils servent à faire connaître des concepts et des technologies nouveaux et pionniers et qu'ils favorisent le dialogue sur l'énergie au sein de la population générale.
Destinataires	Entreprises privées et publiques, associations commerciales et professionnelles, hautes écoles, instituts de recherche, organisations non gouvernementales, pouvoirs publics (cantons, villes et communes) ou communautés de travail composées de plusieurs des organisations ou institutions susmentionnées et qui participent à la réalisation du projet et/ou à son financement
Type et portée	▪ Les aides financières pour les projets pilotes et de démonstration représentent généralement 40 pour cent des coûts imputables du projet (60 pour cent dans des cas exceptionnels) ▪ Coûts imputables : ▪ Surcoûts du projet par rapport aux technologies traditionnelles disponibles sur le marché ▪ Coûts d'investissement (honoraires, matériel, y compris les appareils de mesure, les équipements de laboratoire et les consommables techniques) et frais d'exploitation pendant la durée de vie des installations
Procédure	Financement sur demande (approche bottom-up) ou appels à projets par l'OFEN (approche top-down)
Directive sur le financement et autres documents	OFEN 2019 : Vollzugsweisung zur Einreichung und Evaluation von Gesuchen um Finanzhilfe für Energieforschungs-, Pilot- und Demonstrationsprojekte, Version 17.12.2019.

Tableau INFRAS.

La Confédération encourage la **recherche et le développement ainsi que l'innovation dans les transports publics**. Les innovations dans le domaine du transport régional de voyageurs peuvent être financées par le crédit fédéral TRV (cf. chap. 5.2.1). Dans le cadre de la stratégie énergétique 2050 de la Confédération, l'OFT a lancé le programme « Stratégie énergétique 2050 dans les transports publics (SETP 2050) » (OFT 2017c). Le programme s'adresse à toutes les entreprises de transport public. L'accent est mis sur :

- les projets de recherche appliquée,
- la collecte, l'analyse et l'échange de données, et
- le développement de prototypes et d'installations pilotes en phase expérimentale.

Selon les informations de l'OFT, toutes les demandes de financement de bus électriques par des fonds de R&D&I ont jusqu'à présent été rejetées en raison du manque de caractère innovant. En revanche, les contributions au développement de stratégies d'entreprise pour la mise en œuvre des objectifs énergétiques ont été financées. Cet instrument n'est donc pas pertinent dans le contexte de l'acquisition de bus sans énergie fossile, à moins que de nouveaux développements techniques ne soient impliqués. Le soutien financier au développement du marché – tel qu'il est prévu, par exemple, avec les programmes de soutien nationaux allemands (cf. 5.3.2) – n'est pas envisagé dans ces conditions au niveau national.

Dans le cadre du **programme en faveur du trafic d'agglomération** de l'Office fédéral du développement territorial (ARE), les mesures liées aux routes nationales et aux infrastructures peuvent être cofinancées par la Confédération (FORTA). Dans le secteur des bus, il s'agit notamment des caténaires pour les trolleybus. Selon les informations de l'ARE, l'infrastructure de recharge pour le trafic d'agglomération est également cofinancée par la Confédération, c'est-à-dire qu'un cofinancement est possible pour les stations de recharge dans les dépôts de bus ou dans les gares, par exemple. En outre, sur la base de l'art. 17a, al. 2bis LUMin, des contributions aux coûts supplémentaires correspondants du matériel roulant sont également versées si des coûts d'infrastructure importants sont économisés. En principe, les surcoûts des nouvelles générations de bus électriques pouvant fonctionner sans caténaire (bus rechargés au dépôt ou alimentés par biberonnage) peuvent être cofinancés, y compris les adaptations nécessaires aux arrêts (stations de recharge) et les autres installations électriques requises. Les coûts d'investissement économisés par rapport aux coûts d'investissement des trolleybus conventionnels doivent être prouvés (ARE 2020a). Les preuves suivantes doivent être fournies pour le cofinancement du matériel roulant : coûts d'investissement économisés grâce à l'abandon ou à l'abandon partiel des infrastructures des trolleybus classiques (caténaires) ; synergies de réseau avec les systèmes de trolleybus déjà existants (par exemple, prolongement de ligne vers les PDE ou les quartiers) avec un potentiel de demande élevé ; surcoûts substantiels de renouvellement de la flotte par rapport aux trolleybus classiques (ces surcoûts devant être nettement inférieurs aux coûts d'investissement de l'électrification classique).

Le taux de la contribution de la Confédération résulte du rapport coût-bénéfice du projet d'agglomération correspondant et se situe entre 30 et 50 pour cent. En moyenne, environ 35 à 40 pour cent des coûts imputables sont cofinancés par la Confédération.

Le DETEC conclut des conventions de prestations avec les cantons et les collectivités régionales. La quatrième génération de projets d'agglomération est en cours d'élaboration et doit être soumise à la Confédération pour examen d'ici à la mi-juin 2021.

Le processus allant de la préparation à la conclusion d'une convention sur les prestations et à sa mise en œuvre suit généralement un cycle de quatre ans. Le projet d'agglomération est élaboré par l'organisme responsable correspondant (collectivités territoriales : cantons, collectivités régionales et communes). À cet égard, les ETC ne sont pas directement responsables. Les cantons et les communes, en tant que commanditaires du TRV et du trafic local, ont un rôle central à jouer.

Obligation de compensation des émissions de CO₂ des importateurs de carburant en vertu de la loi sur le CO₂

Depuis 2013, il existe en Suisse une obligation de compensation du CO₂ pour les importateurs de carburant, conformément à la loi sur le CO₂. Les personnes soumises à cette obligation de compensation disposent de plusieurs possibilités pour s'en acquitter. Les résultats des projets et programmes de réduction des émissions au niveau national (compensation des émissions de CO₂) peuvent être certifiés et utilisés pour compenser les émissions. L'essentiel est de prouver que les réductions sont supplémentaires et qu'elles n'auraient pas eu lieu sans le projet ou le programme.

L'Office fédéral de l'environnement (OFEV) peut délivrer des attestations négociables pour des projets de réduction des émissions domestiques (projets de compensation). Les projets de compensation doivent être enregistrés à l'avance et les réductions d'émissions annuelles doivent être vérifiées (surveillance annuelle). La Confédération (OFEV et OFEN) vérifie si la réduction de CO₂ s'ajoute au développement de référence⁴³ et si l'économie a été correctement quantifiée.

On part du principe que les achats ne sont pas économiques sans les recettes des attestations. Les attestations rendent l'acquisition plus intéressante sur le plan économique. Seules les mesures volontaires qui vont au-delà des exigences légales et qui ne sont pas déjà soutenues par ailleurs (OFEV 2020) sont certifiées, c'est-à-dire qu'elles doivent être supplémentaires et, en ce sens, seule la valeur ajoutée écologique (réduction du CO₂) est certifiée. L'instrument n'est donc pas orienté vers les coûts de réalisation de cette réduction, mais uniquement vers la quantité de CO₂ réduite.

En tant qu'organisation à but non lucratif, la fondation Myclimate développe entre autres des projets de protection du climat pour le marché de l'engagement en Suisse. Fin 2018, Myclimate a pu activer environ 100 millions de francs suisses pour des projets de protection du climat, soutenant ainsi la Fondation pour la protection du climat et la compensation de CO₂ KliK dans le respect de son obligation légale. Dans le cadre du **projet de compensation « Bus électriques et hybrides »**, l'acquisition et l'utilisation de systèmes de propulsion alternatives en Suisse fait l'objet d'un soutien financier (tableau 15).

⁴³ Le scénario de référence suppose l'utilisation de bus fossiles selon la flotte de référence et est revu annuellement et ajusté en fonction de la pénétration du marché des bus électriques et hybrides. Les approches méthodologiques concernant le développement de références sont expliquées dans la description du projet (myclimate 2020).

Le projet de compensation est enregistré auprès de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) et a été revalidé en 2019. Le projet est financé par la vente d'attestation, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de flux de fonds publics. Le montant de la subvention de CHF 112.–/tCO₂ a été négocié avec la Fondation KliK pour la protection du climat et la compensation du CO₂. À partir de 2021, le montant de la subvention pour les bus électriques doit être sensiblement augmenté pour atteindre CHF 200.–/tCO₂.

Le programme comprenait sept projets en 2018 (myclimate 2019c, cf. tableau 15) :

- Aare Seeland Mobil AG (AAS) avec 3 bus hybrides
- Bus du Soleil S.A. avec 4 bus hybrides
- Groupe Eurobus avec 11 bus hybrides
- Regionale Verkehrsbetriebe Baden-Wettingen RVBW AG avec 3 bus hybrides
- Verkehrsbetriebe Luzern AG (VBL) avec 3 bus hybrides
- Verkehrsbetriebe Zürich (VBZ) avec 19 bus hybrides
- Transports Publics Genevois (TPG) avec 12 bus électriques

Entre-temps, d'autres projets ont été ajoutés. VBZ a résilié le contrat de manière anticipée à la fin de l'année 2019 afin de pouvoir déclarer ou imputer les économies de gaz à effet de serre à l'entreprise ou à la ville de Zurich.

Tableau 15 : obligation de compensation des émissions de CO₂ des importateurs de carburant en vertu de la loi sur le CO₂

Programme d'encouragement	Projet de compensation « Bus électriques et hybrides »
Soutien	Fondation pour la protection du climat et la compensation de CO ₂ (KliK) / Fondation myclimate
Durée	depuis 2013/2014 (revalidation en 2019)
But et finalités	Réduction des émissions de gaz à effet de serre par l'amélioration de l'efficacité énergétique dans le transport de voyageurs (pour remplir l'obligation de compensation des importateurs de carburant)
Objet	Promouvoir l'acquisition et l'utilisation de ▪ Bus hybrides et hybrides plug-in, y compris les bus avec prolongateur d'autonomie ▪ Bus électriques à batterie avec des batteries à recharge lente et rapide (recharge de la batterie via une station de charge ou par biberonnage) ▪ Trolleybus hybrides (également appelés trolleybus à batterie), qui peuvent fonctionner sans caténaire pendant au moins 30 km
Destinataires	Sociétés de bus opérant en Suisse (ETC, exploitants de bus privés)
Type et portée	▪ Subvention annuelle basée sur une projection des émissions de CO₂ selon le formulaire d'inscription et une contribution de CHF 112.–/tCO₂ sur 10 ans (subvention totale jusqu'à CHF 80'000.– par bus), soit environ CHF 2000.–/an pour des bus hybrides ou CHF 8400.–/an pour des bus électriques ▪ À partir du 01.01.2021 : subvention de CHF 200.–/tCO₂ pour les bus électriques ▪ Depuis le 01.01.2020 (limité jusqu'au 31.12.2023) : paiement anticipé de CHF 60'000.– ; après remboursement de cet acompte, subvention annuelle (quota de 100 bus électriques) ▪ Conditions de participation ou critères d'admission : ▪ Le projet n'est pas situé dans une entreprise exonérée de la taxe sur le CO₂. ▪ Les réductions d'émissions obtenues ne sont pas revendiquées par ailleurs. (Le projet entraîne des émissions supplémentaires de CO₂.) ▪ Les réductions d'émissions réalisées par le projet sont transférées au responsable du projet (et ne peuvent donc pas être réclamées par l'ETC). ▪ La mise en œuvre du projet n'a pas encore commencé au moment de la soumission du formulaire de demande. ▪ Si d'autres aides financières gouvernementales sont demandées⁴⁴, elles doivent être signalées au niveau du projet dans le rapport de suivi. La répartition de l'impact est calculée par la direction du programme dans le rapport de suivi, conformément aux exigences de l'OFEV. Si les aides financières dépassent le montant de CHF 370'000.– par bus à batterie, CHF 170'000.– par trolleybus hybride ou CHF 60'000.– par bus hybride, le projet n'est pas considéré comme supplémentaire.
Procédure	Financement sur demande avec formulaire d'inscription
Directive sur le financement et autres documents	myclimate 2014 : Description du projet, https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumentation/klima/klima-kop-bis-2016/0031_elektro-_undhybridbusse.pdf.download.pdf/0031_elektro-_undhybridbusse.pdf, consulté le 16.01.2020. myclimate 2019a : Programme de subvention pour les bus électriques et hybrides, description du projet, https://www.myclimate.org, consulté le 16.01.2020. myclimate 2019b : Programme de subventions pour les bus électriques et hybrides, formulaire d'inscription, https://www.myclimate.org, consulté le 16.01.2020. myclimate 2019c : Rapport de suivi des projets/programmes de réduction des émissions en Suisse, 0031 Bus électriques et hybrides, 01.01.2018 au 31.12.2018, https://www.bafu.admin.ch, consulté le 16.01.2020. myclimate 2020 : Programme de subvention pour les bus électriques et hybrides, description du projet, consulté le 27.03.2020.

Tableau INFRAS.

Si l'achat de bus est déjà subventionné par d'autres programmes (par exemple, la ville de Berne, chap. 5.2.3), les effets doivent être partagés si les autres bailleurs de fonds réclament les réductions d'émissions réalisées⁴⁵. Si un partage n'est pas possible, aucun financement n'est prévu par le programme.

Sur la base de la subvention maximale actuelle de CHF 80'000.– pour un bus électrique chargé au dépôt (bus standard, état en 2020), ce montant correspond à court terme à un taux de subvention d'environ 20 pour cent des coûts d'investissement supplémentaires par rapport au bus de référence diesel. À long terme, jusqu'en 2035, ce montant de subvention correspondrait à un taux de subvention pouvant atteindre environ 35 pour cent des coûts d'investissement supplémentaires au moment de l'achat en raison de la réduction des coûts d'acquisition. On peut supposer que la subvention maximale par bus sera augmentée en conséquence avec l'augmentation prévue de la subvention de CHF 112.– à CHF 200.–/tCO₂ à partir de 2021 et que le taux de subvention sera ainsi presque doublé.

⁴⁴ Les aides financières sont des avantages monnayables accordés à des bénéficiaires extérieurs à l'administration fédérale pour promouvoir ou maintenir l'accomplissement d'une tâche choisie par le bénéficiaire (cf. chap. 5.1). Selon la loi sur les subventions, la commande de transports publics n'est pas un avantage monnayable mais une indemnité, puisque le commanditaire définit la tâche.

⁴⁵ Par « réclamer », on entend que les émissions réduites sont répertoriées dans un inventaire national.

Fondation Suisse pour le Climat

La Fondation Suisse pour le Climat soutient les PME sous certaines conditions (tableau 16). En règle générale, les ETC sont exclues des subventions dans le domaine de l'électromobilité.

Tableau 16 : Fondation Suisse pour le Climat

Programme d'encouragement	Financement de projet par la Fondation Suisse pour le Climat
Soutien	Fondation Suisse pour le Climat (initiative volontaire du secteur privé)
Durée	depuis 2009 (illimité)
But et finalités	▪ Réduction des émissions de gaz à effet de serre ▪ Augmentation de l'efficacité ▪ Renforcement du site économique de la Suisse et du Liechtenstein
Objet	Financement de départ pour ▪ les mesures de réduction de CO₂ et d'augmentation de l'efficacité énergétique dans le domaine de la mobilité et du transport (« eMobility »), remplacement des véhicules à carburant fossile (essence, diesel ou gaz) par des véhicules à entraînement purement électriques (les véhicules à autonomie étendue et les véhicules hybrides, y compris les véhicules hybrides plug-in, sont exclus du financement) ▪ Développement de produits et de technologies innovants contribuant à la protection du climat
Destinataires	PME de Suisse et du Liechtenstein comptant jusqu'à 250 employés à plein temps dans l'ensemble du groupe d'entreprises, ▪ dont le capital est moins de 50 pour cent par de grands groupes (y compris joint-ventures) ou des organisations de droit public, ▪ qui ne sont pas exonérés de la taxe sur le CO₂ et/ou de la RPC (rétribution à prix coûtant) ▪ qui ne sont pas des sociétés immobilières qui acquièrent, exploitent, financent, construisent, louent, détiennent et commercialisent un ou plusieurs biens immobiliers pour des entreprises tierces et dont les demandes de projet sont liées à ces activités commerciales.
Type et portée	Financement d'un montant fixe sous forme de subsides non remboursables (dons) avec les fonds d'entreprises partenaires provenant de la restitution nette de la taxe d'incitation sur le CO₂ ▪ Conventions d'objectifs volontaires avec la Confédération visant l'amélioration de l'efficacité énergétique : prise en charge de jusqu'à 50 pour cent de la cotisation annuelle de la PME à l'une des deux agences à but non lucratif, l'Agence de l'énergie pour l'économie (AEnEC) ou l'Agence Cleantech Suisse (act) ▪ Économie d'énergie dans l'entreprise : ▪ CHF 30.-/t CO₂ épargnée sur la durée de vie de l'économie (max. 10 ans) ou ▪ CHF 10.-/MWh économisé sur la durée de vie de l'économie (max. 10 ans) ▪ Si la mesure consomme à son tour de l'électricité supplémentaire (p. ex. pompes à chaleur), la subvention est réduite à raison de CHF 5.-/MWh sur la durée de vie de l'économie (max. 10 ans) ▪ Solutions innovantes : soutien pour le développement de produits favorables à la protection du climat
Procédure	Subvention sur demande, demande possible à tout moment
Directive sur le financement et autres documents	Fondation Suisse pour le Climat 2015 : Protéger le climat. Promouvoir les PME. Brochure, https://www.klimastiftung.ch/files/03_die-stiftung/03_jahresbericht-broschuere/02_broschuere/Brochure2015_FR.pdf, 2015. Fondation Suisse pour le Climat 2017 : Règlement relatif à la promotion de projets, version 006 du 15 mai 2017

Tableau INFRAS.

5.2.3. Conditions-cadres cantonales et sélection de mesures d'encouragement communales

Les conditions-cadres, le financement et les possibilités d'encouragement pour les cantons sont exposés dans ce qui suit. Le tableau 17 donne un aperçu des cantons.

- Environ un tiers des cantons disposent actuellement d'une stratégie pour des transports publics sans fossiles et efficaces en énergie. Une stratégie est en cours de préparation dans deux cantons.
- Dans la quasi-totalité des cantons, les surcoûts liés aux bus sans carburant fossile et efficaces en énergie peuvent en principe être financés dans le cadre du financement ordinaire des transports publics ou ont déjà été cofinancés dans le cadre de projets individuels. La mesure dans laquelle les ressources financières nécessaires seront disponibles à l'avenir ne peut être évaluée et n'a pas fait l'objet de l'étude. En principe, on peut supposer que la situation financière respective des cantons et des communes est très différente. Dans le contexte de la situation actuelle (manque de recettes dû à la pandémie de COVID-19) et en l'absence de prévisions à long terme des ressources financières des pouvoirs publics, nous supposons, sur la base de l'estimation des besoins financiers (chap. 6.2), qu'aucun fonds supplémentaire n'est réservé pour les conversions de la flotte par rapport aux fonds actuels.
- Différents instruments ou mesures d'encouragement au niveau national ont joué un rôle dans les exemples d'acquisition et de promotion de bus sans énergie fossile présentés ci-dessous :
 - Obligation de compensation de CO₂ des importateurs de carburant (projet de compensation « bus hybrides et électriques »)
 - Projet d'agglomération pour les infrastructures (notamment les caténaires de trolleybus, mais aussi les stations de recharge et autres)
 - Programme P-D-L, par exemple pour Genève (TPG) et Zurich (VBZ)
- Des mesures de soutien cantonales, en plus du financement régulier des transports publics, existent dans le canton de Berne. L'infrastructure de recharge des transports publics peut être cofinancée par le programme d'encouragement cantonal. L'effet sur le CO₂ revient au canton de Berne.
- Dans certaines communes, des subventions (notamment pour l'infrastructure de recharge) sont possibles en plus du financement ordinaire. On peut notamment citer ewz (communes à Zurich et dans les Grisons) avec un programme de financement des véhicules et des infrastructures de recharge, et ewb (ville de Berne) avec la promotion des stations de recharge.
- Le soutien financier des mesures d'encouragement européennes ne joue pratiquement aucun rôle.

Tableau 17 : soutien financier aux transports publics non fossiles (état 2019)

Canton	Stratégie ou similaire	Bases légales	Financement des surcoûts provenant du budget des transports publics en principe possible	Programme cantonal de soutien aux transports publics	Invest. véhicules (amort.)	Coûts d'exploitation	Infrastructure de recharge
Argovie	non (en cours)	non	oui	non	x		x
Appenzell AI	non	non	oui	non	x	x	
Appenzell AR	non	non	n.c.	non		n.c.	
Berne	oui	oui	oui	oui*	x	x	x
Bâle-Campagne	oui	non	oui	non	x	x	x
Bâle-Ville	oui	oui	oui	non	x	x	x
Fribourg	oui	oui	oui	non		x	x
Genève	oui	oui	oui	non	x	x	x
Glaris	non	oui	oui	non	x	x	n.c.
Grisons	non	non	oui	non	x	x	x
Jura	non	non	oui	non	x	x	n.c.
Lucerne	oui	non	oui	non	x	x	x
Neuchâtel	non	non	oui	non	x	x	n.c.
Nidwald	non	non	oui	non	x	x	n.c.
Obwald	non	non	oui	non	x	x	n.c.
Schaffhouse	non	non	TRV : non, TL : oui	non	(x)**	(x)**	(x)**
Soleure	non	non (en cours)	oui	non (en cours)	x	x	n.c.
Saint-Gall	oui	oui	oui	non	x	x	x
Schwyz	non	non	oui	non	x	x	
Thurgovie	non (prévu)	non	non	non	x		x
Tessin	non	non	oui	non	x	x	
Uri	non	non	oui	non		n.c.	
Vaud	non	non	oui	non	x	x	x
Valais	non	oui	oui	non		x	
Zoug	non	non	oui	non	x		x
Zurich	oui	non	oui	non	x	x	x

TL : trafic local, TRV : transport régional de voyageurs, invest. véhicules : investissements dans les véhicules, amort. : amortissement

* pour les stations de recharge dans les TP, ** financement de la ville de Schaffhouse.

Tableau INFRAS. Source : Enquête alternative / entraînements neutre en CO₂ pour les bus, recherche personnelle.

Canton d'Argovie

La loi sur les transports publics (ÖVG) du 2 septembre 1975⁴⁶ ne prévoit aucune obligation légale ni aucun objectif concernant l'utilisation de véhicules à faibles émissions et efficaces en énergie.

⁴⁶ SAR 995.100.

L'acquisition de bus à entraînement alternatif et de l'infrastructure de recharge et de ravitaillement correspondante est financée par le budget ordinaire des transports publics. Selon le programme pluriannuel 2020, des fonds d'investissement sont prévus pour l'e-mobilité et les infrastructures de bus innovantes (BVU 2019). On suppose que les coûts d'investissement des véhicules convergeront vers ceux des bus diesel au cours des prochaines années⁴⁷.

Le programme cantonal d'encouragement dans le domaine de l'énergie ne prévoit pas de soutien spécifique dans le domaine des transports publics pour l'acquisition de véhicules et de l'infrastructure correspondante⁴⁸. Une stratégie pour l'utilisation des bus à entraînement alternatif est en cours d'élaboration⁴⁹. Sur la base de l'article 12 de la loi sur l'énergie du canton d'Argovie (EnergieG) du 17 janvier 2012⁵⁰, le canton peut édicter ses propres principes juridiques pour renforcer l'efficacité énergétique et améliorer le bilan CO₂ dans la mobilité.

Exemple de l'entreprise régionale Verkehrsbetriebe Baden-Wettingen (RVBW) AG

RVBW a bénéficié d'un cofinancement pour ses bus hybrides à partir de l'instrument de la compensation de CO₂ pour les importateurs de carburant (programme de compensation « Bus hybrides et électriques » de myclimate). Pour l'exploitation test avec des bus à entraînement électrique (ligne 8), RVBW reçoit des contributions du canton pour l'infrastructure de recharge. Il est également prévu que RVBW reçoive un soutien financier de l'OFEN pour l'essai sur la ligne 5 dans le cadre du programme P+D+L (cf. chap. 5.2.2).

Exemple de CarPostal SA, région de Brugg

L'opération pilote menée dans la région de Brugg avec des bus à pile à combustible de CarPostal SA a été interrompue à la fin de 2016⁵¹. Le projet a été soutenu dans le cadre du projet européen « Clean Hydrogen in European Cities CHIC »⁵².

Canton d'Appenzell Rhodes-Intérieures

La loi cantonale sur les transports publics (GöV)⁵³ du 24 avril 2016 ne prévoit pas d'objectifs de protection de l'environnement. La stratégie énergétique 2014 du canton d'Appenzell Rhodes-Intérieures formule comme principe directeur que des efforts supplémentaires doivent être faits dans le domaine de l'efficacité énergétique et de l'économie d'énergie (bâtiments et mobilité), et en particulier que le canton d'Appenzell Rhodes-Intérieures devrait promouvoir une mobilité écologique. Il a été annoncé que les systèmes de promotion et de subvention existants devaient être revus. Le programme d'encouragement de l'énergie 2017 ne prévoit pas de financement cantonal dans le domaine de la mobilité⁵⁴.

⁴⁷ BVU 2019 : Mehrjahresprogramm öffentlicher Verkehr 2020 (MJP öV 2020), Departement Bau, Verkehr und Umwelt, Abteilung Verkehr, décision du Grand Conseil du 3 décembre 2019.

⁴⁸ BVU 2020 : ENERGIE, energieberatungAargau, Förderprogramm, Departement Bau, Verkehr und Umwelt, version du 1^{er} janvier 2020.

⁴⁹ Enquête CDCTP.

⁵⁰ SAR 773.200.

⁵¹ PAG 2017 : Cars postaux à pile à combustible : un bilan positif, communiqué de presse, CarPostal SA, 1^{er} février 2017. ⁵² Müller et al. 2017 : Clean Hydrogen in European Cities CHIC, Deliverable No. 5.3, Final Report, https://fuelcellbuses.eu/sites/default/files/documents/Final%20Report_CHIC_28022017_Final_Public.pdf, 28 février 2017.

⁵³ GS 740.300.

⁵⁴ AI 2018 : Förderprogramm im Bereich der Energieeffizienz und der erneuerbaren Energien, valable à partir du 1^{er} janvier 2017, avril 2018.

Canton d'Appenzell Rhodes-Extérieures

La loi sur la promotion des transports publics dans le canton d'Appenzell Rhodes-Extérieures du 28 avril 1991⁵⁵ vise notamment à créer les conditions d'une politique des transports respectueuse de l'environnement. Le concept cantonal de l'énergie 2017-2025 précise pour le domaine prioritaire de la mobilité que le canton s'engage en faveur d'une mobilité efficace en énergie, que la part des énergies fossiles utilisées pour la mobilité doit être continuellement réduite et que la part de l'électromobilité, de la mobilité douce et des transports publics doit être augmentée en parallèle. L'accent doit être mis en particulier sur l'expansion de l'infrastructure de recharge. La promotion de la mobilité électrique des bus dans les transports publics (p. ex. stations de recharge) n'est pas envisagée dans le cadre de la promotion cantonale de l'énergie. En principe, le financement devrait provenir du budget ordinaire des transports publics.

Canton de Berne

La loi cantonale sur les transports publics (ÖVG)⁵⁶ vise notamment à réduire l'impact environnemental et la consommation d'énergie de tous les transports (art. 1 al. 2 ÖVG). Sur la base de l'ÖVG, les indemnités pour l'exploitation, y compris les exploitations à l'essai (art. 4 al. 1 let. b ÖVG), ainsi que les investissements pour la mise en œuvre de mesures de protection de l'environnement (art. 5 al. 1 let. d ÖVG) sont financés.

Selon la stratégie globale de mobilité du Conseil d'État du canton de Berne (2008), les transports publics doivent être exploités de manière écologique et efficace en énergie. Le canton de Berne, en tant que commanditaire, développe progressivement le système de transport public et soutient les entreprises de transport de manière ponctuelle pour améliorer l'efficacité énergétique. Un système d'incitation visant à promouvoir les véhicules efficaces en énergie dans les transports publics doit être développé (BVE 2015)⁵⁷. Une stratégie mettant l'accent sur les possibilités de cofinancement du canton est en cours d'élaboration⁵⁸.

Dans le cadre du programme d'encouragement cantonal « Erneuerbare Energien und Energieeffizienz » (Énergies renouvelables et efficacité énergétique), des contributions d'investissement aux stations de recharge pour les transports publics sont encouragées (tableau 18).

⁵⁵ bGS 760.1.

⁵⁶ BSG 762.4.

⁵⁷ BVE 2015 : Reduktion des Energieverbrauchs im Verkehr, Bericht 2015, Bau-, Verkehrs- und Energiedirektion des Kantons Bern, adopté par le Conseil d'État le 25 mars 2015.

⁵⁸ Enquête CDCTP.

Tableau 18 : programme d'encouragement « Énergies renouvelables et efficacité énergétique »

Programme d'encouragement	« Énergies renouvelables et efficacité énergétique » infrastructure de charge d'électromobilité dans les transports publics
Soutien	Canton de Berne, Office de l'environnement et de l'énergie
Durée	à partir de 2019
But et finalités	Encouragement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique
Objet	Stations de recharge pour les bus électriques des entreprises de transport public
Destinataires	▪ Entreprises de transport public ▪ Les entreprises exonérées de la taxe sur le CO₂ ne sont pas éligibles à un financement. Pour les bâtiments et installations qui sont la propriété exclusive ou majoritaire de la Confédération ou du canton, aucune contribution n'est accordée.
Type et portée	▪ 35 pour cent des coûts d'investissement éligibles d'une installation, au maximum CHF 100'000.– par station de recharge et selon le montant total ▪ Les investissements dans des mesures structurelles supplémentaires pour l'installation ou le raccordement électrique de la station de recharge, ainsi que les frais d'autorisation, de planification et d'exploitation, ne sont pas éligibles ▪ L'effet de l'économie de CO₂ pour la mesure subventionnée de l'allocation de contribution revient officiellement au canton de Berne. L'effet ne peut être divisé ou transféré à d'autres organisations.
Procédure	▪ Soumission de la demande de contribution avec les pièces jointes avant le début de la construction sur le portail en ligne ▪ Description du projet (y compris le plan du site) ▪ Description du produit du fabricant pour la station de recharge ▪ Résumé des coûts ▪ Exécution du projet de construction ▪ Confirmation de l'exécution avec copie de la facture ▪ Photo de l'installation avec signalisation et marquage ▪ Preuve de la source d'énergie (contrat/confirmation de l'opérateur énergétique) ▪ Soumission d'une demande de paiement
Directive sur le financement et autres documents	AUE 2019 : Programme d'encouragement du canton de Berne, Énergies renouvelables et efficacité énergétique, Guide, Office de l'environnement et de l'énergie, valable à partir de juillet 2019, https://www.weu.be.ch/content/dam/weu/dokumente/aue/fr/energiefoerderung/Leitfaden-fr.pdf

Tableau INFRAS.

Exemple de Bernmobil et de l'éco-fonds de la ville de Berne / ewb

Selon la stratégie du propriétaire actuelle de la ville de Berne⁵⁹, Bernmobil doit réduire la consommation d'énergie fossile pour la traction par rapport à la performance de transport dans le réseau urbain d'ici 2025 (en pkm, année de base : 2008, hors lignes régionales) de 30 pour cent et la consommation d'énergie de 20 pour cent (sur la base des pkm, année de base : 2008). Il s'agit d'augmenter la proportion de lignes de bus électrifiées, dont la faisabilité technique et opérationnelle doit être démontrée et dont le financement doit être assuré par le commanditaire. À long terme (horizon temporel : 2040), Bernmobil devrait exploiter son parc de véhicules exclusivement avec de l'énergie provenant de sources renouvelables (notamment sur les lignes principales de l'agglomération centrale).

Energie Wasser Bern (ewb) soutient des projets visant à accroître l'efficacité énergétique. Conformément à l'art. 6 du règlement d'ewb⁶⁰, ewb prend en compte la protection de l'environnement et la préservation des ressources naturelles. La stratégie du propriétaire d'Energie Wasser Bern (ewb) du 9 novembre 2016 indique qu'ewb peut soutenir l'introduction d'options d'électromobilité dans différentes catégories de véhicules et modes de transport avec des offres et des services adaptés, en coordination et, le cas échéant, en coopération avec la ville de Berne. ewb gère l'éco-fonds pour la promotion de l'efficacité énergétique et des énergies renouvelables de la ville de Berne. Ce dernier est financé par une retenue à affectation obligatoire d'au moins 10 pour cent du bénéfice qui sera distribuée annuellement par ewb à la ville de Berne. Les projets de l'agglomération bernoise sont financés par l'éco-fonds (ewb 2019)⁶¹.

En 2016, l'acquisition de 21 bus hybrides par Bernmobil a été soutenue financièrement par l'éco-fonds de la ville de Berne, les contributions du canton et les réserves de Bernmobil. L'appel d'offres de Bernmobil était ouvert à toutes les technologies, les véhicules à entraînement électrique n'étant pas autorisés. L'appel d'offres de Bernmobil a pris en compte les critères d'adjudication suivants : rentabilité en termes de coûts d'investissement et d'entretien (50 pour cent), durabilité en termes de bruit et d'émissions de substances polluantes (20 pour cent), cahier des charges (16 pour cent), aspects commerciaux (5 pour cent) et tests des véhicules (9 pour cent). Les contributions de tiers (soutien financier du canton et de la ville de Berne) ont déjà été prises en compte dans l'évaluation des coûts d'investissement⁶². Grâce à la prise en compte des contributions de tiers, Volvo a obtenu le contrat pour ses bus hybrides. L'exploitation pilote avec cinq bus électriques à batterie (ligne 17), qui a débuté fin 2018, est financée par le canton de Berne, la ville de Berne, la commune de Köniz, l'éco-fonds d'ewb et Bernmobil (4,5 millions de francs).

Bâle-Campagne

La loi sur la promotion des transports publics du 18 avril 1985 ne contient aucune exigence ni aucun objectif concernant l'utilisation de véhicules à faibles émissions et efficaces en énergie. Afin de gérer le trafic futur de la manière la plus efficace, économique et écologique possible, des principes de planification sont définis dans le plan directeur cantonal. Selon le projet du 8^e mandat général de prestations dans le domaine des transports publics pour les années 2018-2021 du 16 novembre 2016, le canton vise à réduire les émissions dans les transports. Les systèmes de propulsion respectueux de l'environnement doivent être soutenus lors de la commande de transports publics et de l'acquisition de la flotte de véhicules.

⁵⁹ Ville de Berne : Eigentümerstrategie BERNMOBIL 2017–2020, [https://www.bernmobil.ch/file/Unternehmen/Portrait/%C3%9Cber%20uns/Eigent%C3%BCmerstrategie%20BERNMobil%202017-2020%20\(PDF%2C%2094%20KB\).pdf](https://www.bernmobil.ch/file/Unternehmen/Portrait/%C3%9Cber%20uns/Eigent%C3%BCmerstrategie%20BERNMobil%202017-2020%20(PDF%2C%2094%20KB).pdf)

⁶⁰ Règlement Energie Wasser Bern (ewb-Reglement ; ewr) du 15 mars 2001, SSSB 741.1.

⁶¹ ewb 2019 : Geschäfts- und Nachhaltigkeitsbericht 2018, Berne, 2019.

⁶² BERNMOBIL 2015 : 21 umweltfreundliche Hybrid-Gelenkbusse für BERNMOBIL, communiqué de presse, septembre 2015.

En conséquence, les surcoûts peuvent en principe être financés par le budget ordinaire des transports publics. Dans le cas d'investissements en infrastructures, la participation de tiers est recherchée. Aucun objectif environnemental n'est spécifié dans les stratégies de propriété de Baselland Transport AG et Autobus AG⁶³.

Le programme d'encouragement cantonal de l'efficacité énergétique et des énergies renouvelables (« Baselbieter Energiepaket ») se concentre sur le secteur du bâtiment. Les achats de bus et l'infrastructure correspondante de chargement et de ravitaillement ne recevront donc pas de soutien financier supplémentaire⁶⁴.

Exemple de Baselland Transport AG (BLT)

Dans le cadre de la Stratégie énergétique 2050, le Département des constructions et de la protection de l'environnement (BUD) a chargé BLT de réaliser une exploitation pilote avec cinq bus électriques et de lancer un appel d'offres public. L'appel d'offres pour les bus est terminé⁶⁵. BLT prévoit d'exploiter la ligne 37 avec des bus électriques à partir de décembre 2020. Pour financer les coûts d'investissement (supplémentaires), une demande a été soumise au BUD en tant que commanditaire. En outre, le cofinancement des bus ou de l'infrastructure de recharge par l'instrument de la compensation de CO₂ des importateurs de carburant ou de l'OFT (cf. chap. 5.2.2) est recherché.

Bâle-Ville

Dans le cadre du projet « 2000-Watt-Gesellschaft – Pilotregion Basel » (Une société à 2000 watts, région-pilote de Bâle), des projets pilotes locaux ont été encouragés jusqu'en 2018. Le financement provenait de crédits-cadres approuvés par le Grand Conseil. Dans ce contexte, l'entreprise Basler Verkehrsbetriebe a testé deux minibus électriques⁶⁶.

Avec la modification de la loi sur les transports publics⁶⁷ en juillet 2015, l'art. 5, al. 1^{er} de la loi sur les transports publics oblige le canton à ne commander que des services dans le transport local qui sont fournis avec 100 pour cent d'énergie renouvelable à partir de 2027. Des exceptions justifiées sont possibles. Un axe stratégique correspondant a été inscrit au programme des transports publics 2018-2021 du Conseil d'État cantonal du 16 novembre 2016. Dans ce contexte, BVB prévoit l'électrification de sa flotte de bus. Une proposition pour le financement d'autres achats de bus devrait être soumise au Grand Conseil en 2020.

⁶³ FV BL 2016 : Eigentümerstrategie Baselland Transport AG (BLT), <https://www.baselland.ch/politik-und-behorden/direktionen/finanz-und-kirchendirektion/finanzverwaltung/beteiligungen/faktenblatter/hinterlegte-dokumente/eigentuemerstrategie-blt.pdf>, janvier 2016 ; FV BL 2015 : Eigentümerstrategie Autobus AG Liestal (AAGL), <https://www.baselland.ch/politik-und-behorden/direktionen/finanz-und-kirchendirektion/finanzverwaltung/beteiligungen/faktenblatter/hinterlegte-dokumente/eigentuemerstrategie-aagl.pdf>, avril 2015.

⁶⁴ Verordnung über Förderbeiträge nach dem Energiegesetz vom 15.12.2009 (Stand 1.1.2017), <https://www.energiepaket-bl.ch/das-energiepaket/foerderverordnung>.

⁶⁵ BLT 2019 : Zuschlag Ausschreibung Elektrobus-Beschaffung, communiqué de presse, https://www.blt.ch/fileadmin/user_upload/PDF_Content/PDF_Medienmitteilungen/100_Jahre_BUEB_22-01-2021_01.pdf, Oberwil, 27 juin 2019.

⁶⁶ Canton de Bâle-Ville, sans date : Pilotregion Basel, <https://www.klimaschutz.bs.ch/informationen-und-netzwerke/plattformen-und-netzwerke/pilotregion-basel.html>, consulté le 23.03.2020.

⁶⁷ SG 951.100.

Les investissements dans les infrastructures et les véhicules sont financés par des prêts du canton à BVB ; les coûts d'exploitation sont financés par le budget global de transports publics. BVB cherche à coopérer avec Industriellen Werke Basel (IWB) pour mettre en place et exploiter l'infrastructure de recharge nécessaire⁶⁸.

Selon le concept global du Grand Conseil pour l'électromobilité du 3 juillet 2019⁶⁹, des véhicules à entraînement électrique doivent être acquis dans le cadre du remplacement régulier pour l'administration et pour les entreprises liées à l'État qui disposent d'une flotte plus importante (par exemple BVB). La stratégie du propriétaire pour BVB du Conseil d'État doit être adaptée en conséquence. En fonction de la portée d'un marché de remplacement, qui intervient par le biais du processus d'acquisition habituel, les fonds requis sont demandés avec des soumissions séparées.

Canton de Fribourg

La loi sur les transports du 20 septembre 1994 stipule qu'un système global des transports visant à assurer la mobilité doit également tenir compte des exigences de la protection de l'environnement. Le plan cantonal des transports ne prévoit aucune mesure concernant la mise en œuvre de la protection de l'environnement. Dans le plan de mesures sur la protection de l'air 2020, qui est en cours d'élaboration, des mesures sont prévues pour les véhicules utilisés dans les transports publics afin de réduire les émissions de CO₂. Un plan climatique cantonal est également en cours d'élaboration.

Exemple de l'agglomération de Fribourg et des Transports publics fribourgeois (TPF)

Conformément au plan de directeur régional (programme d'agglomération de 3^e génération), qui prévoit une stratégie pour le transport durable et l'urbanisation, des trolleybus alimentés par des batteries doivent être achetés et utilisés sur la ligne d'ici 2021 dans le cadre du renouvellement prévu du parc de bus⁷⁰. Il est prévu que le canton accorde des prêts remboursables sous conditions pour l'acquisition de 10 trolleybus à batterie par les TPF.

Canton de Genève

La loi sur la mobilité du 23 septembre 2016 (LMob) établit que la politique de mobilité est coordonnée avec la politique énergétique et environnementale. L'objectif est de réduire la consommation d'énergie et de donner la priorité à l'utilisation des énergies renouvelables.

Les objectifs de la Confédération et des cantons, notamment en matière de protection de l'air, du bruit et du climat dans les zones à forte densité de population, doivent être pris en compte.

⁶⁸ BVB 2019 : Bussystem 2027 – Die Planungen zur Elektrifizierung der BVB-Busflotte sind auf Kurs, communiqué de presse du 28.11.2019, <https://www.klimaschutz.bs.ch/informationen-und-netzwerke/plattformen-und-netzwerke/pilotregion-basel.html>, Bâle, 2019.

⁶⁹ Cf. Conseil d'État du canton de Bâle-Ville 2019 : Ratschlag Gesamtkonzept Elektromobilität, <https://www.bs.ch/dam/jcr:75f79327-6868-49a0-ab4f-f6d666cdb694/Ratschlag%20Gesamtkonzept%20Elektromobilit%C3%A4t.pdf>, consulté le 23.03.2020.

⁷⁰ Cf. Agglo Fribourg, sans date : Réseau de bus de l'agglomération (zone 10), <https://www.agglo-fr.ch/mobilite/bus-agglomeration-fribourgeoise>, consulté le 23.03.2020.

Le financement des nouvelles infrastructures de transport (par exemple, les lignes de trolleybus et les tramways) est régi par la loi sur le réseau des transports publics (LRTP) du 17 mars 1988. Sur la base de l'art. 1 LRTP, le Conseil d'État établit un plan d'action pluriannuel pour le réseau de transports publics et son développement. La conversion des lignes de bus diesel en bus électriques est une mesure prévue dans le plan d'action pour les transports publics pour les années 2020 à 2024 (PATC 2020-2024)⁷¹. Le financement est assuré par le budget ordinaire des transports publics.

Exemple des TPG et de TOSA (Trolleybus Optimisation Système Alimentation)

La mission, les objectifs, les prestations et les ressources financières (frais d'exploitation, amortissements) des Transports publics genevois (TPG) sont définis pour une période de cinq ans sur la base du PATC 2020-2024 dans une convention sur les prestations avec le canton de Genève en tant que propriétaire de l'établissement de droit public conformément à la loi cantonale sur les Transports publics genevois (LTPG) du 21 novembre 1976. Le budget annuel est soumis par le Conseil d'administration au Conseil d'État pour décision. La convention sur les prestations et les contributions annuelles maximales est approuvée par le Grand Conseil⁷².

La conversion de la ligne 23 des TPG au nouveau système TOSA a fait suite à un test d'un prototype en 2017. Le projet pilote a été financé par le budget ordinaire des transports publics du canton et par la Confédération dans le cadre du programme phare de l'OFEN dans le secteur des technologies propres (3,4 millions de francs), et l'acquisition des véhicules par le biais de l'instrument de la compensation des émissions de CO₂ pour les importateurs de carburant et le programme d'encouragement « bus hybrides et électriques » (économie d'environ 1'000 t de CO₂ p.a., soit une contribution de CHF 112'000.–)⁷³. À l'avenir, deux nouvelles lignes de bus électriques (à partir de 2020, ligne 4, et à partir de 2024, ligne 22) doivent remplacer environ 50 bus diesel. L'objectif est de convertir toutes les lignes de la ville d'ici 2030. Les coûts s'élèvent respectivement à environ 34 millions de francs (28 bus pour la ligne 4) et 12 millions de francs (14 bus pour la ligne 22)⁷⁴.

Canton de Glaris

L'article 5 de la loi cantonale sur les transports publics (öV-Gesetz) du 5 mai 1996⁷⁵ stipule que les coûts des améliorations techniques non couverts par la Confédération, tels que l'achat de nouveaux véhicules ou la construction de nouvelles installations et de nouveaux équipements, sont compensés par des aides financières du canton et des communes. Des objectifs environnementaux concrets pour les transports publics n'ont pas été fixés dans cette loi.

⁷¹ Canton de Genève 2019 : Plan d'actions des transports collectifs PATC 2020 -2024, adopté par le Conseil d'État le 17 Avril 2019 suite au vote du Grand Conseil du 22 Mars 2019

⁷² Par exemple, loi accordant une indemnité de 1 252 554 827 francs aux Transports publics genevois (TPG) pour les années 2020 à 2024 (12546) du 22 novembre 2019.

⁷³ Loi ouvrant un crédit d'investissement de 15 000 000 F pour le déploiement de la technologie TOSA sur une ligne pilote des Transports publics genevois (11720) du 4 décembre 2015.

⁷⁴ Grand Conseil 2019 : Rapport de la commission des transports chargée d'étudier le projet de loi du Conseil d'État accordant une indemnité de 1 252 554 827 francs aux Transports publics genevois (TPG) pour les années 2020 à 2024, 5 novembre 2019 (PL 12546-A).

⁷⁵ GS VII D/6/1.

Selon la loi cantonale sur l'énergie (EnG) du 7 mai 2000⁷⁶, le canton peut promouvoir des projets visant à augmenter l'efficacité énergétique et l'utilisation des énergies renouvelables et de la chaleur résiduelle. Le programme cantonal de promotion de l'énergie 2020 se concentre actuellement sur les mesures sur et dans les bâtiments. Le financement est assuré par le fonds cantonal pour l'énergie. Les mesures dans le domaine de la mobilité ont jusqu'à présent été exclues pour des raisons de coûts. L'extension du programme cantonal de promotion de l'énergie est actuellement à l'étude⁷⁷. Les pratiques de financement actuelles dans le domaine de la mobilité et le financement du fonds pour l'énergie sont en cours de révision. Il est donc possible qu'à l'avenir, des mesures dans le domaine de la mobilité écologique soient également soutenues par le fonds pour l'énergie⁷⁸.

Canton des Grisons

L'art. 2, al. 2, de la loi sur les transports publics du canton des Grisons (GöV) du 7 mars 1993⁷⁹ stipule que le transport public de voyageurs et le transport ferroviaire de marchandises doivent être encouragés dans le but de protéger l'environnement et d'utiliser l'énergie de manière économique et parcimonieuse. Cependant, aucun objectif concret n'est défini pour des transports durables et sans carburant fossile, car ils ne figurent pas dans la loi cantonale sur l'énergie (BEG)⁸⁰.

Le programme d'encouragement cantonal ne tient compte d'aucune mesure dans le domaine de la mobilité. Dans certaines communes du canton des Grisons situées dans la zone de services de la compagnie d'électricité de Zurich (ewz), les entreprises ont accès au programme d'encouragement « 2000-Watt-Gesellschaft » (cf. canton de Zurich, tableau 20).

Canton du Jura

La loi cantonale sur les transports publics (art. 23, al. 2) du 20 octobre 2010⁸¹ stipule que les indemnités cantonales pour les services de transport public ne sont octroyées aux entreprises que si elles opèrent de manière efficace et respectueuse de l'environnement. La *Conception directrice des transports publics* de septembre 2015 ne fixe aucun objectif pour l'utilisation de véhicules à faibles émissions dans les transports publics.

La conception cantonale de l'énergie 2015-2021 et la stratégie énergétique cantonale 2035 ne définissent aucune mesure dans le secteur de la mobilité.

⁷⁶ GS VII E/1/1.

⁷⁷ Beschluss, Sitzung des Landrates vom Mittwoch, 6. November 2019, § 185 Postulat BDP/GLP-Fraktion «Erweiterung des kantonalen Energieförderprogramms» (Bericht Regierungsrat), 10.09.2019.

⁷⁸ Canton de Glaris 2019 : Energiefonds soll ausgebaut werden, <https://www.gl.ch/public-newsroom/details.html/31/news/9053>, consulté le 23.03.2020.

⁷⁹ BR 872.100.

⁸⁰ BR 820.200.

⁸¹ RSJU 742.21.

Exemple de CarPostal SA et de la ville de Delémont

Fin 2018, Delémont a reçu le titre de « Cité de l'énergie », qui est décerné aux communes et aux villes qui s'engagent en faveur de l'utilisation efficace de l'énergie, des énergies renouvelables et de la protection du climat. Ainsi, le premier bus de CarPostal SA fonctionnant au gaz naturel était déjà en service à Delémont en 2009⁸². Bien que ce projet ait été arrêté parce que le bus s'est avéré inefficace pour le profil du trajet, la capitale jurassienne a fait d'autres efforts pour promouvoir le transport par bus sans fossile, notamment dans le cadre du programme « Delémont, cap sur 2030 ». Dans ce contexte, des projets de démonstration de bus électriques alimentés par des énergies renouvelables locales ont été lancés⁸³.

Canton de Lucerne

L'art. 2 al. 2 de la loi sur les transports publics (öVG) du 22 juin 2009⁸⁴ stipule que les transports publics de voyageurs doivent être respectueux de l'environnement, sans définir d'objectifs concrets. Le financement des entreprises de transport dans le domaine des transports publics se fait par l'intermédiaire de la communauté de transport de Lucerne (VVL). Le canton et le VVL définissent le développement à moyen et long terme des services de transport public dans le rapport pluriannuel sur les transports publics (canton LU 2017)⁸⁵.

Selon la stratégie de bus électriques de VVL, l'extension du réseau de trolleybus à batteries se poursuit dans l'agglomération lucernoise avec l'intégration de lignes individuelles de bus diesel, tandis que les bus diesel doivent être remplacés par des bus à batteries rechargés au dépôt (INFRAS 2019)⁸⁶. Dans une phase transitoire, l'hybridation est également recherchée. Le financement doit être assuré par le budget ordinaire des transports publics. Des lignes pilotes ont été étudiées pour les bus à batterie rechargés au dépôt et cinq lignes ont été sélectionnées (VVL 2020)⁸⁷.

Le programme d'encouragement cantonal « Energie » visant à promouvoir l'efficacité énergétique et l'utilisation d'énergies renouvelables pour les bâtiments et le programme d'efficacité électrique ne favorise pas les investissements dans les transports publics.

⁸² RFJ 2009 : Une première dans le Jura : un autobus roulera au gaz à Delémont, <https://www.rfj.ch/rfj/Actualite/Regionale/22109Une-premiere-dans-le-Jura-un-autobus-roulera-au-gaz-a-Delemont.html> consulté le 23.03.2020.

⁸³ RFJ 2017 : Delémont veut être à l'heure du bus électrique, <https://www.rfj.ch/rfj/Actualite/Region/20170918-Delemont-veut-etre-a-l-heure-du-bus-electrique-1.html#> consulté le 23.03.2020.

⁸⁴ SRL Nr. 775.

⁸⁵ Canton LU 2017 : ÖV-Bericht 2018 bis 2021, Entwurf Kantonsratsbeschluss zum Bericht über die mittel- bis langfristige Entwicklung des Angebots für den öffentlichen Personenverkehr, 14 novembre 2017.

⁸⁶ INFRAS 2019 : E-Bus-Strategie, Verkehrsverbund Luzern, Schlussbericht, Zurich, avril 2019.

⁸⁷ VVL 2020 : E-Bus-Strategie: Pilotlinien mit Batteriebusen im Kanton Luzern, communiqué de presse, Lucerne, 22 janvier 2020.

Exemple de Verkehrsbetriebe Luzern AG (VBL)

Les VBL ont reçu des aides financières pour trois bus hybrides dans le cadre de l'instrument de la compensation du CO₂ pour les importateurs de carburant et le programme de subvention « Bus hybrides et électriques » de myclimate (cf. chap. 5.2.2).

En ce qui concerne l'acquisition de bus à batterie rechargés au dépôt pour la ligne pilote 10, le financement des véhicules est prévu via le budget des transports publics ainsi qu'une subvention de myclimate. Le financement de l'infrastructure de recharge est prévu comme une mesure d'investissement ; si nécessaire, des subventions fédérales seront sollicitées.

Canton de Neuchâtel

La loi sur les transports publics (LTP) du 14 août 1996⁸⁸ du canton de Neuchâtel stipule que le système de transport public doit notamment répondre aux exigences de la protection de l'environnement et qu'une utilisation rationnelle du sol et de l'énergie est visée. Le concept des transports publics de 2002 définit des objectifs environnementaux de base⁸⁹. Une stratégie est en cours d'élaboration.

En outre, la loi cantonale sur l'énergie (LCEn⁹⁰) stipule que les infrastructures et les véhicules des transports publics doivent correspondre à l'état de la technique de manière à assurer une utilisation efficace de l'énergie et à diminuer les atteintes à l'environnement. Des mesures correspondantes sont encouragées dans le cadre du programme Bâtiments. Les subventions sont financées par le fonds cantonal de l'énergie.

Canton de Nidwald

La loi cantonale sur la promotion des transports publics (Verkehrsgesetz, ÖVG) du 29 janvier 1997⁹¹ ne contient pas d'objectifs en matière d'environnement ou de climat. La stratégie pour les transports publics 2017-2020 ne contient pas non plus d'objectifs concernant l'utilisation de bus à faibles émissions dans les transports publics.

Dans la mission énergétique 2019 de Nidwald, élaborée après l'approbation nationale de la Stratégie énergétique 2050, il est indiqué que le canton soutient le développement de la mobilité électrique grâce à des infrastructures adaptées⁹². Toutefois, le programme de soutien cantonal se concentre sur les mesures de construction.

⁸⁸ RSN 765.1.

⁸⁹ République et Canton de Neuchâtel 2000 : Conception directive des transports collectifs, adoptée par le Grand Conseil le 2 octobre 2000, entrée en vigueur le 1^{er} janvier 2001.

⁹⁰ RSN 740.1.

⁹¹ NG 652.1.

⁹² Conseil d'État du canton de Nidwald, sans date : Energieleitbild Nidwalden 2019, https://www.nw.ch/docn/202816/Energieleitbild_Nidwalden.pdf consulté le 23.03.2020.

Canton d'Obwald

L'un des objectifs du canton d'Obwald est de promouvoir les transports publics, notamment dans les domaines où il est possible de réduire le plus possible la pollution de l'environnement (art. 2, al. 2 de la loi sur la promotion des transports publics du 21.05.2014⁹³). Il n'existe pas de directives ni de stratégie pour l'utilisation de bus respectueux de l'environnement. Le financement devrait être assuré par le budget ordinaire, mais il n'est pas garanti.

Canton de Schaffhouse

Le canton de Schaffhouse et les communes encouragent les transports publics en tenant compte du développement durable et des objectifs de l'aménagement du territoire (art. 2 de la loi sur l'encouragement des transports publics⁹⁴, art. 9 de l'ordonnance relative à la loi sur les transports publics⁹⁵). Il n'existe actuellement aucune spécification concrète pour les véhicules à faibles émissions et à haut rendement énergétique dans les transports publics.

Dans le concept de suivi de la politique énergétique cantonale, le Conseil d'État a défini les objectifs et les mesures en matière de politique énergétique pour la période 2018 à 2030⁹⁶. Il entend notamment développer une stratégie d'électromobilité. Le rapport de synthèse sur les opportunités de l'électromobilité dans le canton de Schaffhouse doit être publié à la mi-2020. Cette analyse a pour but de montrer si des options d'action existent et dans quels domaines.

Le programme d'encouragement cantonal Énergie 2020 prévoit des incitations financières dans le secteur du bâtiment ; aucun investissement n'est encouragé pour les transports publics (Energie SH 2020)⁹⁷.

⁹³ GDB 772.1.

⁹⁴ SHR 743.100.

⁹⁵ SHR 743.101.

⁹⁶ Bericht und Antrag des Regierungsrates des Kantons Schaffhausen an den Kantonsrat betreffend Schlussbilanz über die Periode 2008-2017 und Anschlusskonzept zur kantonalen Energiepolitik 2018-2030 (Orientierungsvorlage), Vorlage des Regierungsrates vom 8. Mai 2018.

⁹⁷ Energie SH 2020 : Förderprogramm Energie 2020 – Fördersätze und Bedingungen, 6 janvier 2020.

Exemple de Verkehrsbetriebe Schaffhausen (VBSH)

Les VBSH forment une société sans personnalité juridique de la ville de Schaffhouse (division administrative). Les compétences financières constitutionnelles s'appliquent. Les Verkehrsbetriebe Schaffhausen (VBSH) souhaitent électrifier l'ensemble de leur flotte de bus d'ici 2029. La votation populaire « Einführung von Elektrobussen mit Schnellladesystem » (introduction de bus électrique avec système de charge rapide) a été adoptée le 17 novembre 2019 avec près de 54 pour cent des voix. La stratégie d'électrification doit être mise en œuvre en deux étapes⁹⁸.

Dans la phase de base, il s'agit d'acheter 15 bus électriques et l'infrastructure de recharge. Les coûts d'investissement bruts pour la phase de base s'élèvent à 28,7 millions de francs. Il est prévu qu'au moins 5.1 millions de francs soient financés par la Confédération dans le cadre du projet d'agglomération. Les investissements nets sont financés par la commune, le canton ne participe pas. Les VBSH ont soumis l'inscription nécessaire pour une participation au programme de la Fondation KLIK pour la protection du climat et l'instrument de la compensation de CO₂ des importateurs de carburant (cf. chap. 5.2.2) ; il existe un projet d'accord. En outre, les VBSH ont soumis une demande de financement à l'OFEN dans le cadre du programme phare⁹⁹.

Canton de Soleure

L'art. 1 de la loi cantonale sur les transports publics (ÖV-Gesetz) du 27.09.1992¹⁰⁰ stipule que les transports publics doivent être encouragés dans le but de favoriser le passage à des transports publics respectueux de l'environnement. Dans l'optique de décarboner les transports publics dans le canton de Soleure, le Conseil d'État a décidé fin 2019 de présenter un concept d'encouragement concret pour les bus électriques d'ici fin 2020 afin de couvrir les coûts supplémentaires d'acquisition et d'exploitation¹⁰¹.

Selon l'ordonnance sur les contributions de l'État à la loi sur l'énergie (EnGVB)¹⁰² du canton de Soleure, des aides financières sont disponibles pour des projets visant à tester de nouvelles technologies énergétiques, pour des installations de démonstration ou pour des projets spéciaux dans le domaine de l'efficacité énergétique ou des énergies renouvelables. Les contributions pour ces projets, compte tenu des contributions de la Confédération et de tiers, ne peuvent pas dépasser 50 pour cent de la dépense totale.

⁹⁸ E-Bus: Einführung von Elektrobussen mit Schnellladesystem Erweiterung des VBSH-Depots Ebnat, projet du conseil municipal du 30 avril 2019.

⁹⁹ E-Bus: Einführung von Elektrobussen mit Schnellladesystem Erweiterung des VBSH-Depots Ebnat, projet du conseil municipal du 30 avril 2019.

¹⁰⁰ BGS 732.1.

¹⁰¹ Solothurner Zeitung 2019 : Regierungsrat will E-Busse fördern, <https://www.solothurnerzeitung.ch/solothurn/kanton-solothurn/regierungsrat-will-e-busse-foerdern-136135565> consulté le 23.03.2020.

¹⁰² BGS 941.24.

Canton de Schwyz

Dans la loi cantonale sur la promotion des transports publics du 26 novembre 1987¹⁰³, il n'existe pas d'objectifs concernant la protection de l'environnement et les technologies de propulsion alternatives. La stratégie de transport public 2030 d'avril 2014 a défini deux mesures pour une mise en œuvre à moyen terme.

1. Le canton s'engage à ce que les entreprises de transport se procurent des véhicules respectueux de l'environnement.
2. La consommation d'énergie par kilomètre de parcours est progressivement réduite.

La loi cantonale sur l'énergie¹⁰⁴ ne prévoit pas de mesures de soutien spécifiques à la mobilité durable. Cependant, la stratégie énergétique du canton de Schwyz pour les années 2013-2020 a noté que les incitations à l'utilisation de véhicules à moteur efficaces sur le plan énergétique et environnemental devraient être renforcées lors d'une révision de la loi¹⁰⁵.

Selon une enquête, la mise en place d'une ligne de bus électrifiée dans le canton de Schwyz serait examinée. Toutefois, les conditions de financement n'ont pas encore été définies.

Canton de Saint-Gall

La loi cantonale sur les transports publics du 17 novembre 2015 vise une mobilité respectueuse de l'environnement (art. 1 al. 2 let. b). Pour les mesures visant à améliorer l'efficacité énergétique, les contributions aux coûts supplémentaires peuvent être versées au ETC sous forme d'indemnité unique ou récurrente (art. 18 ÖVG).

Les principes correspondants sont définis dans la stratégie globale des transports. La stratégie des transports publics du canton de Saint-Gall définit deux objectifs pour la réduction de la consommation d'énergie et de ressources ainsi que de la charge sur la population et l'environnement :

3. L'efficacité énergétique des transports publics est renforcée.
4. L'impact environnemental des transports publics par voyageur-kilomètre est réduit. La stratégie de bus électriques du canton devrait être achevée en mars 2020.

Exemple de Verkehrsbetriebe St. Gallen (VBSG)

Le concept énergétique 2050 (EnK 2050) de la ville de Saint-Gall a défini cinq principes pour un avenir énergétique durable. Le concept de mobilité 2040 de la ville, qui date de 2015, stipule que les transports publics devraient fonctionner avec des véhicules électriques ou hybrides.

Pour le renouvellement de la flotte des VBSG et la conversion de trois lignes (3, 4, 6) aux trolleybus à batterie, le parlement de la ville a approuvé un crédit d'engagement de 37,5 millions de francs. La décision du parlement de la ville a été approuvée par une votation populaire en novembre 2018. La participation de la Confédération dans le cadre du projet d'agglomération est envisagée. Le canton, en tant que commanditaire des services VBSG, financera les surcoûts (sous forme d'indemnités récurrentes)¹⁰⁶.

¹⁰³ SRSZ 781.100.

¹⁰⁴ SRSZ 420.100.

¹⁰⁵ Conseil d'État du canton de Schwyz 2013 : Energiestrategie 2013 – 2020 des Kantons Schwyz, https://www.energie-zentralschweiz.ch/fileadmin/user_upload/Downloads/SZ/13_SZ_Energiestrategie.pdf consulté le 23.03.2020.

¹⁰⁶ Volksabstimmung vom 25. November 2018 / 6, VBSG-Flottenerneuerung und Umstellung der Linien 3 Heiligkreuz – St. Josefen, 4 Wittenbach – Säntispark und 6 St. Georgen – Heiligkreuz auf Batterietrolleybus-Betrieb

Canton de Thurgovie

À l'art. 1 al. 2 de la loi cantonale sur la promotion des transports publics (FöVG) du 01.07.2015¹⁰⁷, il est noté que les mesures de promotion en faveur des transports publics de voyageurs doivent notamment être respectueuses de l'environnement¹⁰⁸. Selon le concept TRV du canton de Thurgovie 2019-2024, les transports publics doivent être exploités de manière aussi efficace et écologique que possible. Les offres de transport public doivent correspondre aux dernières technologies environnementales, dans la mesure où cela est proportionné et économiquement raisonnable (art. 11 de l'ordonnance du Conseil d'État sur la loi relative à la promotion des transports publics, FöVV).

La stratégie n'est pas encore disponible, mais elle est en cours de planification. Dans le rapport de synthèse « Chancen der Elektromobilität für den Kanton Thurgau » (Opportunités de la mobilité électrique pour le canton de Thurgovie) de mars 2018¹⁰⁹, différentes mesures ont été formulées, l'utilisation de bus électriques devant être testée dans le cadre de projets pilotes et de démonstration.

Le programme cantonal de promotion de l'énergie ne finance aucune mesure de promotion des bus à faibles émissions.

Canton du Tessin

La loi cantonale sur les transports publics (Legge sui trasporti pubblici (LTPub) du 6 décembre 1994¹¹⁰) stipule que le canton peut réaliser ou contribuer à des études, des travaux de recherche et des essais de nouvelles techniques ou de nouveaux services visant à réduire les impacts environnementaux.

En outre, l'art. 7 de la loi sur l'énergie du canton du Tessin (Legge cantonale sull'energia [Len]¹¹¹) stipule que le canton doit promouvoir la mobilité durable par le biais d'un soutien financier. Des mesures concrètes de mise en œuvre sont définies dans le plan énergétique cantonal de 2013¹¹². Cette mesure prévoit un fonds pour la promotion du transport routier durable. 95 pour cent des fonds, soit environ 30 à 35 millions de francs pour la période de 2014 à 2020, seront alloués à l'acquisition de véhicules à faibles émissions de CO₂¹¹³, dont les entreprises de transport public pourront également bénéficier. Cependant, jusqu'à présent, seuls les véhicules d'un poids maximal de 3,5 tonnes sont subventionnés, tandis que des véhicules plus lourds pourraient également être envisagés à l'avenir.

¹⁰⁷ RB 742.1.

¹⁰⁸ Dans l'ordonnance du Conseil d'État relative à la loi sur la promotion des transports publics (FöVV), les mesures de promotion respectueuses de l'environnement sont définies comme la conversion aux dernières technologies environnementales, dans la mesure où cela est proportionné et économiquement raisonnable.

¹⁰⁹ Dept. für Inneres und Volkswirtschaft Thurgau 2018: Chancen der Elektromobilität für den Kanton Thurgau – Grundlagenbericht, https://energie.tg.ch/public/upload/assets/66092/2018-03-26_Chancen_Emob_TG_Grundlagenbericht_inkl._Titelbild_v2.pdf consulté le 23.03.2020.

¹¹⁰ RL 752.100.

¹¹¹ RL 740.100.

¹¹² GLEn 2013 : Piano Energetico Cantonale (PEC) – Piano d'azione 2013, https://www4.ti.ch/fileadmin/GENERALE/piano_energetico_cantonale/documenti/PEC_Piano_azione_2013.pdf consulté le 23.03.2020.

¹¹³ Moins un véhicule émet de CO₂, plus les subventions versées sont élevées.

Exemple de CarPostal SA et Azienda Elettrica Ticinese (AET)

En 2019, CarPostal SA et le prestataire tessinois de services énergétiques AET ont signé une déclaration d'intention pour promouvoir conjointement l'électromobilité dans les transports publics du canton du Tessin¹¹⁴. La coopération prévoit que CarPostal SA planifie l'utilisation et la gestion des véhicules électriques et qu'AET, avec d'autres partenaires, fournisse l'infrastructure de recharge et l'énergie renouvelable. Dans une première phase, il s'agit d'identifier les véhicules et les lignes de bus appropriés. Le financement de ces surcoûts n'est pas encore défini.

Canton d'Uri

La loi d'Uri sur la promotion des transports publics (Verkehrsgesetz) du 22 septembre 1996¹¹⁵ stipule que l'effet durable sur l'environnement, entre autres, doit être pris en compte lors de la commande de l'offre de services. Il n'existe actuellement aucune stratégie visant à promouvoir les systèmes de propulsion alternatifs.

La loi sur l'énergie du canton d'Uri (EnG)¹¹⁶ stipule que le canton peut soutenir des projets et des installations dans les domaines de la recherche, de la production, de l'utilisation, de l'application et de la distribution régionale. Elle promeut notamment des mesures d'utilisation économique et rationnelle de l'énergie en lien avec des sources d'énergies renouvelables ou des sources d'énergie d'origine domestique, ainsi que des mesures d'exploitation de la chaleur dégagée. Le programme cantonal d'encouragement Énergie 2020 ne soutient aucune mesure dans le secteur des transports publics.

Canton de Vaud

La loi sur la mobilité et les transports publics (LMTP) du 11 décembre 1990¹¹⁷ définit notamment l'objectif de promouvoir le développement des services de transport public, en tenant compte de la protection de l'environnement et des économies d'énergie possibles. La loi prévoit des subventions pour, entre autres, les investissements en matériel, l'acquisition de véhicules et l'introduction de nouveaux moyens de transport. La loi sur l'énergie du canton de Vaud (LVLEne)¹¹⁸ oblige également le canton et les communes à promouvoir l'utilisation de transports durables.

Le canton de Vaud dispose d'un programme de subvention des études municipales visant la promotion de la mobilité électrique¹¹⁹, en vigueur depuis octobre 2019.

¹¹⁴ Corriere del Ticino 2019 : Autobus elettrici per il Ticino, https://www.cdt.ch/ticino/autobus-elettrici-per-il-ticino-BC1848047?_sid=hYNIX0FZ

¹¹⁵ RB 50.5111.

¹¹⁶ RB 40.7211.

¹¹⁷ BLV 740.21.

¹¹⁸ BLV 730.01.

¹¹⁹ Subvention des études municipales visant la promotion de la mobilité électrique.

Les études éligibles pour ce soutien financier sont notamment celles qui examinent l'utilisation des véhicules électriques de transport de voyageurs ainsi que leur infrastructure de recharge. Un soutien est accordé aux études réalisées par des communes ou une association de communes, tandis que les autres institutions et entreprises ne peuvent pas bénéficier de ce programme.

Exemple des Transports publics de la région lausannoise SA (TL)

Après une phase de test à Lausanne en 2017 avec un trolleybus à double articulations de l'entreprise de transports publics lucernoise, les TL ont décidé de mettre progressivement en service douze de ces bus à partir de fin 2020. Le coût total de ces bus est d'environ 16,5 millions de francs¹²⁰. Dans l'enquête d'Infras qui accompagnait ce rapport, la société a indiqué que sa stratégie de décarbonisation se concentre sur les trolleybus parce qu'ils sont les plus efficaces sur le plan énergétique. Jusqu'à présent, l'entreprise n'a reçu aucune subvention pour l'achat de ces bus, car les programmes de subvention existants sont principalement axés sur les bus électriques.

Canton de Zoug

La loi cantonale sur les transports publics du 22 février 2007¹²¹ ne prévoit pas d'objectifs en matière de protection de l'environnement. En ce qui concerne la promotion du transport par bus sans carburant fossile, le plan directeur cantonal du 6 septembre 2018¹²² indique que l'utilisation des véhicules doit être basée sur l'état de la technique. Les surcoûts peuvent en principe être financés par le budget ordinaire des transports publics.

Cependant, la loi zougnoise sur l'énergie¹²³ permet au canton de mettre en œuvre des programmes de soutien avec des crédits-cadres orientés vers les possibilités d'énergies renouvelables dans le canton. Le programme énergétique cantonal se concentre sur les bâtiments.

Exemple des Zuger Verkehrsbetriebe (ZVB)

Les ZVB ont effectué un certain nombre d'essais avec des bus électriques afin d'acquérir des connaissances sur leur utilisation dans le réseau de transport public de Zoug, notamment en testant leur autonomie sur les routes de montagne et leur production d'énergie en descente. À l'automne 2019, les ZVB, en coopération avec Bus Ostschweiz AG, ont ensuite introduit le premier bus entièrement électrique avec système de recharge au dépôt. Dès que cela sera techniquement réalisable et financièrement viable, les ZVB continueront de développer l'électromobilité¹²⁴.

¹²⁰ TL, sans date : Une nouvelle étape dans la concrétisation des projets de bus à haut niveau de service (BHNS) de l'agglomération lausannoise, <https://www.t-l.ch/en/component/content/article/119-communicues-de-presse/archives-2019/748-une-nouvelle-etape-dans-la-concrétisation-des-projets-de-bus-a-haut-niveau-de-service-bhns-de-l-agglomeration-lausannoise>, consulté le 23.03.2020.

¹²¹ BGS 751.31.

¹²² BGS 711.31.

¹²³ BGS 740.1.

¹²⁴ ZVB, sans date : Testbetrieb mit Elektro-Gelenkbus, <https://www.zvb.ch/unternehmen/zvb-news/detail/testbetrieb-mit-elektro-gelenkbus/> consulté le 23.03.2020.

Canton du Valais

La loi valaisanne sur les transports publics (LTP) du 28.09.1998¹²⁵ vise, entre autres, la préservation et la protection de l'environnement ainsi que la consommation rationnelle de l'énergie.

La loi cantonale sur l'énergie (LcEne)¹²⁶ permet de financer les mesures de soutien à l'utilisation des énergies renouvelables par le biais d'un fonds énergétique. Aucune mesure de transport public n'est envisagée dans les programmes de promotion énergétiques 2020¹²⁷.

À long terme, le canton du Valais s'est fixé comme objectif de réduire la consommation d'énergie dans la mobilité de 46 pour cent entre 2015 et 2035, notamment en favorisant l'électromobilité¹²⁸. Selon une enquête, dans le canton du Valais, les surcoûts engagés pour l'acquisition d'un bus à entraînement alternatif par rapport à un bus diesel standard sont remboursés.

Canton de Zurich

La loi sur les transports publics de voyageurs (PVG) du 6 mars 1988 ne prévoit aucune obligation légale ni aucun objectif concernant l'utilisation de véhicules à faibles émissions et efficaces en énergie. Le Züricher Verkehrsverbund (ZVV) est chargé de garantir la desserte de base. Le concept global des transports du canton de Zurich 2018 poursuit l'objectif de réduire la consommation de ressources et la charge sur les personnes et l'environnement (canton de Zurich 2018)¹²⁹. Selon la priorité d'action HS8, l'utilisation de véhicules écologiques est soutenue, par exemple dans le cadre de projets pilotes d'intérêt public. Le ZVV encourage l'acquisition de véhicules de transport public efficaces en énergie (bus hybrides et trolleybus) conformément aux exigences du Conseil cantonal, en tenant compte d'un rapport coût-bénéfice approprié. Le financement est assuré en conséquence par le budget ordinaire des transports publics (selon le modèle ZVV). Il n'existe pas de programme de soutien cantonal supplémentaire incluant les transports publics.

Selon le rapport stratégique de ZVV, l'objectif est de fournir des services respectueux de l'environnement et économes en énergie (ZVV 2019)¹³⁰. Le développement d'un concept global d'électromobilité pour la ville de Zurich fait actuellement l'objet d'un appel d'offres et devrait être disponible d'ici fin 2021.

¹²⁵ SGS 740.1.

¹²⁶ SGS 730.1.

¹²⁷

<https://www.vs.ch/documents/87616/2371334/Directive+relative+aux+programmes+de+promotion+%C3%A9nerg%C3%A9tiques+2017+dans+le+Canton+du+Valais/6540f1b3-5b1e-4daf-b0d5-88f69375f177>

¹²⁸ Canton du Valais 2019 : Le Valais, Terre d'énergies : Ensemble vers un approvisionnement 100% renouvelable et indigène – Vision 2060 et objectifs 2035,

<https://www.vs.ch/documents/529400/5490636/Brochure+vision+%C3%A9nerg%C3%A9tique.pdf/520f9a64-9a54-4724-896d-5ebb54266875?t=1556517262060> consulté le 23.03.2020.

¹²⁹ Canton de Zurich 2018 : Gesamtverkehrskonzept Kanton Zürich 2018, Regierungsrat des Kantons Zürich mit Beschluss vom 9. Januar 2018 (RRB Nr. 25/2018).

¹³⁰ ZVV 2019 : Strategie 2022–2025, Grundsätze über die Entwicklung von Angebot und Tarif im öffentlichen Personenverkehr, Erläuternder Bericht, Zurich, juillet 2019.

Exemple de Verkehrsbetriebe Zürich (VBZ)

Dans la ville de Zurich, selon la stratégie des bus électriques de Verkehrsbetriebe Zürich (« eBus VBZ »), le passage des lignes de bus diesel aux bus hybrides et électriques se fait en fonction de la zone d'intervention ou du cas d'application. Dans le cadre du programme d'encouragement « Bus électriques et hybrides » de myclimate, l'acquisition de 19 bus hybrides a été soutenue financièrement par les VBZ (cf. chap. 5.2.2). Les VBZ ont résilié le contrat avec myclimate à la fin de 2019 afin de pouvoir imputer entièrement les réductions de CO₂ aux VBZ et de pouvoir ainsi revendiquer une contribution aux objectifs environnementaux de la ville de Zurich dans le cadre de la « société à 2000 watts ». Le passage des lignes de bus diesel aux trolleybus (lignes 69 et 80) est cofinancé dans le cadre du projet d'agglomération de la Confédération (3^e génération) à hauteur de 40 pour cent des coûts imputables. En outre, de nouveaux modèles de trolleybus sont testés. Les VBZ ont développé une version « plus » du modèle SwissTrolley en collaboration avec l'industrie et les hautes écoles suisses, et après l'avoir testée avec un prototype en service.

La Confédération a soutenu ce projet dans le cadre du programme phare de l'OFEN dans le secteur des technologies propres.

L'acquisition de véhicules à faible taux d'émission et à haut rendement énergétique ainsi que l'infrastructure de recharge dans la zone de services de l'Elektrizitätswerk Zürich (ewz) peuvent également être cofinancées par le programme d'encouragement de la « société à 2000 watts » ou par le fonds d'économies d'électricité [*Stromsparfonds*]. Depuis 1991, les contributions aux mesures d'économie d'électricité et à la promotion des énergies renouvelables sont versées par le fonds d'économies d'électricité [*Stromsparfonds*]. Depuis 2016, les mesures d'encouragement visant à promouvoir les objectifs de « 2000 watts » sont combinées chez l'Elektrizitätswerk Zürich (tableau 20).

Tableau 19 : programme d'encouragement « 2000-Watt-Gesellschaft » (société à 2000 watts) (Zurich / Grisons)

Programme d'encouragement	2000-Watt-Gesellschaft
Soutien	Elektrizitätswerk Zürich (ewz)
Durée	illimité
But et finalités	▪ Utilisation efficace de l'électricité ▪ Utilisation de sources renouvelables pour la production d'électricité ▪ Réduction des gaz à effet de serre grâce à des applications électriques efficaces
Objet	Prestations en faveur de l'économie générale fournies par ewz pour le compte de la ville de Zurich et pour lesquelles ewz prélève une contribution sur la redevance d'utilisation du réseau conformément à la loi sur l'approvisionnement en électricité ▪ Conseil en énergie basé sur l'électricité ▪ Remboursements aux clients ▪ Contributions à des entreprises appartenant à la ville, travaux de recherche et développement, mesures d'éducation et de sensibilisation, entre autres : ▪ Les installations qui produisent de l'électricité à partir de sources d'énergies renouvelables (par exemple, les installations photovoltaïques, les centrales au biogaz, les petites centrales hydroélectriques et les installations éoliennes) ; ▪ Les installations et appareils qui consomment de l'électricité de manière particulièrement parcimonieuse (par exemple, les ampoules à économie d'énergie, les réfrigérateurs et congélateurs, ainsi que les véhicules électriques dont les valeurs de consommation sont particulièrement faibles) ; ▪ Les installations et les mesures qui permettent de réduire la consommation d'électricité (par exemple, renouvellement des installations d'éclairage électrique et amélioration des entraînements électriques) ; ▪ Les installations et mesures d'utilisation efficace de l'électricité, qui apportent une contribution considérable à la réduction des gaz à effet de serre (par exemple, les systèmes d'utilisation de la chaleur ambiante et résiduelle ainsi que l'électromobilité) ;

	▪ Les travaux de recherche et développement et les installations pilotes pour la production et l'utilisation rationnelles de l'électricité et pour la substitution efficace des carburants fossiles par l'électricité.
Destinataires	Les particuliers, les entreprises et les institutions dans la zone du réseau de distribution de la ville de Zurich et d'autres localités, si un mandat de prestations correspondant a été octroyé ¹³¹
Type et portée	Contributions pour les mesures et les installations : ▪ En règle générale, les contributions d'investissement qui sont déterminées, entre autres, individuellement et de manière forfaitaire : ▪ Encouragement des infrastructures de recharge privées : le financement est disponible pour les points de charge d'une capacité maximale de 22 kW. Pour les points de charge sans gestion de la charge, la contribution d'encouragement s'élève à 40 pour cent des coûts de l'infrastructure de charge et des coûts d'installation directs ou à 80 CHF/kW de puissance connectée. Le montant le plus bas est déterminant. - Pour les points de charge avec gestion de la charge, la contribution d'encouragement s'élève à 60 pour cent des coûts de l'infrastructure de charge et des coûts directs d'installation ou à 150 CHF/kW de puissance connectée. Le montant le plus bas est déterminant. ▪ Encouragement d'une infrastructure de recharge accessible au public : pour les points de charge jusqu'à 22 kW avec courant alternatif, la contribution d'encouragement s'élève à 40 pour cent des coûts de l'infrastructure de charge et des coûts d'installation directs ou à 120 CHF/kW de puissance connectée. Le montant le plus bas est déterminant. Les points de charge dont la puissance connectée est supérieure à 22 kW (stations de charge rapide) fonctionnent en courant continu (CC). La contribution d'encouragement s'élève à 60 pour cent de l'infrastructure de charge et des coûts directs d'installation ou à 200 CHF/kW de puissance connectée. Le montant le plus bas est déterminant. ▪ Encouragement d'une infrastructure de charge pour le transport public local de voyageurs : la contribution d'encouragement s'élève à 40 pour cent des coûts de l'infrastructure de recharge et des coûts directs d'installation. ▪ Encouragement des bus électriques pour le transport public local de voyageurs : la contribution d'encouragement s'élève à 30 pour cent du prix neuf du véhicule, y compris la batterie, ou à 30 pour cent des frais de leasing. ▪ Les autres financements nationaux, cantonaux, communaux ou privés sont pris en compte pour déterminer les contributions (principe de subsidiarité).
Procédure	Demande de financement (demande de contribution à ewz)
Directive sur le financement et autres documents	Ordonnance sur les prestations en faveur de l'économie générale de l'Elektrizitätswerk de la ville de Zurich (ewz) dans le cadre des objectifs 2000 watts (VGL ewz) Dispositions d'exécution de l'ordonnance sur les prestations en faveur de l'économie générale de l'Elektrizitätswerk de la ville de Zurich (ewz) dans le cadre des objectifs 2000 watts (AB VGL ewz) ewz 2019 : Profitieren Sie von Fördergeldern und Energieberatung, https://www.ewz.ch/content/dam/ewz/Privatkunden/Liegenschaften/Energieberatung/Broschuere_2000-Watt-Beitraege.pdf, consulté le 17.01.2020 ewz 2020 : 2000-Watt-Beiträge, https://www.ewz.ch/de/private/liegenschaften/energieeffizienz/foerderbeitrag.html, dernier accès le 17.01.2020

Tableau INFRAS.

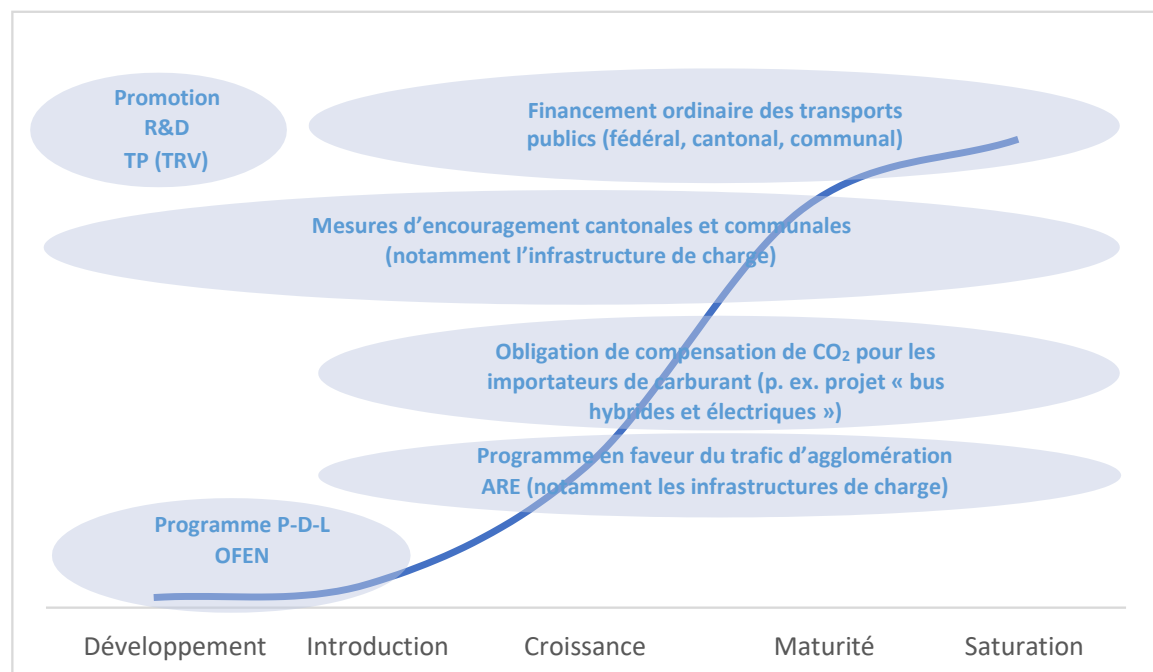
¹³¹ Localités éligibles dans le canton des Grisons : Almens, Alvaschein, Bivio, Brienz/Brinzauls, Cazis, Cunter, Dalin, Feldis, Flerden, Fürstenau, Fürstenaubruck, Lantsch/Lenz, Lain, Lenzerheide, Marmorera, Masein, Medels, Mon, Muldain, Mulegns, Muttén, Nufenen, Parsonz, Paspels, Portein, Pratval, Präz, Riom, Rodels, Rona, Rothenbrunnen, Salouf, Sarn, Savognin, Says, Scharans, Scheid, Solis, Stierva, Summaprada, Sur, Tartar, Tiefencastel, Tinizong, Trans, Trimmis, Tschappina (sans la fraction de Glas), Tumegl/Tomils, Untervaz, Urmein, Valbella, Zorten.

5.2.4. Conclusion intermédiaire

Les divers instruments et mesures de promotion nationaux déjà en place et le financement régulier des transports publics couvrent essentiellement toutes les phases du cycle de vie d'une technologie (figure 35). Les mesures de promotion cantonales et communales en plus du financement régulier des transports publics sont l'exception plutôt que la règle.

En ce qui concerne l'instrument de la compensation de CO₂ des importateurs de carburant (projet de compensation « Bus hybrides et électriques »), nous supposons qu'elle sera pertinente jusqu'à la phase de croissance ou de maturité du marché. Toutefois, le critère d'additionnalité ne devrait plus être rempli dès lors que les bus hybrides et électriques ont atteint un certain niveau de pénétration du marché et d'exigences des commanditaires dans le cadre de la commande et du financement adéquat des appels d'offres ou, le cas échéant, également dans le cadre du droit des marchés publics, et que la réduction des émissions ne peut donc plus être revendiquée.

Figure 35 : classification



Graphique INFRAS.

Les responsabilités, la portée et la couverture varient selon les possibilités de financement et les mesures existantes (tableau 20). Les processus suivent également des lois différentes. Le financement ordinaire des transports publics et le programme en faveur du trafic d'agglomération sont des processus réguliers et continus, qui commencent respectivement tous les deux à quatre ans.

Le financement ordinaire des transports publics implique les trois niveaux de collectivités territoriales, les cantons jouant un rôle central. Des mesures d'encouragement supplémentaires au niveau cantonal et communal n'existent que dans des cas individuels. La situation est donc complexe.

Tableau 20 : aperçu des mesures existantes de financement et de soutien des transports publics

Possibilité de financement/de soutien	Compétence	Véhicules		Infrastructure de charge		Zone de marché		
		Inv./amort.	CE	Inv./amort.	CE	TL	TRV	LG
Financement ordinaire des TP (fédéral, cantonal, communal)	Confédération, cantons, communes	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
R&D et innovations dans les TP grâce au crédit TRV (à partir de 2022)	Confédération (OFT)	✓		✓		(✓)***	✓	(✓)***
Programme P-D-L	Confédération (OFEN)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Programme du trafic d'agglomération (PTA)*	Confédération (ARE)	(✓)		✓		✓	(✓)	
Obligation de compensation de CO ₂ des importateurs de carburant, projet de compensation myclimate « Bus électriques et hybrides »**	myclimate / KliK Confédération (OFEV/OFEN)	✓				✓	✓	✓
Programme de soutien cantonal pour les infrastructures de recharge (p. ex., Berne)	Canton			✓		✓	✓	
Soutien communal pour les infrastructures de recharge (par exemple, Ökofonds/ewb)	Communes			✓		✓	(✓)	
Soutien communal pour le véhicule + l'infrastructure de recharge (par exemple, Stromsparfonds/ewz)	Communes	✓		✓		✓	(✓)	

Légende : ✓ oui / (✓) possible sous certaines conditions

Inv. : investissements, Amort. : amortissement, CE : coûts d'exploitation, TL : trafic local, TRV : trafic régional de voyageurs, GL : longue distance

* Le cofinancement des surcoûts pour l'acquisition de véhicules (notamment les véhicules électriques alimentés par biberonnage/rechargés au dépôt), à condition que ceux-ci permettent de réaliser des économies sur les coûts d'infrastructure des caténaires pour les trolleybus, est possible (art. 17a, al. 2^{bis} LUMin)

** Désormais aussi pour les trolleybus hybrides

*** Recherche et développement (R&D)

Tableau INFRAS.

Les mesures d'encouragement, en plus du financement ordinaire, sont principalement axées sur les véhicules à entraînement électrique (tableau 21). Les bus au biodiesel et à biogaz sont aujourd'hui financés principalement dans le cadre de la commande de transports publics. Les nouvelles solutions et les innovations au sens de la R&D ainsi que les innovations dans les transports publics (OFT) et le programme P-D-L (OFEN) ne sont pas pertinentes au regard de la pénétration du marché. Le programme en faveur du trafic d'agglomération (ARE) finance principalement des mesures d'infrastructure et, seulement dans des cas exceptionnels, l'acquisition de véhicules.

L'instrument de la compensation du CO₂ pour les importateurs de carburant ou le projet de « Bus électriques et hybrides » est le seul programme complémentaire existant au niveau national qui apporte un soutien financier pour les surcoûts des véhicules à énergies non fossiles ou à faible consommation de carburant, en plus du financement des transports publics. L'additionnalité doit être respectée et l'ET ne peut pas porter à son crédit la réduction de CO₂ en cas de cession aux importateurs de carburant soumis à l'obligation de compensation.

Tableau 21 : financement et options d'encouragement pour les véhicules et les systèmes de propulsion

	Bus électrique chargé au dépôt	Bus alimenté par biberonnage	Trolleybus à batterie	Bus électrique à pile à combustible	Bus au biodiesel	Bus à biogaz
Financement ordinaire des TP						
R&D et innovations dans les TP grâce au crédit TRV (à partir de 2022)						
Programme P-D-L*						
Programme du trafic d'agglomération (PTA)**						
Obligation de compensation de CO ₂ des importateurs de carburant, projet de compensation myclimate « Bus électriques et hybrides »						
Soutien communal pour le véhicule + l'infrastructure de recharge (par exemple, Stromsparfonds/ewz)						

* Bien qu'aucune technologie de propulsion ne soit exclue, les possibilités d'encouragement ont perdu de leur importance (manque de caractère innovant des nouveaux investissements).

* Le cofinancement des caténaires, des stations de recharge et des surcoûts pour l'acquisition de véhicules (notamment les véhicules électriques alimentés par biberonnage/rechargés au dépôt), à condition que ceux-ci permettent de réaliser des économies sur les coûts d'infrastructure des caténaires pour les trolleybus, est possible (art. 17a, al. 2^{bis} LUMin)

Tableau INFRAS.

Les points forts et points faibles des financements et possibilités d'encouragement existants sont résumés dans le tableau 22.

Tableau 22 : points forts et points faibles des instruments ou des mesures d'encouragement

Possibilités	Points forts	Points faibles
Financement ordinaire des TP	▪ Compensation possible des surcoûts annuels pour les véhicules et généralement aussi pour l'infrastructure de recharge (Confédération et presque tous les cantons) ▪ Processus continu (garantie de la desserte de base) ▪ Possibilité de crédits d'investissement supplémentaires (Confédération, cantons, communes) ainsi que de cautionnement de la Confédération pour les investissements dans le TRV ▪ Interface avec les stratégies des propriétaires (p. ex. Bâle-Ville)	▪ Lié au processus budgétaire (annuel), engagement généralement pour 2 ans (crédit d'engagement TRV de la Confédération pour 4 ans) ▪ Orientation généralement sur la base du dernier budget, rendement financier discutable (concurrence pour les fonds ou priorité pour maintenir l'offre existante) ▪ Pas de prise en compte actuelle des objectifs environnementaux dans le TRV (système de mesure de la qualité, SMQ) ▪ Conditions cadres différentes entre le TRV et le trafic local ainsi qu'entre les cantons ▪ Disponibilité très variable des ressources financières aux niveaux fédéral, cantonal et communal
R&D et innovations dans les TP grâce au crédit TRV (à partir de 2022)	▪ Promotion supplémentaire des innovations dans le TRV (développement, essais pilotes, etc.) ▪ Interface pour le financement ordinaire des transports publics (TRV)	▪ Restriction aux solutions nouvelles (pas d'exploitation pilote/de montée en puissance sur le marché), donc peu de poids ▪ Point faible si seul le TRV en bénéficie ▪ Lié au processus budgétaire ▪ Rendement financier (5 millions de CHF par an) discutable (p. ex. surcroît de dépenses)
Programme de promotion des projets pilotes et de démonstration et des projets phare (P-D-L)	▪ Possibilité de promotion supplémentaire des véhicules et de l'infrastructure de recharge (acquisition et exploitation) dans le trafic longue distance, régional et local ▪ Soutien de la mise en réseau	▪ Accent mis sur l'essai et la démonstration des innovations (pas de mise sur le marché), donc peu de poids en conséquence ▪ Interface supplémentaire pour le financement ordinaire des transports publics
Programme en faveur du trafic d'agglomération (PTA)	▪ Cofinancement supplémentaire relativement élevé des mesures d'infrastructure de transport (caténaires de trolleybus, stations de recharge aux arrêts ou dans les dépôts, y compris les installations électriques nécessaires), si un concept global est disponible (auprès du FORTA) ▪ Cofinancement des coûts supplémentaires pour le matériel roulant (y compris les véhicules routiers) si d'importants coûts d'infrastructure peuvent être économisés (notamment les surcoûts des nouvelles générations de bus électriques qui peuvent fonctionner sans caténaire)	▪ Pas de promotion générale de la conversion des bus diesel en bus sans fossile et efficaces en énergie (cofinancement dans des cas exceptionnels) ▪ Déroulement du processus relativement long (processus de planification des infrastructures)

Possibilités	Points forts	Points faibles
Obligation de compensation du CO₂ pour les importateurs de carburant, projet « bus électriques et hybrides » de myclimate	▪ Promotion de l'acquisition de nouveaux bus hybrides ou électriques (qu'il s'agisse de trafic local, régional ou longue distance) au lieu de bus diesel et, désormais, de trolleybus hybrides ▪ Possibilité de préfinancement au moment de l'investissement ▪ Pas de financement public et donc non lié au processus budgétaire (processus politique), processus d'inscription simple ▪ En principe, aucune limite au nombre de bus subventionnés ▪ L'instrument est ouvert à d'autres programmes/projets	▪ La contribution d'encouragement par tCO₂ n'est pas basée sur les surcoûts (résultat de la négociation myclimate/KliK) ▪ Programme particulièrement intéressant pour les participants qui montrent déjà une forte volonté de payer pour la conversion de la flotte ▪ Pas de crédit possible pour les ETC de la compensation de CO₂ ▪ Pas de promotion de l'infrastructure de recharge
Programme de soutien cantonal pour les infrastructures de recharge d'énergie (p. ex. Berne)	▪ Fonds supplémentaires au financement ordinaire des transports publics dans le TRV et le trafic local pour l'infrastructure de recharge ▪ Orientation sur les coûts d'investissement imputables	▪ Limité à l'infrastructure de recharge, aucune promotion de mesures structurelles supplémentaires pour l'installation ou le raccordement électrique ▪ Pas de crédit possible pour les ETC de la compensation de CO₂ ni de cession à d'autres organisations
Promotion communale des infrastructures de recharge (p. ex., ewb)	▪ Fonds supplémentaires au financement ordinaire des transports publics pour l'infrastructure de recharge, en particulier dans le trafic local (Ökofonds)	▪ Limité aux coûts d'investissement et limité localement ▪ Rendement financier discutable ▪ Pas de financement de véhicules
Promotion communale des véhicules et des infrastructures de recharge (p. ex., ewz)	▪ Fonds supplémentaires au financement ordinaire des transports publics, en particulier le trafic local (<i>Stromsparfonds</i>) ▪ Infrastructures de recharge et véhicules ▪ Orientation sur les coûts d'investissement imputables	▪ Limité aux coûts d'investissement et limité localement

Tableau INFRAS.

Étant donné que les transports publics sont commandés et financés par les pouvoirs publics, la question fondamentale se pose de savoir si des mesures d'encouragement supplémentaires sont nécessaires ou si le passage à des véhicules sans fossile et efficaces en énergie ainsi que leur pénétration dans les transports publics peuvent être encouragés dans le cadre du processus de commande (et également dans le cadre des objectifs stratégiques des entreprises, généralement publiques). Les cantons, qui coordonnent la commande de TRV et cofinancent souvent le trafic local, ont un rôle important à jouer à cet égard. Les stratégies et les concepts cantonaux pour des transports publics sans fossiles et efficaces sur le plan énergétique peuvent favoriser la pénétration. Mais il faut en même temps que les ressources financières correspondantes soient mises à disposition par la Confédération, les cantons et les communes.

La procédure de commande et le système de mesure de la qualité du TRV (comme base des conventions d'objectifs) ne tiennent pas compte aujourd'hui des objectifs environnementaux. L'introduction d'un système national d'étalonnage des performances pour tous les transports publics de passagers commandés est prévue (réforme TRV). Dans ce cadre, des objectifs environnementaux et un système de suivi et d'étalonnage correspondant pourraient être établis. Cela faciliterait la justification de tout surcoût dans le contexte des commandes et des achats. Cependant, il faut tenir compte du compromis avec les projets de compensation. Si le commanditaire spécifie les normes environnementales des bus à acquérir, le critère d'additionnalité ne peut plus être considéré comme prouvé dans le cadre de projets de compensation tels que le programme « Bus hybrides et électriques » de myclimate / KliK. Cet instrument national d'encouragement perdrait ainsi de son importance.

La principale incitation inopportune est le remboursement actuel de l'impôt sur les huiles minérales pour les ETC, qui constitue un soutien financier indirect pour les bus diesel. Si le remboursement de l'impôt sur les huiles minérales pour les ETC est supprimé et que les tarifs sont maintenus, le besoin de compensation des exploitants augmentera.

5.3. Regard sur l'étranger

Dans le cadre du projet, l'analyse a porté sur :

- le cadre juridique européen pour la promotion des véhicules routiers propres (directive sur les véhicules propres),
- diverses études de cas sur des pays sélectionnés,
- des documents internationaux sur les options d'achat et de financement (notamment en ce qui concerne les bus à entraînement électrique).

5.3.1. Cadre juridique européen (directive sur les véhicules propres)

La directive 2009/33/CE¹³² a été adoptée pour promouvoir les véhicules routiers propres. Les commanditaires publics¹³³ et les exploitants de services de transport public de voyageurs dans le cadre d'un contrat de prestations public¹³⁴ doivent tenir compte des impacts énergétiques et environnementaux, c'est-à-dire de la consommation d'énergie, des émissions de CO₂ ainsi que des émissions de NO_x, d'hydrocarbures non méthaniques et de particules, lors de l'achat de voitures particulières, de véhicules légers et lourds et de bus. Deux options ont été présentées pour la réalisation :

- L'établissement de spécifications techniques appropriées pour les performances des véhicules en fonction desquelles les achats sont effectués ; ou
- L'utilisation des impacts énergétiques et environnementaux comme critères d'achat ou d'adjudication.

Pour la deuxième option, la directive a défini une méthode de calcul des coûts d'exploitation sur toute la durée de vie des véhicules achetés en termes d'incidences énergétiques et environnementales (internalisation des coûts externes).

La transposition en droit national par les États membres était censée avoir lieu en décembre 2010, mais a été retardée¹³⁵. La majorité des États membres a autorisé les deux options. Parfois, une seule option a été choisie pour des raisons de simplicité et de cohérence avec les approches nationales existantes.

À la suite d'une évaluation ex-post, 6 ans après l'entrée en vigueur de la directive 2009/33/CE, son impact a été jugé limité et une adaptation a été recommandée (Brannigan et al. 2015). La directive révisée 2009/33/CE est entrée en vigueur en août 2019¹³⁶. Pour chaque État membre de l'UE, des objectifs minimaux sont à nouveau fixés sous la forme de pourcentages de véhicules propres de catégorie M (véhicules pour le transport de passagers) ou N (véhicules pour le transport de marchandises) dans le nombre total de véhicules de transport routier destinés aux marchés publics (achat, crédit-bail, location, location-vente) pour deux périodes (02.08.2021-31.12.2025 et 01.01.2026-31.12.2030). Les objectifs minimaux sont différenciés pour les véhicules utilitaires légers et lourds, les bus étant partiellement exclus du champ d'application.

¹³² Directive 2009/33/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 avril 2009 relative à la promotion de véhicules de transport routier propres à l'appui d'une mobilité à faible taux d'émission.

¹³³ Pouvoirs adjudicateurs publics et pouvoirs adjudicateurs qui sont tenus d'appliquer les procédures d'adjudication conformément aux directives 2014/24/UE sur les marchés publics et 2014/25/UE sur l'adjudication de marchés publics par des pouvoirs adjudicateurs opérant dans les secteurs de l'eau, de l'énergie, des transports et des services postaux.

¹³⁴ Selon le règlement (CE) 1370/2007 du Parlement européen et du Conseil du 27 octobre 2007 relatif aux services publics de transport de voyageurs par chemin de fer et par route, et abrogeant les règlements (CEE) n° 1191/69 et (CEE) n° 1107/70 du Conseil.

¹³⁵ Rapport de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au Comité des régions sur l'application de la directive 2009/33/CE relative à la promotion de véhicules de transport routier propres et économes en énergie, COM(2013) 214 final, Bruxelles, 18 avril 2013.

¹³⁶ Directive (UE) 2019/1161 du Parlement européen et du Conseil du 20 juin 2019 modifiant la directive 2009/33/CE relative à la promotion de véhicules de transport routier propres et économes en énergie.

Pour les véhicules utilitaires légers, ils se situent entre 38,5 pour cent et 17,6 pour cent et ne varient pas entre les deux périodes, les valeurs limite d'émission étant renforcées comme base de la définition d'un véhicule « propre » à partir du 1^{er} janvier 2026. Les objectifs pour les véhicules utilitaires lourds sont différenciés pour les camions et les bus et augmentent au cours de la période à partir du 1^{er} janvier 2026. Pour les bus concernés, des objectifs minimaux compris entre 24 pour cent (Roumanie) et 45 pour cent (Autriche, Allemagne, Pays-Bas, Royaume-Uni) s'appliqueront à partir de 2021. Ces chiffres augmentent à une valeur comprise entre 33 pour cent et 65 pour cent à partir de 2026. La France est le premier pays à avoir déjà adopté des prescriptions juridiques nationales¹³⁷.

La Commission européenne soutient le développement et la pénétration sur le marché des véhicules propres par des mesures d'encouragement ciblées au niveau européen, p. ex. :

- Connecting Europe Facility (CEF)¹³⁸ : cet instrument de financement de l'UE permet, entre autres, d'accorder des prêts pour l'acquisition de bus électriques et de leur infrastructure de recharge ou de cofinancer l'installation pionnière de stations de ravitaillement en hydrogène (Models for Economic Hydrogen Refuelling Infrastructure MEHRLIN) (Commission européenne, sans date, FuelCellBuses.eu, sans date).
- Trans-European Transport Networks (TEN-T) : le TEN-T est un programme de l'Union européenne composé d'un grand nombre de projets qui visent à assurer la cohésion, l'interconnexion et l'interopérabilité du réseau transeuropéen de transport ainsi que l'accès à ce réseau (INEA, sans date). Dans ce cas, les subventions pour les stations de recharge des bus électriques sont également abordées.
- Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU)¹³⁹ : dans le cadre du programme de recherche de l'UE « Horizon 2020 », l'acquisition de bus à hydrogène pour des projets de démonstration (Joint Initiative for hydrogen Vehicles across Europe JIVE/JIVE 2) est cofinancée par FCH JU (FuelCellElectricBuses.eu, sans date).

5.3.2. Études de cas à l'étranger

Dans le cadre de l'état des lieux, cinq pays ont été analysés avec leurs stratégies et programmes de promotion au niveau national et des exemples sélectionnés au niveau régional ou communal, avec l'examen d'autres mesures de promotion financière du côté de la demande en relation avec le transport public par bus (cf. tableau 23, fiches séparées).

¹³⁷ Loi n° 2019-1428 du 24 décembre 2019 d'orientation des mobilités (1).

¹³⁸ Le CEF est l'instrument de financement de l'UE pour les investissements stratégiques dans les infrastructures de transport, d'énergie et numériques. La vaste majorité du financement est allouée aux solutions de transport (INEA, sans date).

¹³⁹ FCH JU est un partenariat public-privé entre la Commission européenne et des représentants de l'industrie et de la recherche sur les véhicules à hydrogène.

Tableau 23 : vue d'ensemble des études de cas à l'étranger

Pays	Programmes nationaux de soutien	Exemples	Divers
Allemagne	▪ Sofortprogramm Saubere Luft 2017–2020 ▪ Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP II)	Stratégie des BVG (<i>Berliner Verkehrsbetriebe</i> – entreprise des transports publics berlinois)	Taxe sur l'électricité : réduite pour la recharge des bus électriques
France	MoëBUS	Bus des transports publics locaux à Paris : remplacement de l'ensemble de la flotte de 4'700 bus par des bus électriques ou à biogaz (financement par des <i>green bonds</i>)	▪ Redevance électrique : fortement réduite pour les ET de transports publics ▪ Introduction de zones à circulation restreinte (ZCR)
Angleterre	▪ Green Bus Fund (2009–2015) ▪ Low Emission Bus Scheme (2015–2017) ▪ Ultra-Low Emission Bus Scheme (2018–2021)	Versement de 6 pennies par kilomètre parcouru par les bus respectueux du climat (bonus)	Création de zones de bus à faibles émissions
Pays-Bas	▪ MIA (Environmental investment allowance) et Vamil (Random depreciation of environmental investments scheme) ▪ Programme d'encouragement « DKTI-Verkehr 2019 »	Accord national en vue de l'acquisition de bus à faibles émissions (<i>Bestuursakkoord Zero Emissie Regionaal Openbaar Vervoer Per Bus</i>)	Soutien considérable par les programmes d'encouragement de l'UE
Autriche	▪ Initiative pour la protection du climat « <i>klimaaktiv mobil</i> » ▪ Programmes d'encouragement « Zero Emission Mobility »	Holding Graz: <i>move2zero</i>	

TP : transports publics, ET : entreprise de transport

Tableau INFRAS. Sources : voir fiches séparées.

Allemagne

Le gouvernement fédéral encourage de manière significative l'électromobilité (achat de véhicules et de stations de recharge) et la modernisation des bus diesel (programme *Saubere Luft*) ainsi que l'utilisation de véhicules à pile à combustible dans les transports publics de proximité (Programme d'innovation *Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie* NIP). L'accent est mis sur la promotion des surcoûts d'investissement (par rapport à un bus diesel Euro VI comparable). Les surcoûts d'investissement pour les bus électriques sont subventionnés à hauteur de 80 % dans le cadre du programme de financement « *Elektrifizierung des Verkehrs – Anschaffung von Elektrobussen im öffentlichen Personennahverkehr* » du programme *Saubere Luft*. Pour les bus hybrides plug-in et les infrastructures de recharge, ce taux est de 40 pour cent.

Les Länder ont également lancé leurs propres programmes d'encouragement, en particulier dans le domaine de l'électromobilité, les contributions totales ne devant pas dépasser les contributions maximales prévues par les programmes de financement fédéraux. Les exemples évalués montrent qu'en raison des quotas de financement plus élevés du gouvernement fédéral par rapport aux programmes des Länder, le financement est de préférence assuré par des fonds du gouvernement fédéral (complétés par des fonds provenant de programmes de l'UE).

Le paysage du financement est très complexe – notamment en raison des différents programmes et appels à projets et des ministères fédéraux et collectivités territoriales impliqués – et la lourdeur de la bureaucratie est perçue comme un inconvénient. Selon une enquête menée auprès des communes allemandes, les obstacles dans le domaine de l'électromobilité sont non seulement le manque de ressources (financières, personnel) mais aussi le manque de savoir-faire.

Exemple des Berliner Verkehrsbetriebe (BVG)

En 2019, les Berliner Verkehrsbetriebe (BVG) ont annoncé leur intention de convertir l'ensemble de leur flotte de bus en véhicules électriques d'ici 2030. Dans un premier temps, l'achat de 225 bus électriques a été annoncé. Dans ce cas, les surcoûts d'investissement par rapport aux bus diesel classiques sont entièrement couverts par des subventions d'encouragement. Ainsi, un total de 48 millions d'euros a été pris en charge par le gouvernement fédéral dans le cadre du « *Sofortprogramms Sauber Luft 2017–2020* ». Sur ce montant, le ministère fédéral de l'environnement, de la protection de la nature et de la sécurité nucléaire (BMU) a contribué à hauteur de 35 millions d'euros, sur la base du programme « *Förderung der Anschaffung von Elektrobussen im ÖPNV* », et 13 millions d'euros supplémentaires ont été accordés par le ministère fédéral des transports et de l'infrastructure numérique (BMVI) dans le cadre du programme d'encouragement « *Eletromobilität* ». En outre, des fonds ont également été accordés par le Land de Berlin¹⁴⁰.

¹⁴⁰ BMVI 2019 : BMVI und BMU fördern Elektrobusse in Berlin, <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2019/023-scheuer-bmvi-bmu-elektrobusse.html> consulté le 23.03.2020.

France

La nouvelle loi globale sur l'énergie¹⁴¹ de 2015 fixe des objectifs ambitieux pour une transition énergétique dans le secteur des transports publics également. Lors du renouvellement de leur parc automobile, l'État et ses institutions publiques sont tenus d'acquérir au moins 50 pour cent de véhicules à faibles émissions de CO₂ et de polluants atmosphériques (véhicules à faibles émissions, par exemple électriques). Les autorités locales doivent veiller à ce que 20 pour cent de leurs véhicules de remplacement soient des véhicules à faibles émissions. Tous les nouveaux bus achetés à partir de 2025 et utilisés dans les transports publics devront être des véhicules à faibles émissions. En outre, l'infrastructure de recharge pour les véhicules électriques doit être fortement développée.

En ce qui concerne le soutien financier en plus du financement régulier des transports publics, il existe comparativement peu de programmes d'encouragement. Par le biais du programme de soutien MoëBUS (qui fait partie du Système Certificats d'économies d'énergie), l'achat de bus électriques et de leur infrastructure de recharge sera financé à hauteur de 36 millions d'euros¹⁴². L'objectif est de soutenir financièrement l'acquisition de 500 bus électriques (avec jusqu'à 200'000 euros pour un bus articulé) et la conversion de 50 dépôts de bus dans le cadre de ce programme en 2019 et 2020. Comme le montre l'exemple de Paris (voir encadré), d'autres instruments de financement sont également utilisés.

Exemple de la Régie autonome des transports parisiens (RATP) – bus2025

L'exploitant public des transports publics de Paris – la Régie autonome des transports parisiens (RATP) – s'est engagé en 2014 à exploiter l'ensemble de sa flotte de 4'700 bus de manière écologique d'ici 2025 et à convertir ses dépôts de bus en conséquence. Ainsi, environ deux tiers des bus seront alimentés à l'électricité et environ un tiers au biogaz¹⁴³. La mise en œuvre doit se dérouler en trois phases, les phases 1 et 2 étant achevées et un grand déploiement étant prévu à partir de 2018.

Ce projet ambitieux doit être financé principalement par des *Green Bonds*, c'est-à-dire des obligations financières dites « vertes » émises pour des projets de développement durable prédéfinis¹⁴⁴. En 2019, la RATP a émis des *Green Bonds* pour un volume de 500 millions d'euros et une échéance de 10 ans¹⁴⁵. Ces ressources financières doivent être utilisées, entre autres, pour la modernisation de la flotte de bus.

¹⁴¹ Loi de transition énergétique pour la croissance verte

¹⁴² http://www.avere-france.org/Site/Article/?article_id=7621

¹⁴³ RATP 2018 : bus2025 – The ambitious RATP plan for a 100% ecologically-friendly fleet, <https://www.ratp.fr/sites/default/files/inline-files/RATP%202025%20Bus%20Plan%20Press%20Kit.pdf>, 2018.

¹⁴⁴ RATP 2017 : RATP Green Bond Framework, <https://www.ratp.fr/sites/default/files/inline-files/RATP%20Green%20Bond%20Framework%20version%20finale%2025042018.pdf>, mai 2017.

¹⁴⁵ <https://www.ratp.fr/groupe-ratp/newsroom/corporate/succes-exceptionnel-de-la-deuxieme-emission-de-green-bonds-de-la>

Angleterre

Depuis 2009, les entreprises de transport public par bus reçoivent des subventions nationales pour l'achat de bus destinés à réduire les émissions de gaz à effet de serre. Entre-temps, le Department for Transport a lancé trois programmes de financement pour promouvoir des bus plus respectueux de l'environnement (« *Green Bus Fund* », « *Low Emission Bus Scheme* », « *Ultra-Low Emission Bus Scheme* »). Lors de la première étape du « *Green Bus Fund* » (2009), la totalité des surcoûts d'investissement a été payée par rapport à un véhicule de référence. Les quotas de financement ont été successivement réduits lors des cycles suivants et s'élevaient en 2013 à 50 pour cent ou, dans le cas des bus électriques, à 80 pour cent des surcoûts par rapport au véhicule de référence. Dans le programme suivant intitulé « *Low Emission Bus Scheme* », le montant du financement était basé sur les émissions de gaz à effet de serre économisées (« *well-to-wheel* »). Dans le cadre du programme actuel « *Ultra-Low Emission Scheme* », un maximum de 50 pour cent des surcoûts d'investissement (réduction d'au moins 30 pour cent des émissions de gaz à effet de serre par rapport au véhicule de référence Euro VI) ou 75 pour cent dans le cas des bus sans émissions et des infrastructures sont subventionnés.

Diverses mesures de soutien supplémentaires sont prises en plus des programmes d'encouragement continus pour les bus. Des bus respectueux du climat d'entreprises de bus proposant des transports publics de proximité au bénéfice d'une indemnisation reçoivent une incitation supplémentaire de 6 pence/kilomètre dans le cadre de la subvention au carburant (voir encadré suivant). Des mesures réglementaires dans des villes telles que Londres (par exemple, *Low Emission Bus Zones*) ont été introduites pour compléter le soutien financier.

Incitation financière dans le cadre de la subvention *Bus Service Operators Grant* (BSOG) du Department for Transport¹⁴⁶

Dans le cadre du BSOG, les entreprises de bus qui fournissent des services dans le secteur des transports publics de proximité et qui ont droit aux indemnités reçoivent des remboursements par litre de carburant sous certaines conditions. Dans ce contexte, les entreprises reçoivent une incitation financière supplémentaire de 6 pence/kilomètre (soit environ 7 centimes/km) pour les bus respectueux du climat. Les bus sont considérés comme respectueux du climat s'ils disposent d'un certificat prouvant que ces bus émettent 30 pour cent de gaz à effet de serre en moins par rapport à un bus diesel moyen de classe Euro III.

Pays-Bas

En 2019, le gouvernement a adopté un accord national sur le climat (« *Klimaatakkoord* »). Celui-ci stipule que les émissions nationales de CO₂ doivent être réduites de 49 pour cent d'ici 2030 par rapport aux émissions de 1990. Des objectifs sectoriels ont été formulés dans le domaine de la mobilité. D'ici 2050, l'ensemble du secteur des transports aux Pays-Bas devra être sans émission.

Des déductions fiscales ou des règles d'amortissement distinctes pour les investissements écologiques (*Environmental investment deduction MIA, Arbitrary depreciation of environmental investments Vamil*) sont nécessaires d'une part pour promouvoir les mesures visant à atteindre les objectifs climatiques. Ces programmes sont conçus pour donner aux entreprises des avantages en termes de liquidités et de taux d'intérêt. D'autre part, les projets d'innovation et de démonstration pour les véhicules de transport qui ne sont pas encore prêts pour le marché (*Demonstratie klimaattechnologieën en innovaties in transport, DKTI-transport*) reçoivent un soutien financier. La pénétration sur le marché n'est pas directement soutenue financièrement.

Le financement des projets européens est relativement important aux Pays-Bas. Par exemple, en 2019, la Banque européenne d'investissement (BEI) a accordé un prêt de 115 millions d'euros à l'exploitant de transports publics de la région de Rotterdam (RTE) pour financer, entre autres, l'acquisition de 105 bus électriques et de 103 bus hybrides diesel, ainsi que l'installation d'infrastructures de recharge pour ces bus dans les dépôts (32 stations de recharge) et le long des lignes de bus (17 stations de recharge). Ces subventions ont été rendues possibles par la BEI, le CEF et l'EFSI¹⁴⁷.

Les Pays-Bas avaient déjà adopté un accord sur l'acquisition de bus à émission zéro en 2016 (voir encadré).

Bestuursakkoord Zero Emissie Regionaal Openbaar Vervoer Per Bus (BAZEB)

En 2016, un accord sur l'acquisition de bus sans émissions a été signé entre le ministère néerlandais des infrastructures et de l'environnement, l'association des provinces néerlandaises et les régions métropolitaines de Rotterdam/La Haye et d'Amsterdam. Il stipule que seuls des bus sans émissions seront achetés à partir de 2025 et que tous les bus des transports publics devront être sans émissions d'ici 2030. En outre, l'électricité pour les bus électriques et l'énergie pour la production d'hydrogène doivent provenir entièrement de panneaux solaires et d'éoliennes de la région au plus tard en 2025.

¹⁴⁶ DfT 2019 : Bus Service Operators Grant: guidance for commercial transport operators, <https://www.gov.uk/government/publications/bus-service-operators-grant-guidance-for-commercial-transport-operators/bus-service-operators-grant-guidance-for-commercial-transport-operators>, 23 septembre 2019.

¹⁴⁷ https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_19_5952

Autriche

L'objectif central du gouvernement fédéral est de réduire les émissions de gaz à effet de serre afin d'atteindre la neutralité climatique d'ici 2050. La stratégie climatique et énergétique « #mission 2030 » a été publiée en 2018¹⁴⁸. Afin d'atteindre les objectifs, des mesures sont promues dans le cadre de divers programmes nationaux (« *klimaaktiv mobil* », « *Zero Emission Mobility* »). Des subventions fédérales sont versées pour le développement, les essais et l'acquisition de bus à entraînement alternatif dans les transports publics. L'accent est mis ici sur le financement des surcoûts d'investissement. Dans le programme d'encouragement actuel « *E-Mobilitätsmanagement, E-Flotten und E-Logistik* », dans le cadre de « *klimaaktiv mobil* », jusqu'à 30 pour cent des coûts d'acquisition sont subventionnés. Des taux de financement plus élevés sont possibles pour les projets de R&D dans le cadre de « *Zero Emission Mobility* ». En outre, la pénétration du marché doit également être encouragée par le fonds pour le climat et l'énergie.

Exemple de Holding Graz : *move2zero*

Avec son projet de transport *move2zero*, la ville autrichienne de Graz entend décarboner entièrement son réseau de bus. Cela devrait non seulement réduire les émissions de gaz à effet de serre, mais aussi améliorer la qualité de l'air urbain. Dans le cadre du programme autrichien de recherche et de démonstration « *Zero Emission Mobility* », un financement de 3,3 millions d'euros a été accordé dans un premier temps pour l'acquisition de sept bus électriques et de sept bus à entraînement par pile à combustible. Ces bus doivent desservir deux lignes de bus complètes en exploitation de démonstration de 2019 à 2023¹⁴⁹.

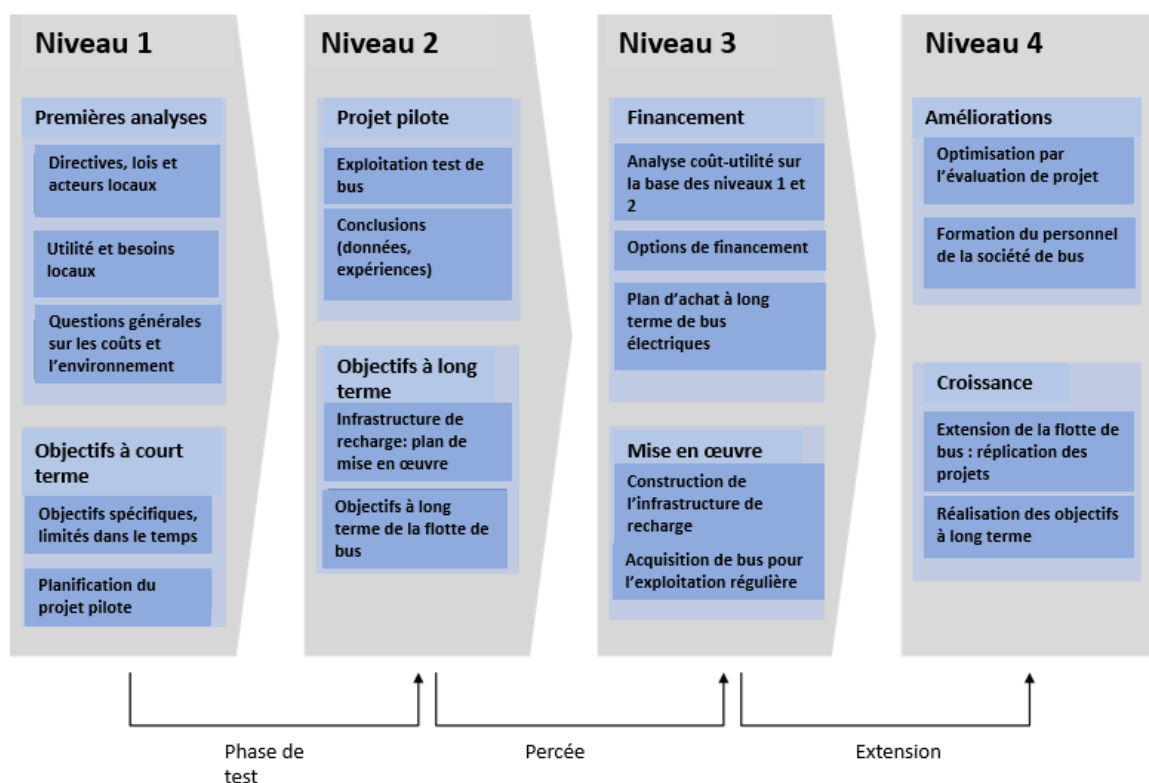
¹⁴⁸ BMNT et BMVIT 2018 : #mission2030 – Die österreichische Klima- und Energiestrategie, https://www.bundestkanzleramt.gv.at/dam/jcr:903d5cf5-c3ac-47b6-871c-c83eae34b273/20_18_beilagen_nb.pdf, consulté le 23.03.2020.

¹⁴⁹ Klima- und Energiefonds, sans date : *move2zero*, <https://www.klimafonds.gv.at/unsere-themen/mobilitaetswende/leuchttuerme-der-elektromobilitaet/move2zero/> consulté le 23.03.2020.

5.3.3. Options d'achat et possibilités de financement

En plus des études de cas, nous avons passé en revue la littérature internationale sur les options d'achat (théoriques) et les possibilités de financement afin d'identifier d'autres approches possibles qui concernent non seulement le financement mais aussi les marchés publics en général. Il convient de noter que les options de financement ne constituent qu'une partie du processus de mise en œuvre et doivent être considérées dans leur contexte (figure 36).

Figure 36 : processus d'introduction des bus électriques



Graphique INFRAS. Source : adapté de WRI 2019a.

Au cours de la première étape, il convient de vérifier si les conditions locales sont réunies pour l'introduction des bus électriques et de lancer un projet pilote. La deuxième étape concerne principalement la mise en œuvre du projet pilote. En outre, les développements futurs devraient déjà être pris en compte lors de la mise en place de l'infrastructure de recharge du projet pilote. Il est donc utile de définir déjà des objectifs à long terme pour la flotte de bus et de rédiger un plan de mise en œuvre à long terme pour l'infrastructure de recharge. L'étape 3 marque la percée de la technologie. En général, la durée de vie totale des bus électriques doit être prise en compte lors de l'examen du financement. Sur cette base, un plan d'achat à long terme peut être élaboré. L'étape 4 prévoit l'exploitation à grande échelle de bus électriques.

Obstacles financiers

Les pratiques d'achat des autorités et des entreprises de transport se concentrent souvent sur les coûts d'achat les plus bas possibles et les risques les plus faibles, et négligent l'ensemble du cycle de vie des bus. Les pratiques traditionnelles d'achat sont également souvent peu aptes à définir les responsabilités pour de nouveaux types de tâches, comme la fourniture d'électricité ou le financement et l'entretien du réseau de recharge.

L'introduction à grande échelle de bus sans fossile nécessite des investissements importants. Souvent, les options de financement se limitent à des subventions gouvernementales ponctuelles ou à des prix avantageux limités dans le temps, proposés par les producteurs de bus pour la mise en œuvre de petits projets (WRI 2019b). Si aucun financement permanent et à long terme n'est assuré, il existe un risque que l'acquisition de bus sans fossile ne dépasse pas la phase de projet pilote (cf. exemple de Madrid).

Exemple de Madrid : difficultés à étendre la flotte de bus électriques

À Madrid, 18 minibus électriques étaient déjà utilisés dans le secteur du tourisme en 2007. Cependant, la ville n'a pas réussi à tirer parti de cette situation en augmentant la flotte de bus électriques. Ce n'est qu'en 2018 que d'autres bus électriques ont été achetés, mais uniquement dans le cadre d'un projet pilote. Selon WRI (2019b), l'échec de Madrid à dépasser la phase de projet pilote peut être attribué à deux raisons principales. Si la ville a reçu de généreuses subventions ponctuelles pour les projets pilotes, il n'existait pas de programme de financement évolutif à long terme. La deuxième raison est l'attitude conservatrice et peu encline au risque des décideurs. Ces derniers veulent seulement introduire les bus électriques étape par étape et attendre en même temps les progrès technologiques. La décision a donc été prise de ne pas procéder à un achat à grande échelle de bus électriques.

Options d'achat

Outre le financement, diverses options d'achat sont également envisageables (tableau 24), ce qui peut être pertinent en ce qui concerne la répartition du risque technologique.

Tableau 24 : options d'achat pour les bus électriques

Option	Description
Achat au comptant	▪ Paiement anticipé de la totalité du prix d'achat ▪ Propriété de l'exploitant qui supporte le risque technologique ▪ Possibilité de subventions au moyen de fonds publics
Achat à crédit	▪ Une partie des coûts est payée d'avance, le reste est emprunté ▪ Propriété de l'exploitant ▪ Possibilité d'offrir des conditions de crédit favorables ▪ Crée des opportunités d'investissement dans des projets respectueux de l'environnement. Le prêteur supporte le risque de crédit, ce qui peut augmenter les coûts d'emprunt
Leasing financier	▪ Paiements de location des véhicules et/ou de l'infrastructure pour une période déterminée par l'exploitant ▪ Période de location proche de la durée de vie du bien loué ▪ Propriété du bailleur

Option	Description
	▪ Souvent une option d'achat pour les exploitants à la fin de la location ▪ L'option d'achat incite à une utilisation prudente des biens loués ▪ Avantages potentiels en matière de fiscalité et de TVA ▪ Offre en partie réservée aux collectivités locales présentant une solvabilité élevée
Leasing de l'exploitant	▪ L'exploitant paie pour l'utilisation d'un bus pendant une période déterminée ▪ Possession de l'exploitant mais pas de propriété ▪ Souvent une option d'achat pour les exploitants à la fin de la durée de location ▪ Réduit la charge financière pour l'exploitant ▪ Réduit les risques de performance liés aux nouvelles technologies pour l'exploitant ▪ L'option d'achat incite à une utilisation prudente ▪ Le fabricant supporte le risque opérationnel ▪ Attribution principalement à des exploitants financièrement solides ▪ Les nouvelles pratiques comptables compliquent ce type (l'actif reste au bilan)
Leasing de composants	▪ Location de sous-composants, notamment de batteries ▪ Le fabricant possède normalement la batterie pendant la période de location et la remplace lorsque cela est nécessaire ▪ Réduit la charge financière pour l'exploitant ▪ Réduit les risques de performance liés aux nouvelles technologies pour l'exploitant ▪ Le fabricant assume le risque technologique

Tableau INFRAS. Sources : ICCT (2017), WRI (2019c)

Sur la base d'études internationales, quatre catégories d'options de financement et de soutien peuvent être résumées (tableau 25).

Tableau 25 : financement et options de financement des bus électriques au niveau international

Catégorie	Sous-catégorie	Description	Exemple
Subventions et avantages monnayables	Subvention des dépenses d'investissement	▪ Sur des fonds publics ou privés ▪ Surmonter les coûts initiaux élevés des bus électriques et de leur infrastructure	Green Bus Fund, Angleterre
	Subvention pour la recherche, le développement et les essais techniques	▪ Sur des fonds publics ou privés ▪ Développement technologique, réduction des coûts et projets pilotes et de démonstration	Zero Emission Urban Bus System (ZeEUS), Union européenne
	Subvention des dépenses d'exploitation	▪ Réduire l'incertitude opérationnelle liée aux nouvelles technologies	Berlin, Allemagne
	Répartition étatique des zones	▪ Possibilité d'utiliser des terrains ▪ Particulièrement utile pour les infrastructures de recharge	Pomona Valley, États-Unis
Prêts et emprunts	Prêt préférentiel	▪ Surtout pour les entreprises de transport privées	Curitiba, Brésil

Catégorie	Sous-catégorie	Description	Exemple
		- Conditions de prêt avantageuses (taux d'intérêt plus bas, périodes de remboursement plus longues) - Normalement fournis par les banques et agences de développement nationales et internationales	
	Green Bonds	- Surtout pour les entreprises de transport public - Conditions de prêt avantageuses (taux d'intérêt plus bas, périodes de remboursement plus longues) - Obligations, dont au moins 95 pour cent des fonds sont utilisés pour des projets respectueux de l'environnement	RATP Paris, France
Allègements fiscaux	Réduction de l'impôt sur les sociétés	- Taxes sur la valeur ajoutée/impôt sur la plus-value - Incitations financières pour les entreprises de bus privées	Shenzhen, Chine
	Renonciation/réduction de la taxe sur la valeur ajoutée	Incitations financières pour les producteurs privés et les exploitants de bus	Entreprises de transport de passagers en France, en Allemagne, aux Pays-Bas, etc.
	Renonciation aux taxes à l'importation	- Réduit les prix des bus électriques importés - Crée un avantage financier par rapport aux bus diesel conventionnels	Bogotá, Colombie
Autres indemnités	Compensation du prix de l'électricité	- Volontaire par le fournisseur d'énergie ou dû à la réglementation - Réduit les frais d'exploitation	Entreprises de transport allemandes
	Abandon/Réduction de la taxe environnementale	- Réduction des taxes sur la consommation d'électricité - Réduit les frais d'exploitation	Londres, Royaume-Uni

Tableau INFRAS. Source : WRI (2019c), Li, Castellanos and Maassen (2018)

5.3.4. Conclusion intermédiaire

- Selon le cadre juridique européen (directive sur les véhicules propres), l'encouragement des véhicules à motorisation alternative est visé d'une part par des exigences en matière d'achat (part minimale de véhicules propres dans le nombre total de véhicules achetés) et d'autre part par des mesures de soutien financier correspondantes. La directive adaptée a jusqu'à présent été transposée en droit national en France.
- Les études de cas sélectionnées révèlent de grandes différences au niveau des mesures d'encouragement financières et des stratégies nationales en matière d'encouragement. Dans le cadre d'une comparaison avec l'étranger, il convient toujours de considérer les mesures d'encouragement dans le contexte des conditions-cadres réglementaires et des responsabilités financières relatives aux transports publics, en tenant également compte des éventuelles mesures complémentaires.
- En Allemagne et en Grande-Bretagne, la pénétration sur le marché des bus utilisant une énergie non fossile est largement soutenue sur le plan financier dans le cadre de programmes d'encouragement nationaux. Des taux d'encouragement très élevés, pouvant ensuite être abaissés progressivement (cf. l'exemple de l'Angleterre), sont octroyés en particulier au début pour les surcoûts d'investissement. En Allemagne, le taux d'encouragement s'élève actuellement à 40 pour cent (bus hybrides plug-in et infrastructure de recharge), voire à 80 pour cent (bus électriques) des surcoûts d'investissement. En Angleterre, le montant de la contribution est désormais ajusté aussi bien aux coûts d'investissement supplémentaires qu'à la réduction des quantités de CO₂ émises.
- Les Pays-Bas et la France appliquent des objectifs sectoriels. La pénétration sur le marché est ancrée dans la loi sous forme d'exigences minimales concernant l'acquisition de nouveaux véhicules.
- Des mesures d'ordre réglementaire (zones environnementales pour les bus), telles que celles introduites en France et en Grande-Bretagne, peuvent compléter l'encouragement de la pénétration sur le marché.

6. Synthèse

6.1. Potentiel des bus sans fossile et surcoûts

Comme expliqué au chapitre 4.8, les bus à batterie figurent au premier rang en tant qu'option de propulsion utilisant une énergie non fossile pour le remplacement des bus diesel dans une perspective globale des coûts et des avantages écologiques.

Potentiel maximal pour les bus à batterie sans fossile

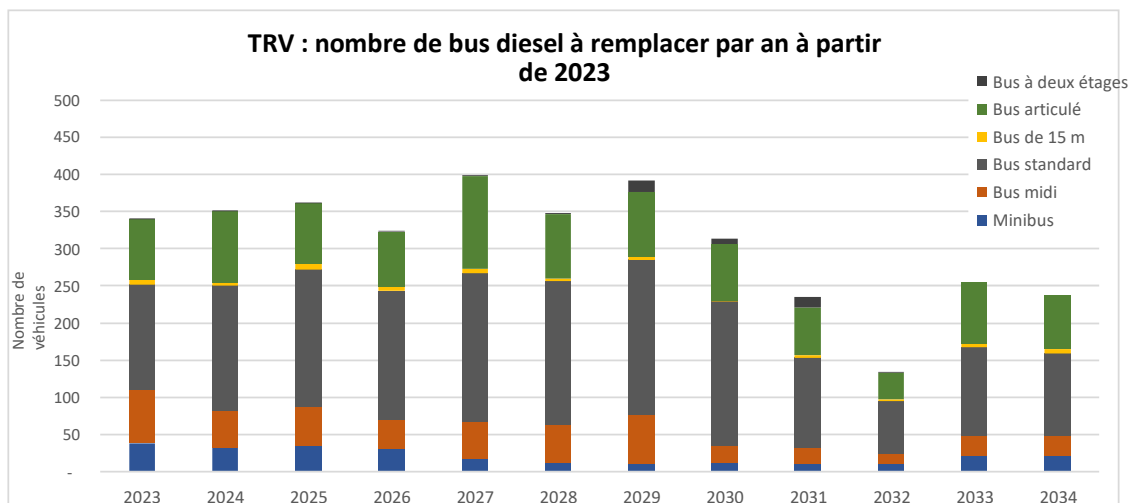
Les figures 37 et 38 montrent combien de bus doivent être remplacés au cours des prochaines années dans le trafic régional de voyageurs et le trafic local. Les hypothèses suivantes ont été formulées :

- D'après l'enquête auprès des ET dans le cadre de l'analyse de l'état des lieux, 36 pour cent des bus diesel ne peuvent être clairement affectés aux secteurs « TRV » et « trafic local » (cf. chapitre 2.2). Cette part est répartie de manière pragmatique entre les secteurs du trafic local et du TRV dans un rapport de 60:40.
- Selon les informations des ET sur la mise en exploitation et la période d'amortissement (comptable), environ 800 bus auraient dû être remplacés dans les années 2012-2020 (cf. chapitre 2.2, figure 7). Nous supposons ici que ces bus, qui sont évidemment utilisés pendant leur période d'amortissement comptable, seront remplacés au cours des 10 prochaines années (hypothèse d'une distribution linéaire). Dans le cas de ces véhicules de la période 2012-2020, il est tout à fait possible que tous les bus ne soient pas réellement remplacés, par exemple parce qu'ils ne sont conservés que comme véhicules de réserve pour les urgences. Toutefois, en raison de nouveaux aménagements d'offres, il est également probable que des bus supplémentaires soient acquis. Nous supposons ici, de manière pragmatique, que ces effets s'équilibrent.
- Nous supposons en outre que, parmi les bus à remplacer en 2021 et 2022, la moitié représente déjà un potentiel de remplacement par des bus à batterie à partir de 2023 (une date antérieure n'est pas possible en raison des procédures d'achat/de commande). Ici aussi, nous supposons que cela s'étalera sur plusieurs années. L'autre moitié sera à nouveau remplacée par des bus diesel ou diesel-hybride, ce qui, 12 ans plus tard, c'est-à-dire à l'horizon 2033/2034, représente un potentiel supplémentaire de remplacement par des bus à batterie.

Avec ces hypothèses, le potentiel maximum pour les bus à batterie dans les 15 prochaines années est d'environ 3'700 véhicules dans le trafic régional (jusqu'à 400 bus par an) et d'environ 1'800 véhicules dans le trafic local (100-200 bus par an). **D'un point de vue purement technique, ce potentiel est réalisable dans son intégralité.**

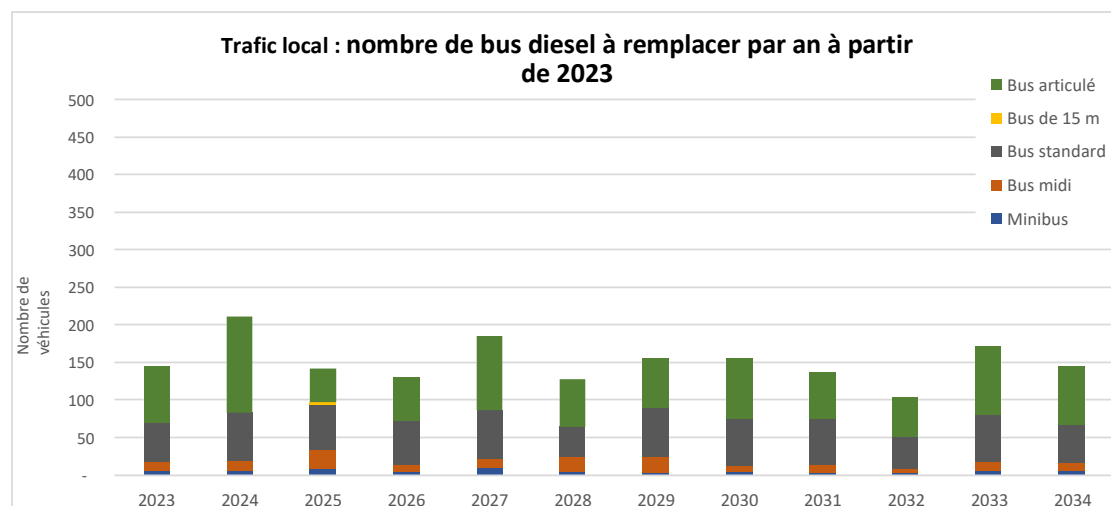
Toutefois, comme le montre l'analyse des conséquences relative aux cas étudiés, les différentes options de bus à batterie sont encore comparativement chères à court terme. Sur le court terme, ces options sont par conséquent jugées inadéquates pour certains champs d'application. En effet, les véhicules et les batteries sont en général plus onéreux. En outre, les bus à batterie impliqueraient la mise en service de véhicules supplémentaires pour des raisons opérationnelles liées à leur faible autonomie ou entraîneraient des coûts supplémentaires pour le personnel roulant en raison des temps de rebroussement insuffisants pour la recharge à la fin des lignes.

Figure 37 : potentiel maximal en matière de remplacement des bus diesel par des bus à batterie dans le TRV



Graphique INFRAS. Source : enquête auprès des ET 2020, hypothèses INFRAS

Figure 38 : potentiel maximal en matière de remplacement des bus diesel par des bus à batterie dans le trafic local



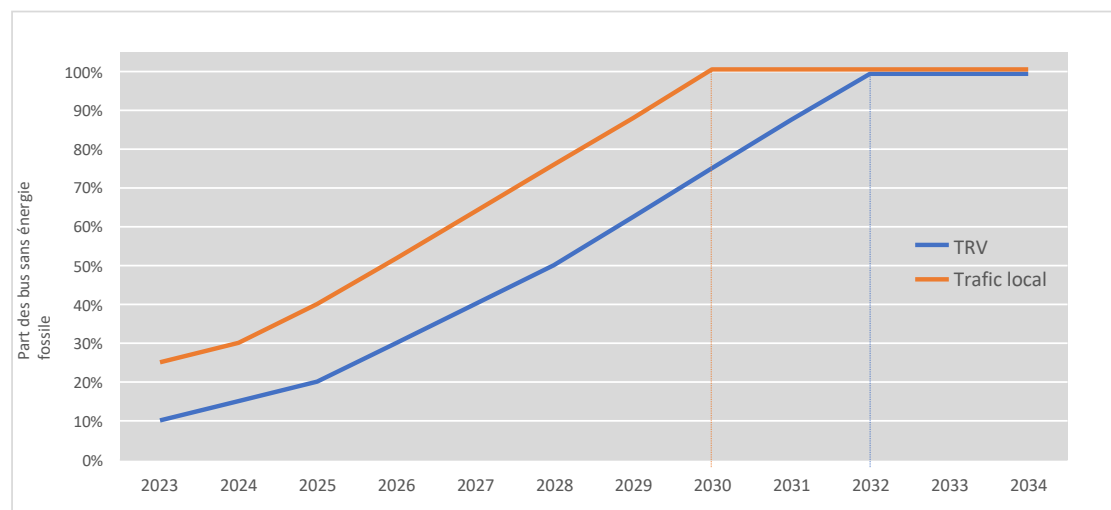
Graphique INFRAS. Source : enquête auprès des ET 2020, hypothèses INFRAS

Potentiel réaliste pour les bus à batterie sans fossile

Étant donné que les bus à batterie sont encore coûteux à court terme en raison des conditions cadres actuelles (par exemple, les coûts élevés d'acquisition des véhicules, le développement de l'infrastructure de recharge, les inefficacités opérationnelles résultant d'un stockage d'énergie encore insuffisant), tous les bus diesel ne devraient pas être remplacés par des bus à batterie au cours des prochaines années pour des raisons de coût-bénéfice. Par conséquent, un scénario « réaliste » a été défini pour le remplacement des bus diesel en accord avec les stratégies actuelles des entreprises de transport en matière de bus électrique. Ce scénario a été conçu différemment pour le trafic local et le trafic régional de voyageurs : on a considéré que le passage à des bus électriques sera plus rapide dans le trafic local et d'agglomération, car les lignes plus courtes, une topographie moins complexe et l'infrastructure de caténaires partiellement disponible offrent des conditions plus favorables. En outre, le graphique suivant montre quelles hypothèses sont faites dans ce scénario dit « réaliste » en ce qui concerne les parts qui seront remplacées par des bus à batterie dans les prochains achats de remplacement de bus.

Le scénario prévoit des parts allant de 25 à 50 pour cent déjà à court terme dans le trafic local et de 10 à 30 pour cent dans le trafic régional de voyageurs. Dans ce scénario, les grandes entreprises de transport, qui ont déjà réalisé des essais pilotes avec des bus à batterie et ont formulé des stratégies en matière de bus électriques, mais aussi les petites entreprises de transport innovantes, suivront le mouvement. Pour le trafic local, tous les remplacements seront effectués avec des bus à batterie à partir de 2030 environ et, pour le trafic régional, deux ans plus tard en 2032.

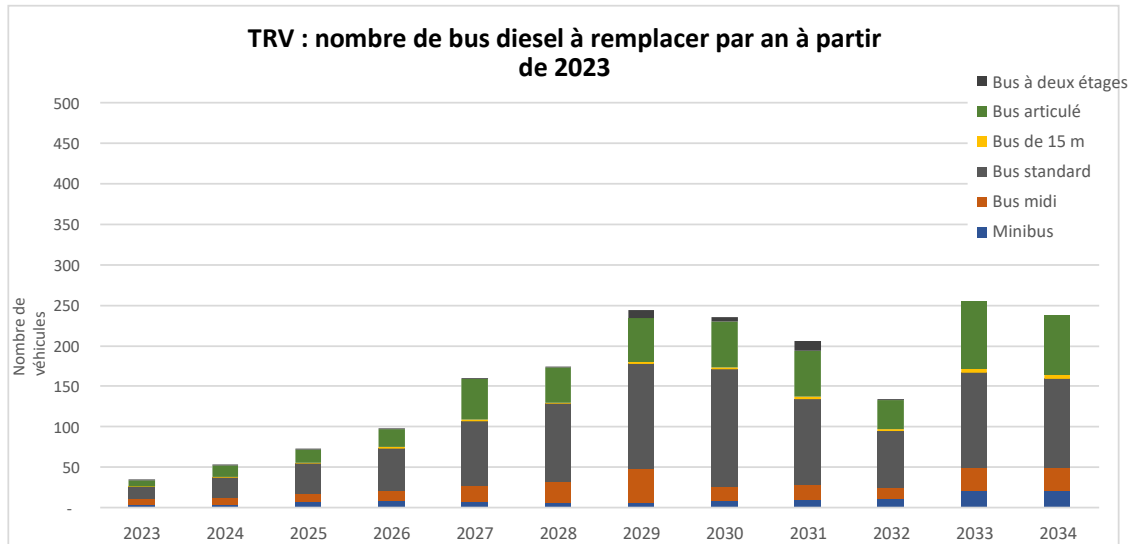
Figure 39 : Part des bus utilisant une énergie non fossile par rapport au total des bus diesel à remplacer par année, dans le scénario « réaliste »



Graphique INFRAS. Source : propres suppositions

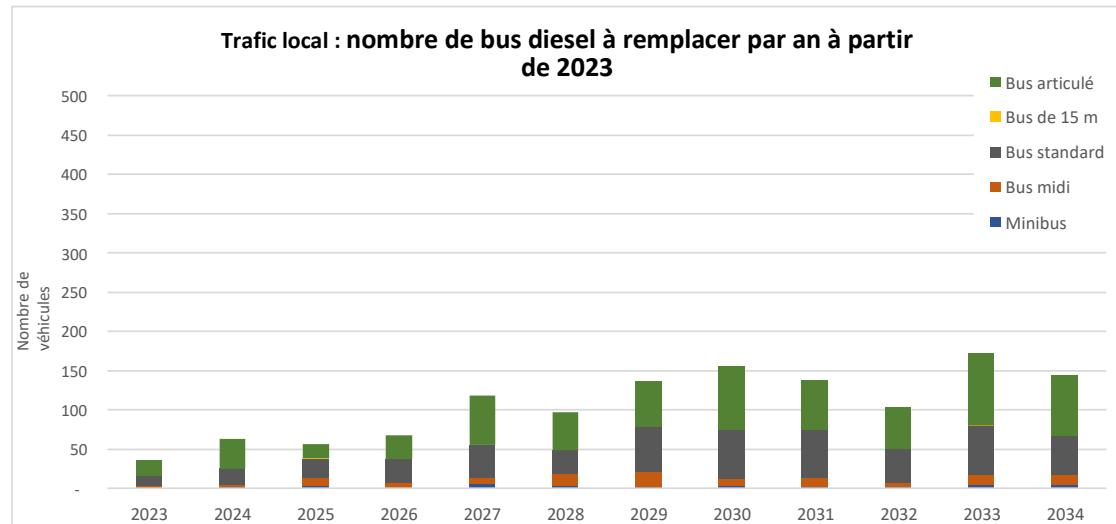
Les graphiques suivants montrent l'ordre de grandeur du nombre de bus diesel à remplacer annuellement par des bus à batterie selon ces hypothèses. Entre 2023 et 2034, il s'agirait de 1'900 véhicules, soit environ 50 pour cent dans le TRV, et d'un peu moins de 1'300 véhicules, soit environ 70 pour cent dans le trafic local (cf. figure 40 et figure 41).

Figure 40 : potentiel réaliste en matière de remplacement des bus à batterie dans le trafic régional de voyageurs (TRV)



Graphique INFRAS. Source : enquête auprès des ET 2020, hypothèses INFRAS

Figure 41 : potentiel réaliste pour les bus à batterie dans le trafic local



Graphique INFRAS. Source : enquête auprès des ET 2020, hypothèses INFRAS

Surcoûts des bus à batterie sans fossile par rapport aux bus diesel

L'estimation des surcoûts annuels pour les deux scénarios « potentiel maximal » et « potentiel réaliste » est basée sur l'approche suivante :

- La base correspond au potentiel des bus à remplacer par an (voir ci-dessus).
- Les surcoûts (relatifs) par option et par horizon temporel découlent de l'analyse d'impact des études de cas (cf. chapitre 4.3).
- Pour les différentes options de bus à batterie (trolleybus à batterie, bus alimenté par biberonnage statique et bus chargé au dépôt), des hypothèses sont formulées quant au nombre de bus remplacés selon l'option (cf. annexe A8).
 - Dans le scénario « potentiel maximal », on a pris en compte le fait que, à court ou à moyen terme, une partie des véhicules ne sera pas encore utilisée dans des conditions idéales (le trolleybus à batterie nécessite une quantité importante de nouvelles caténaires, le système de biberonnage statique requiert des rotations supplémentaires de véhicules et la recharge au dépôt exige des bus supplémentaires) parce qu'il n'existe pas suffisamment de possibilités de déploiement idéal pour les différentes options.
 - Le scénario « potentiel réaliste » suppose quant à lui des conditions d'utilisation idéales, qui ont un impact positif sur les coûts.
- À partir de là, il est possible de calculer approximativement les surcoûts moyens par véhicule et par horizon temporel pour les trois options de bus à batterie.
- En ce qui concerne les coûts, les coûts complets annuels actuels selon les procédures habituelles de financement et de commande constituent la base.
- L'extrapolation pour la Suisse est faite au prorata des véhicules à remplacer par an selon les deux scénarios, différenciés selon le trafic régional et local.

La figure 42 suivante montre les surcoûts annuels pour les trafics régionaux et locaux pour les deux scénarios « maximal » et « réaliste » dans les conditions cadres actuelles avec remboursement de l'impôt sur les huiles minérales. Ce calcul de base suppose une durée de vie du véhicule de 12 ans pour les bus à batterie et à pile à combustible (comme pour les bus diesel, biodiesel et biogaz) et une durée de vie de la batterie de 6 ans.

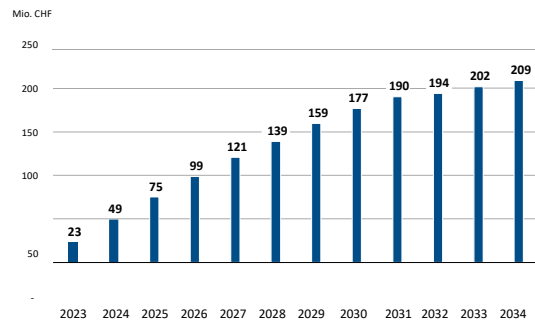
Dans le trafic régional, environ 50 pour cent de la flotte serait sans carburant fossile en 2034 dans le scénario « réaliste », et environ 70 pour cent dans le trafic local au même horizon.

Figure 42 : surcoûts annuels pour la conversion des bus diesel en bus à batterie – calcul de base (estimation approximative avec remboursement de l'impôt sur les huiles minérales)

Calcul de base avec une durée de vie de 12 ans pour les véhicules (toutes les options d'entraînement) et de 6 ans pour les batteries

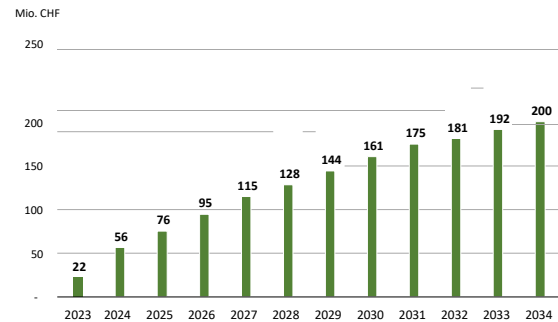
Trafic régional (TRV)

Scénario « maximal »

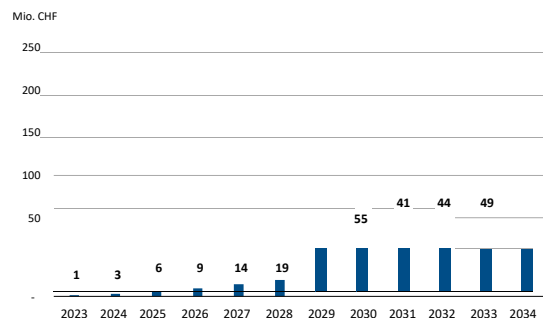


Trafic local

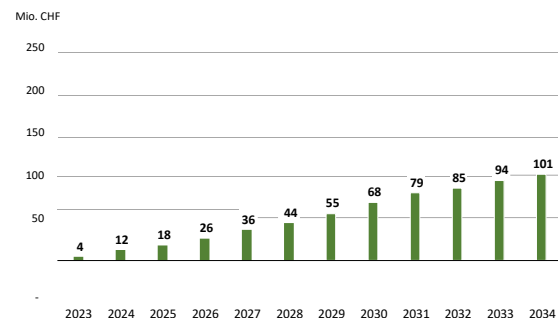
Scénario « maximal »



Scénario « réaliste »



Scénario « réaliste »



Graphique INFRAS. Les estimations se réfèrent aux conditions cadres actuelles avec le remboursement de l'impôt sur les huiles minérales.

Les figures suivantes montrent les effets des sensibilités concernant la durée de vie des véhicules et des batteries sur les coûts supplémentaires des bus électriques par rapport aux bus diesel. Les surcoûts du calcul de base et du calcul de sensibilité, chacun avec remboursement de l'impôt sur les huiles minérales, sont indiqués.

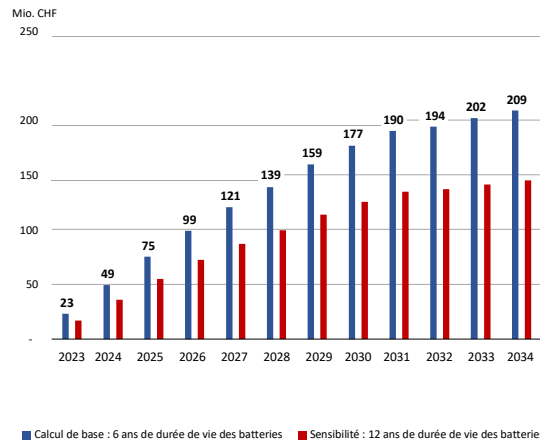
La figure 43 présente la sensibilité « durée de vie des bus électriques de 12 ans / durée de vie des batteries de 12 ans ». Dans le TRV comme dans le trafic local, les surcoûts par rapport aux bus diesel sont réduits, notamment pour les bus rechargés au dépôt avec de grandes batteries coûteuses. Dans le scénario « maximal », les surcoûts sont réduits d'environ 30 pour cent par rapport au calcul de base (avec une durée de vie des batteries de 6 ans), tandis que dans le scénario « réaliste », ils sont réduits jusqu'à 60 pour cent, car la part de bus rechargés au dépôt supposée est plus importante.

Figure 43 : surcoûts annuels pour la conversion des bus diesel en bus à batterie – sensibilité (estimation approximative avec remboursement de l’impôt sur les huiles minérales)

Sensibilité avec une durée de vie de 12 ans pour les véhicules (toutes les options d’entraînement) et de 12 ans pour les batteries

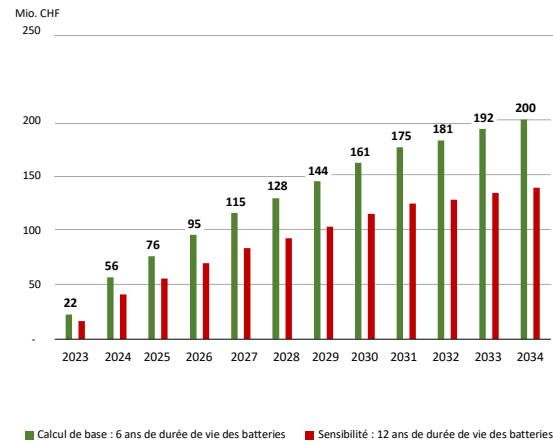
Trafic régional (TRV)

Scénario « maximal »

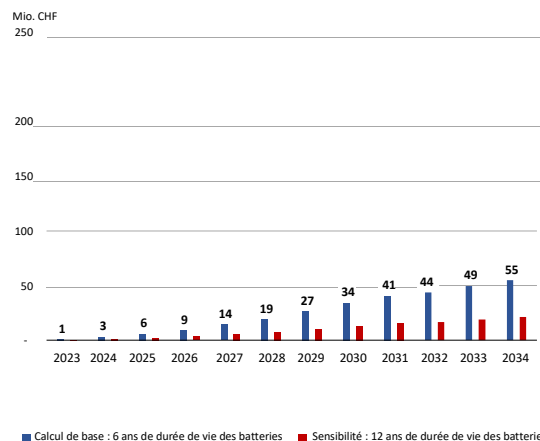


Trafic local

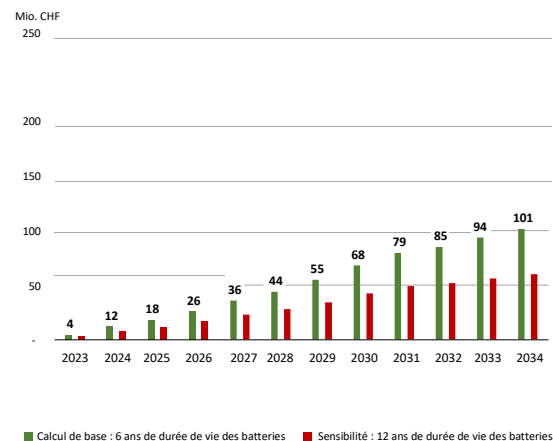
Scénario « maximal »



Scénario « réaliste »



Scénario « réaliste »



Graphique INFRAS.

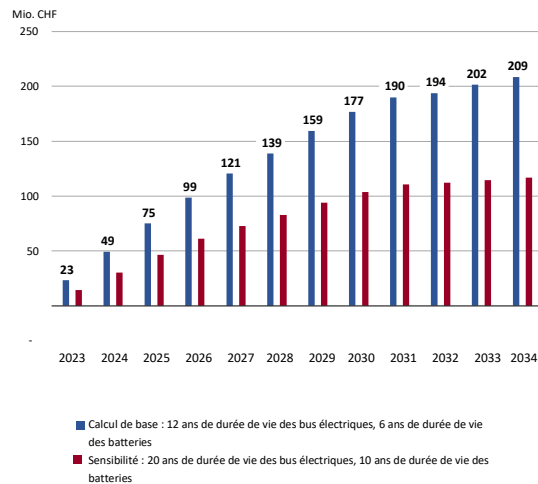
La figure 44 présente la sensibilité « durée de vie des bus électriques de 20 ans / durée de vie des batteries de 10 ans ». La tendance ici est de réduire les surcoûts par rapport aux bus diesel encore plus qu’avec la sensibilité « durée de vie des bus électriques de 12 ans / durée de vie des batteries de 12 ans ». Avec cette sensibilité, il faut toutefois noter que l’on ne suppose pas de coûts d’entretien plus élevés avec l’augmentation de l’âge des véhicules ni de mesures de réaménagement à l’intérieur des véhicules pour maintenir le confort des passagers. Toutefois, ces deux aspects deviennent pertinents avec une durée de vie de 20 ans. L’impact de cette sensibilité est surestimé en conséquence (c’est-à-dire que les coûts seraient plus élevés en réalité).

Figure 44 : surcoûts annuels pour la conversion des bus diesel en bus à batterie – sensibilité (estimation approximative avec remboursement de l’impôt sur les huiles minérales)

Sensibilité avec une durée de vie de 20 ans pour les bus électriques et de 10 ans pour les batteries

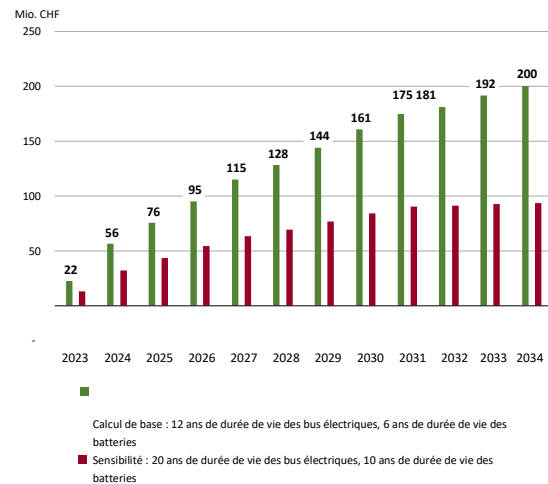
Trafic régional (TRV)

Scénario « maximal »

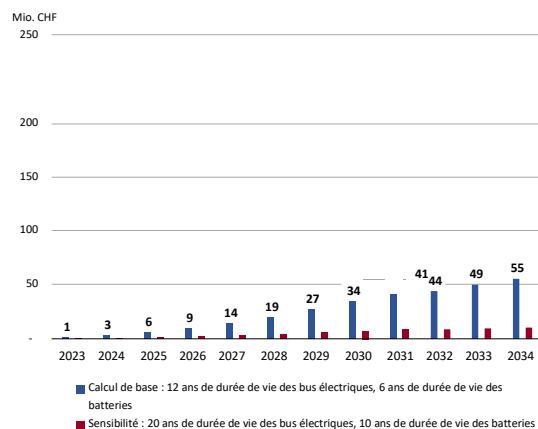


Trafic local

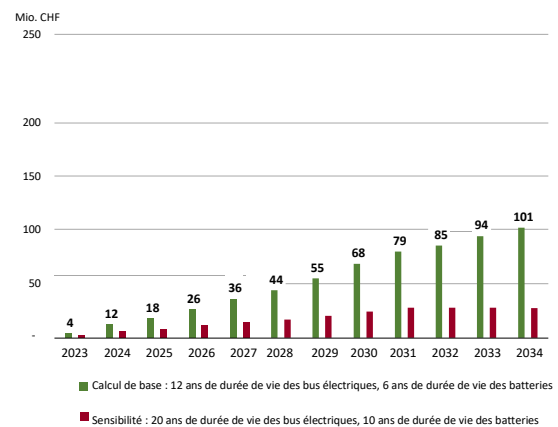
Scénario « maximal »



Scénario « réaliste »



Scénario « réaliste »



Graphique INFRAS.

Potentiel de réduction des émissions de CO₂ avec les bus à batterie

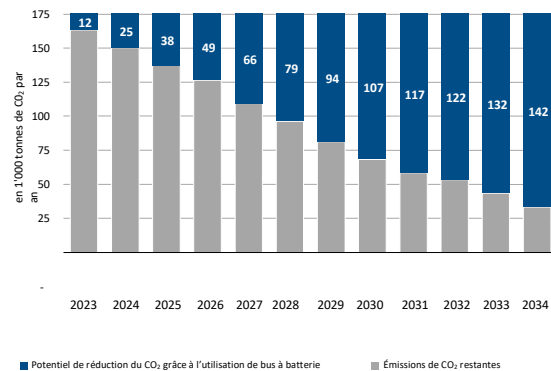
La figure 45 montre le potentiel de réduction du CO₂ dans les trafics régionaux et locaux pour les deux scénarios. Dans le scénario « maximal », cela équivaut à un potentiel de réduction de 80-85 pour cent en 2034, lorsque tous les bus diesel auront été convertis en bus à batterie. Dans le scénario « réaliste », le potentiel de réduction dans le trafic régional en 2034, lorsque près de la moitié des bus diesel auront été convertis en bus sans fossile, est de 40-45 pour cent. Dans le trafic local, environ 70 pour cent des bus diesel auront été convertis en bus à batterie d'ici 2034. Le potentiel de réduction du CO₂ correspondant est de l'ordre de 60 pour cent.

Figure 45 : potentiel de réduction du CO₂ de la conversion des bus diesel en bus à batterie

Trafic régional (TRV)

Émissions de CO₂ de tous les bus diesel en 2019 :

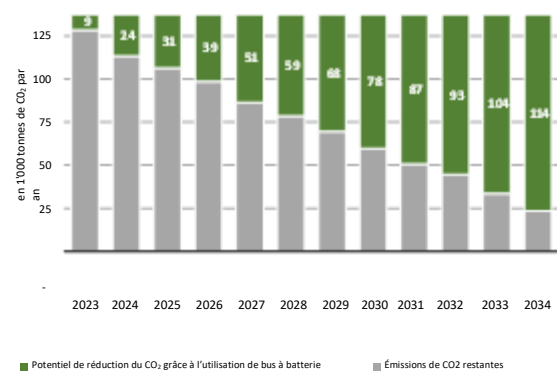
175'000 t/a Scénario « maximal »



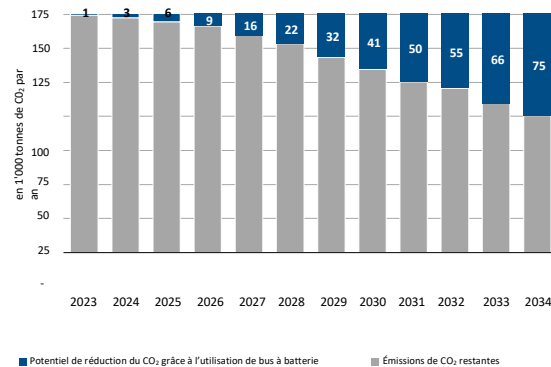
Trafic local

Émissions de CO₂ de tous les bus diesel en 2019 : 135'000

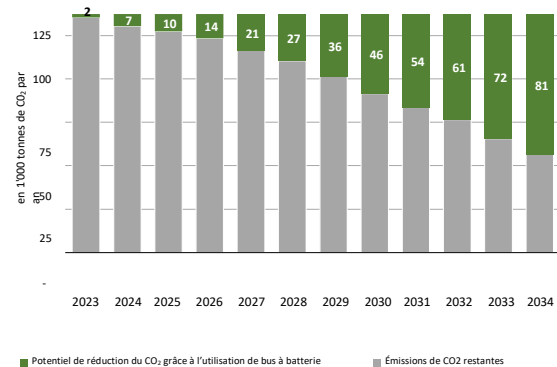
t/a Scénario « maximal »



Scénario « réaliste »



Scénario « réaliste »



Graphique INFRAS.

6.2. Besoins de financement et instruments de financement

Dans ce qui suit, les surcoûts annuels indiqués au chapitre 6.1 sont comparés aux instruments de financement nationaux existants sur la base des procédures ordinaires de financement et de commande du TRV et du TL. En fonction du scénario et des hypothèses retenues, on peut en déduire les besoins de financement pour le trafic régional de voyageurs et le trafic local.

Hypothèses et déduction

Les hypothèses suivantes sont faites pour les estimations :

- Les estimations sont basées sur les surcoûts annuels décrits au chapitre 6.1 (figure 42) dans le TRV et le TL pour les scénarios sélectionnés. Pour décrire la dérivation, les estimations sont présentées en tenant compte du remboursement existant de l'impôt sur les huiles minérales pour les ETC¹⁵⁰.
- On suppose qu'aucun fonds supplémentaire n'est actuellement prévu dans le cadre du financement ordinaire aux niveaux fédéral, cantonal et communal pour financer les surcoûts. Le crédit d'engagement de la Confédération pour le TRV pour les années 2022-2025 prévoit environ 10 millions de francs par an pour d'éventuels surcoûts ou besoins complémentaires. Cependant, l'utilisation de ces fonds n'est pas définie. En raison de la situation actuelle (perte de revenus due à la pandémie de coronavirus) et des développements incertains, nous supposons donc qu'aucun fonds supplémentaire n'est actuellement disponible pour la pénétration du marché des bus sans fossiles. En outre, il convient de noter que les estimations ne tiennent pas compte d'une éventuelle expansion de l'offre (cf. chap 6.1).
- Afin d'estimer les besoins financiers supplémentaires pour la Suisse, les ressources financières potentielles des instruments de financement et d'aide existants au niveau national sont estimées et déduites des surcoûts annuels indiqués afin de montrer les besoins de financement restants par an. Les instruments de financement et d'encouragement existants au niveau national comprennent d'une part les ressources financières attendues du programme de financement/compensation de myclimate/KliK de l'instrument de la compensation de CO₂ pour les importateurs de carburant ainsi que les contributions financières fédérales annuelles approximativement estimées du Programme pour le trafic d'agglomération (PTA)¹⁵¹.

¹⁵⁰ La suppression du remboursement de l'impôt sur les huiles minérales a une influence significative sur les surcoûts des bus à entraînement alternatif par rapport à la référence (bus diesel), c'est-à-dire que par rapport aux bus diesel, les surcoûts des bus sans fossile sont nettement réduits. Du point de vue du financement, l'arrêt du remboursement entraîne une augmentation des besoins de financement si les surcoûts ne sont pas couverts par des recettes supplémentaires. Du point de vue des commanditaires, ce sont donc surtout les surcoûts par rapport à la situation actuelle (y compris le remboursement de l'impôt sur les huiles minérales) qui sont pertinents. Dans ce contexte, les estimations suivantes sont calculées en incluant le remboursement de l'impôt sur les huiles minérales applicable.

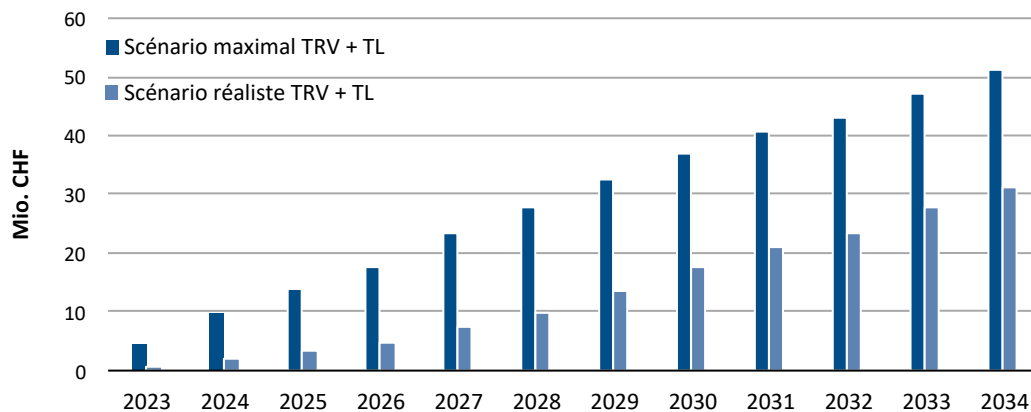
¹⁵¹ Les contributions fédérales PTA sont des contributions uniques d'investissement aux coûts d'investissement imputables d'une mesure. Pour les présentes estimations, il est supposé que les contributions fédérales du PTA seront financées sur la durée de vie des installations (calcul des annuités).

- Les estimations de potentiel sont disponibles pour la Suisse, mais pas pour les cantons et les communes. Les mesures d'encouragement cantonales et communales n'ont donc pas été prises en compte, mais devraient en principe l'être.
- Par conséquent, il reste un besoin de financement pour le TRV et le TL. Les besoins de financement supplémentaires qui en résultent ne tiennent compte que des mesures de financement nationales. Le besoin supplémentaire ainsi identifié doit donc être considéré comme une limite supérieure maximale, qui peut également être sensiblement inférieure dans des cas individuels si des possibilités d'encouragement cantonales et/ou communales existent. Cela doit être pris en compte lors de la discussion sur la manière de couvrir ces besoins de financement.

L'estimation du potentiel financier de l'instrument de la compensation de CO₂ pour les importateurs de carburants ou du **programme de promotion/compensation « Bus hybrides et électriques »** se base sur le potentiel de réduction du CO₂ estimé et cumulé par année pour les deux scénarios (cf. chapitre 6.1) et sur la subvention prévue de 200 francs par tCO₂ pour les bus électriques à partir de 2021¹⁵². Les éventuels paiements anticipés ne sont pas pris en compte dans les présents calculs, car les surcoûts sont indiqués sur la base des coûts complets d'aujourd'hui du point de vue des commanditaires. Si l'on part du principe que toutes les acquisitions de bus à entraînement électrique sont soutenues par le programme sans aucune restriction (financière), il en résulte théoriquement un potentiel financier maximal pour l'ensemble de la période 2023-2034 d'environ 160 millions de francs dans le scénario « réaliste » à près de 350 millions de francs dans le scénario « maximal » (figure 37). Cela correspondrait à un taux de subvention de 9 à 20 pour cent, c'est-à-dire à une part de la contribution financière aux surcoûts par rapport à un bus diesel (y compris le remboursement de l'impôt sur les huiles minérales, y compris l'infrastructure de charge).

¹⁵² Dans cette étude, on suppose la conversion en bus à batterie.

Figure 46 : potentiel financier maximal théorique du programme myclimate/KliK de l'instrument de la compensation de CO₂ pour les importateurs de carburant dans le TRV + TL en cas de contribution de 200 francs par tonne de CO₂ p.a. pour les bus électriques



TL : trafic local, TRV : trafic régional de voyageurs

Graphique INFRAS. Source : propres estimations.

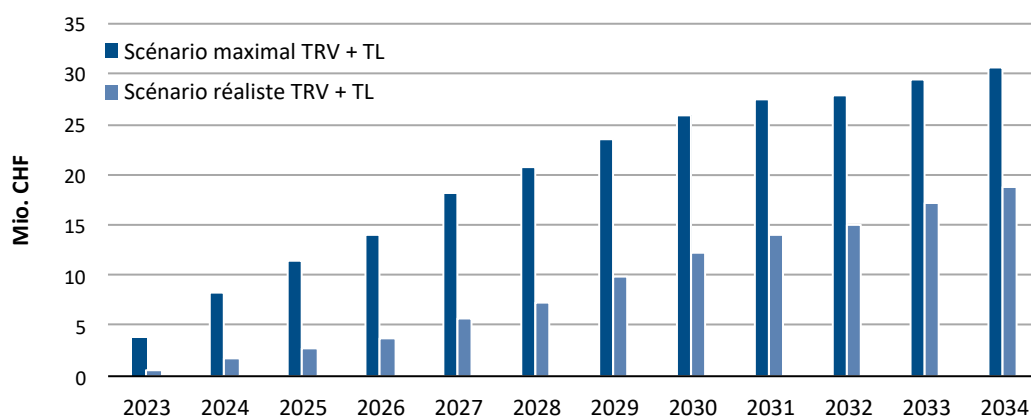
Dans le contexte des exigences légales déjà existantes, comme dans la ville de Bâle (additionnalité non donnée), ou de la non-utilisation du programme par certaines ET dans le contexte de la comptabilisation souhaitée des réductions de CO₂ par les ET (pas de double comptage) comme dans la ville de Zurich pour la comptabilisation des réductions de CO₂ dans le cadre de la Société à 2000 watts (cf. chap. 5.2.3), on peut supposer que seule une partie des surcoûts peut effectivement être prise en charge financièrement par le programme et que le potentiel financier maximal n'est pas épuisé. Avec la pénétration croissante sur le marché des bus sans fossile, le programme de compensation perd progressivement de son importance, car la conversion des bus diesel en bus sans fossile est également financée dans le cadre du financement ordinaire et, dans certains cas, en plus par des programmes de soutien cantonaux ou communaux. L'extrapolation du potentiel financier réel (réaliste) pour l'ensemble de la Suisse est soumise à une grande incertitude. Le programme de compensation est en principe à durée indéterminée, mais il est actuellement accrédité jusqu'en juin 2026.

Pour les présentes estimations, un calcul approximatif a été fait pour les deux scénarios en supposant que la part des surcoûts pour lesquels une contribution financière est versée par le programme de compensation de l'instrument de la compensation de CO₂ par les importateurs de carburants diminuera progressivement. Dans un calcul simplifié, nous supposons que, dans les deux scénarios, la part des réductions de CO₂ soutenue par le programme de compensation selon le potentiel de réduction estimé (chap. 6.1) passe de 95 pour cent en 2020 à 60 pour cent en 2034 (-2,5 points de pourcentage par an).

Sur la base de ces hypothèses, la figure 47 présente une estimation des contributions financières réalistes du programme de l'instrument de la compensation de CO₂ pour les importateurs de carburant. Pour l'ensemble de la période 2023-2034, cela se traduirait par un total d'environ 109 millions de francs dans le scénario « réaliste » à 241 millions de francs suisses dans le scénario « maximal ». Par souci de simplicité, les éventuelles restrictions financières ne sont pas prises en compte ici. Par exemple, selon myclimate/KliK, un maximum de 100 véhicules peut être préfinancé au cours de la période 2020-2023. Il n'est actuellement pas possible d'évaluer comment le montant du préfinancement évoluera à l'avenir.

Selon les hypothèses décrites, la part des surcoûts annuels supportés financièrement par le programme de compensation « bus électriques et hybrides » s'élèverait en moyenne à environ 8 pour cent dans le scénario « réaliste ». L'estimation suivante du besoin de financement se fonde sur le potentiel financier réaliste présenté à la figure 47, sur la base de la subvention de 200 CHF/tCO₂ pour les bus électriques qui s'appliquera à partir de 2021¹⁵³.

Figure 47 : potentiel financier réaliste estimé du programme myclimate/KliK de l'instrument de la compensation de CO₂ pour les importateurs de carburant dans le TRV + TL en cas de contribution de 200 francs par tonne de CO₂ p.a. pour les bus électriques



TL : trafic local, TRV : trafic régional de voyageurs

Graphique INFRAS. Source : propres estimations.

En outre, les surcoûts des infrastructures de recharge peuvent être cofinancés par la Confédération dans le cadre du **programme en faveur du trafic d'agglomération**. Les contributions fédérales PTA sont des contributions uniques d'investissement aux coûts d'investissement imputables d'une mesure. Pour les présentes estimations, il est supposé à des fins de simplification que les contributions fédérales du PTA seront financées sur la durée de vie des installations.

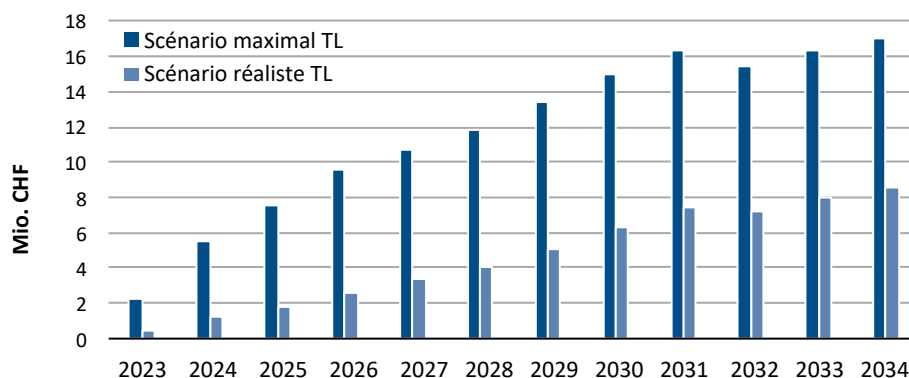
¹⁵³ Dans le cadre de l'instrument de l'obligation de compensation de CO₂ pour les importateurs de carburant, d'autres programmes pourraient être lancés. Dans le cadre de l'étude de base, nous n'avons pris en compte que le programme existant « bus électriques et hybrides ».

La procédure suivante a été utilisée pour estimer le potentiel de financement du PTA :

- Les surcoûts annuels pour les infrastructures de charge et les caténaires (mesures infrastructurelles) ont été estimés grossièrement pour les deux scénarios « réaliste » et « maximal ». Comme déjà expliqué, les surcoûts annuels ont été indiqués selon la procédure de commande.
- Nous supposons que la Confédération participe aux surcoûts à hauteur de 40 pour cent, soit une part légèrement supérieure à la moyenne de 35 pour cent. Cette part plus élevée a été choisie afin de tenir compte également d'éventuelles contributions financières fédérales aux surcoûts des véhicules. Dans le cadre du PTA, les surcoûts des véhicules dus à l'économie des coûts d'infrastructure sont également cofinancés par la Confédération. Les estimations à ce sujet sont difficiles. En outre, la question se pose de savoir comment les distinguer des surcoûts liés aux infrastructures de recharge.
- Enfin, nous partons du principe que la Confédération ne cofinancera que les mesures du trafic local dans le cadre du PTA car elle intervient déjà au niveau du TRV en tant que commanditaire et agent financeur.

Sur la base de ces hypothèses et estimations, les contributions fédérales annuelles approximatives du PTA pour le TL sont présentées dans la figure 48.

Figure 48 : estimation du potentiel financier des contributions fédérales provenant du PTA dans le TL p.a., avec le remboursement de l'impôt sur les huiles minérales aux ETC

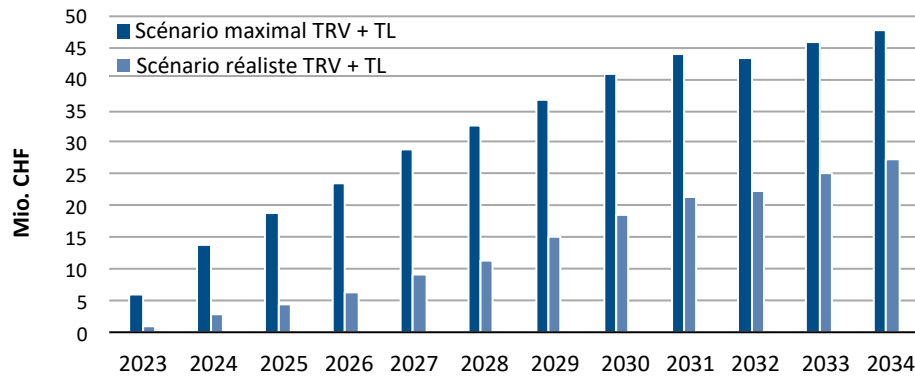


TL : trafic local, PTA : Programme en faveur du trafic d'agglomération

Graphique INFRAS. Source : propres estimations.

Au total, les contributions annuelles de financement au niveau national estimées dans la figure 49 aboutissent à une contribution cumulée d'environ 165 millions de francs pour la période 2023-2034 dans le scénario « réaliste » et environ 380 millions de francs dans le scénario « maximal ».

Figure 49 : estimation du potentiel financier du programme myclimate/KliK de l'instrument de la compensation de CO₂ pour les importateurs de carburant et du PTA dans le TRV et le TL p.a., avec le remboursement de l'impôt sur les huiles minérales aux ETC

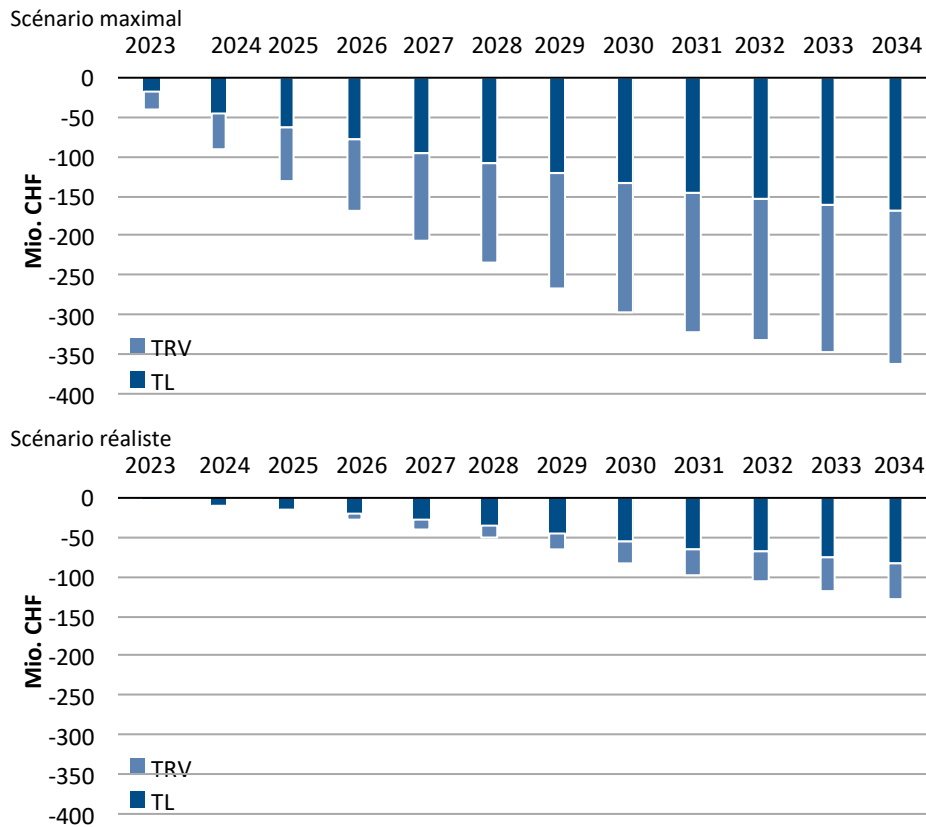


TL : trafic local, PTA : Programme en faveur du trafic d'agglomération, TRV : trafic régional de voyageurs

Graphique INFRAS. Source : propres estimations.

En tenant compte de ces instruments de financement et d'encouragement existants, le besoin de financement qui en résulte est indiqué sur la base des surcoûts estimés dans le TRV et le TL (Figure 50).

Figure 50 : besoins de financement tenant compte des mesures d'encouragement nationales dans le TRV et le TL, avec le remboursement de l'impôt sur les huiles minérales



TL : trafic local, TRV : trafic régional de voyageurs

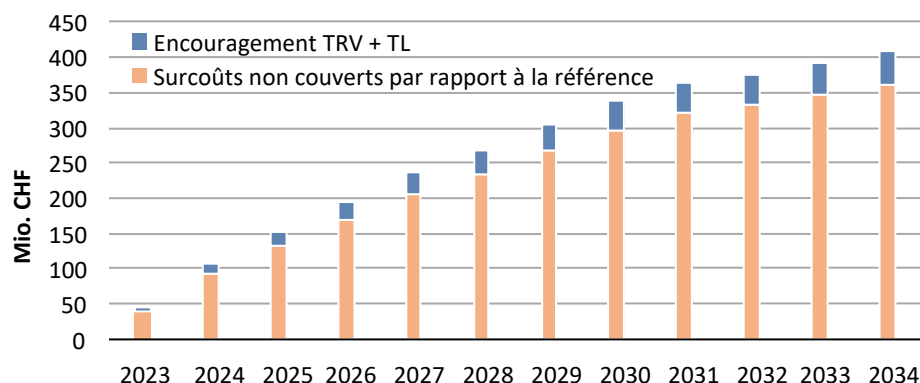
Graphique INFRAS. Source : propres estimations.

La part des surcoûts annuels couverte par des contributions nationales existantes dans le TRV et le TL oscille entre 17 et 19 pour cent (scénario « réaliste ») et 12 et 13 pour cent (scénario « maximal »), en tenant compte du remboursement de l'impôt sur les huiles minérales pour les ETC. Les surcoûts non couverts doivent être considérés comme une limite supérieure maximale, qui peut être sensiblement inférieure dans des cas individuels si des possibilités de financement cantonales et/ou municipales existent.

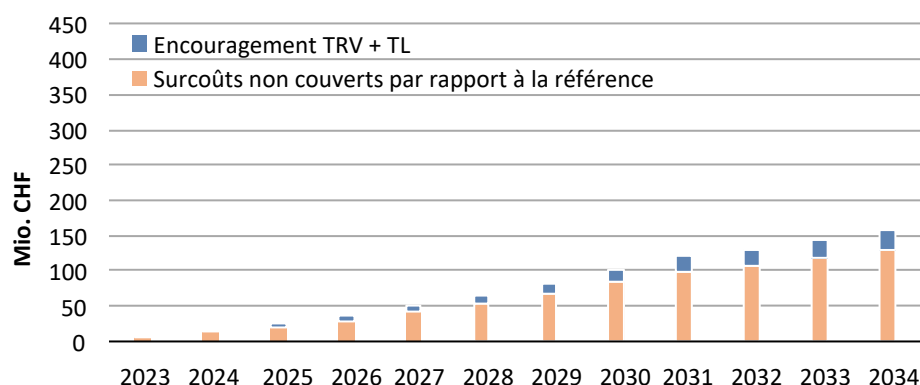
La figure 51 montre les contributions du financement national existant et les besoins de financement non couverts pour les deux scénarios.

Figure 51 : évolution des surcoûts couverts et non couverts par les contributions d'encouragement (obligation de compensation de CO₂ par les importateurs de carburant / myclimate/Klik + PTA) pour le TRV + TL (avec remboursement de l'impôt sur les huiles minérales pour les ETC)

Scénario « maximal »



Scénario « réaliste »



ETC : entreprises de transport concessionnaires, TL : trafic local, PTA : Programme en faveur du trafic d'agglomération, TRV : trafic régional de voyageurs

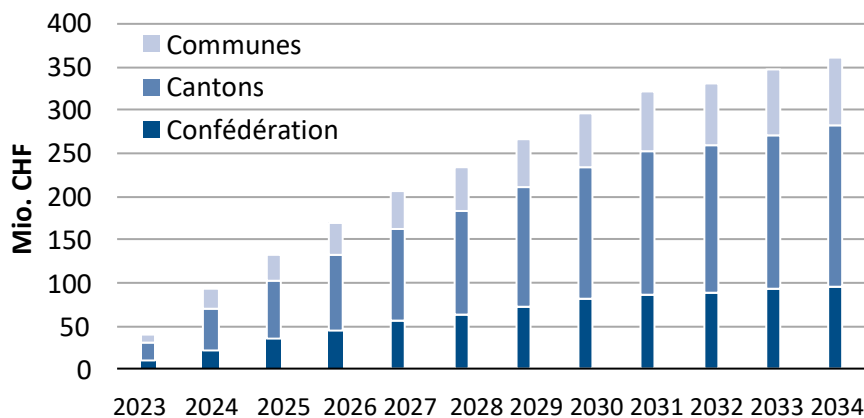
Graphique INFRAS. Source : propres estimations.

Si l'on maintient la répartition actuelle de la responsabilité du financement dans le cadre du financement régulier des transports publics et que l'on prend également comme base les parts de financement existantes de la Confédération, des cantons et des communes (tableau 12), on obtient le besoin de financement annuel dans le TRV et le TL du point de vue des commanditaires estimé dans la figure 52. Le besoin supplémentaire annuel passerait d'environ 5 millions de francs ou 40 millions de francs en 2023 à environ 130 millions de francs ou 360 millions de francs en 2034 dans les scénarios « réaliste » et « maximal », respectivement. Si, selon ces hypothèses, les surcoûts annuels étaient financés dans le cadre de la commande de TP, il en résulterait un besoin financier supplémentaire cumulé pour la période 2023-2034 de 125 millions de francs pour la Confédération, 395 millions de francs pour les cantons et près de 240 millions de francs pour les communes dans le scénario réaliste et avec le remboursement de l'impôt actuel sur les huiles minérales.

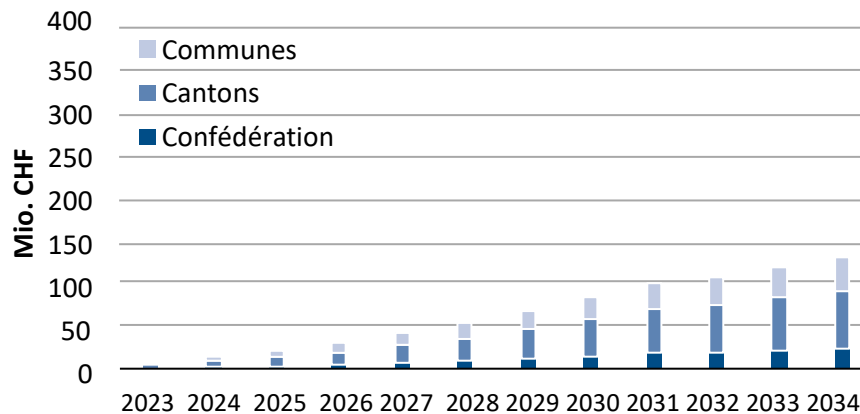
La suppression de l'impôt sur les huiles minérales minimiserait la différence de coût entre les bus diesel et les bus sans fossile, mais cela n'a aucune influence directe sur les besoins de financement non couverts du point de vue du financement ordinaire des TP. Les surcoûts des bus diesel dus à la suppression du remboursement de l'impôt sur les huiles minérales entraîneraient également une augmentation des besoins de financement non couverts. Les recettes plus élevées de l'impôt sur les huiles minérales (y compris la surtaxe) de la Confédération sont principalement affectées et n'entraîneraient pas automatiquement une augmentation du financement fédéral pour le TRV.

Figure 52 : répartition possible des besoins de financement selon le financement ordinaire des transports publics (TRV + TL), avec le remboursement de l'impôt sur les huiles minérales

Scénario « maximal »



Scénario « réaliste »



TL : trafic local, TRV : trafic régional de voyageurs

Graphique INFRAS. Source : propres estimations.

6.3. Conclusion

Compte tenu du potentiel de réduction, du cadre réglementaire et des possibilités de financement, les conclusions suivantes peuvent être résumées :

Potentiel des bus sans fossile et surcoûts

- Une conversion complète de la flotte de bus diesel en bus à batterie à court terme (scénario « maximal ») n'est ni opportun ni judicieuse d'un point de vue économique compte tenu de l'état de la technique, que ce soit pour le trafic local ou le trafic régional. Les bus à batterie sont encore relativement chers dans les conditions cadres actuelles (notamment avec le remboursement de l'impôt sur les huiles minérales). Et dans certains cas, les bus rechargés au dépôt déclenchent une demande de véhicules plus élevée avec des coûts subséquents en conséquence à cause des autonomies encore insuffisantes. Comme il faut s'attendre à ce que les ressources financières dont disposent la Confédération, les cantons et les communes pour les transports publics soient limitées, la principale question à court/moyen terme est d'optimiser les avantages environnementaux entre l'expansion de l'offre (dans le but de promouvoir davantage le passage du transport privé de personnes aux transports publics) et l'utilisation de bus électriques. L'investissement dans la conversion aux bus électriques ne doit pas entraîner la cannibalisation des services de transport public existants (ou l'aménagement des offres). Les fonds investis doivent donc être utilisés en complément du financement existant des transports publics.
- Avec le scénario « réaliste » décrit, environ 50 pour cent des bus diesel actuels, soit environ 1'900 véhicules, pourraient être remplacés par des bus à batterie dans le TRV entre 2023 et 2034. Pour le trafic local, environ 70 pour cent des bus, soit 1'300 véhicules, pourraient être convertis en bus électriques sans fossile au cours de la même période.
- Les surcoûts par rapport aux bus diesel dans le scénario « réaliste » vont jusqu'à 20 millions de francs par an dans le TRV à court terme et continuent à augmenter pour atteindre environ 50 à 60 millions de francs par an d'ici 2030, en supposant que le remboursement de l'impôt sur les huiles minérales pour les bus diesel soit maintenu.
- Dans le scénario « réaliste », les surcoûts pour le trafic local se situent entre 10 et 40 millions de francs par an à court terme et atteignent environ 100 millions de francs par an d'ici 2030, tant que le remboursement de l'impôt sur les huiles minérales reste en vigueur.

Besoins de financement et instruments de financement

- Le calcul des surcoûts des bus utilisant une énergie non fossile par rapport à ceux des bus diesel (référence) diffère fortement selon qu'il inclut ou qu'il n'inclut pas le remboursement de l'impôt sur les huiles minérales aux ETC. Le remboursement de l'impôt sur les huiles minérales pour les ETC représente une incitation financière inadéquate de taille sur le plan financier pour la conversion aux bus à énergies non fossiles.

La suppression du remboursement actuel de l'impôt sur les huiles minérales augmenterait dans un premier temps les besoins financiers du point de vue des exploitants et si les tarifs des commanditaires restent les mêmes. La suppression du remboursement de l'impôt sur les huiles minérales créerait toutefois des incitations pour une pénétration des véhicules utilisant une énergie non fossile, car elle réduirait considérablement la différence de surcoûts entre un bus à batterie et un bus diesel.

- Si l'on veut que la pénétration du marché des bus sans fossile suive le scénario réaliste, les ressources financières doivent être augmentées. Un soutien financier pour les bus sans énergie fossile avec un soutien financier indirect simultané pour les bus diesel en raison du remboursement de l'impôt sur les huiles minérales n'a pas de sens. Dans un premier temps, le remboursement de l'impôt sur les huiles minérales devrait être supprimé.
- Si, selon ces hypothèses, les surcoûts annuels étaient financés dans le cadre de la commande de TP, cela signifierait, dans le scénario réaliste et en tenant compte du remboursement actuel de l'impôt sur les huiles minérales pour la période 2023-2034, une charge financière supplémentaire cumulée d'environ 125 millions de francs pour la Confédération, de 395 millions de francs pour les cantons et d'environ 240 millions de francs pour les communes.
- Les instruments d'encouragement nationaux existants (obligation de compensation de CO₂ pour les importateurs de carburant et fonds du Programme en faveur du trafic d'agglomération PTA) peuvent couvrir une partie relativement faible du besoin de financement supplémentaire. Dans ce contexte, il faut tenir compte des interactions entre le programme d'encouragement et le financement régulier des transports publics par la Confédération, les cantons et les communes. Le programme de compensation de myclimate/KliK, par exemple, encourage le passage aux bus hybrides et électriques si cela n'est pas prescrit de toute façon (p. ex. exigences légales) et n'est pas encouragé par ailleurs. Les contributions fédérales du PTA ne sont versées que pour les mesures qui ne sont pas cofinancées par la Confédération (p. ex. trafic local).
- Si le besoin supplémentaire devait être financé par le biais du financement et de la commande ordinaires des transports publics, les cantons en particulier seraient confrontés à une charge financière supplémentaire, puisqu'ils cofinancent à la fois le TRV et le trafic local. En raison également de la situation actuelle (manque de recettes dû à la pandémie de coronavirus), la question se pose de savoir si les ressources financières supplémentaires peuvent être mises à disposition, notamment à partir de 2024, pour financer les surcoûts estimés. Les ETC pourraient augmenter les tarifs et donc les recettes pour financer les surcoûts. Les augmentations tarifaires peuvent entraîner un transfert modal indésirable. Cela n'est pas souhaitable en termes de politique climatique et de transport, mais ce n'était pas l'objet de cette étude ni du postulat.

- Des possibilités de financement fédéral supplémentaires peuvent accroître la pénétration du marché. Les subventions devraient être basées sur les coûts d'investissement supplémentaires ainsi que sur les coûts par tonne de CO2 en moins. En raison de la complexité du financement des transports publics, un concept de financement clair et transparent est nécessaire.

La question de savoir quels instruments de financement supplémentaires sont appropriés du point de vue de la Confédération est en définitive une décision politique et fait donc partie du rapport de postulat basé sur l'étude de base.

Annexe

A1 Contexte des batteries pour l'électromobilité

A1.1 Propriétés des batteries et hypothèses sur leur développement

Dans la présente étude, le terme « batterie » englobe toujours l'ensemble du système, qui se compose des cellules électrochimiques proprement dites, d'un système de gestion de la batterie, du refroidissement, de l'emballage et de la mise en contact. Dans la littérature et dans les spécifications des fabricants, les propriétés des cellules sont souvent assimilées à celles des batteries, ce qui peut prêter à confusion car, par exemple, des densités d'énergie beaucoup trop élevées et des prix beaucoup trop bas sont communiqués de cette manière.

Dans cette étude, nous nous intéressons exclusivement aux batteries lithium-ion car cette gamme représente la quasi-totalité du marché pour les véhicules électriques. Au sein de cette gamme de batteries, il existe différents types qui présentent des points forts et points faibles différents. Dans notre contexte, les types « optimisé en énergie » et « optimisé en puissance » sont importants.

L'optimisation de l'énergie signifie que l'on peut stocker le plus d'énergie possible par rapport au poids de la batterie. Une batterie optimisée en énergie atteint des valeurs élevées pour la capacité de stockage spécifique (kWh/kg) et est particulièrement adaptée aux bus rechargés au dépôt. Les représentants typiques de cette gamme sont les batteries NMC. Les batteries optimisées en puissance, quant à elles, ont généralement une capacité de stockage spécifique plus faible, mais peuvent absorber ou libérer plus d'énergie par rapport au temps. Les batteries en titanate ou LTO en sont des représentants typiques. Celles-ci peuvent être chargées plus rapidement que les batteries optimisées en énergie et sont bien adaptées aux bus alimentés par biberonnage et aux bus à pile à combustible. Les batteries optimisées en énergie sont nettement moins chères par rapport à la capacité de stockage que les types optimisés en puissance. Cependant, des progrès importants sont attendus pour les deux types dans les 20-30 prochaines années – tant en termes de capacité de stockage spécifique (kWh/kg) que de coûts spécifiques (CHF /kWh) (cf. figure 54 et figure 55). Les batteries LFP également présentées sont particulièrement bon marché et très stables, mais ont une densité d'énergie et de puissance relativement faible. Les constructeurs de bus chinois, en particulier, utilisent désormais ces batteries pour les bus rechargés au dépôt.

.

Durée de vie d'une batterie au lithium

Divers facteurs sont importants pour la durée de vie des batteries Li. D'une part, la durée de vie est limitée par la durée de conservation. Il s'agit du temps pendant lequel une batterie peut être stockée sans être utilisée et sans que sa capacité ne diminue de manière significative. Pour les batteries Li-ion modernes, telles que celles utilisées dans les bus, cette valeur se situe entre 8 et 12 ans.

Le deuxième facteur déterminant pour la durée de vie des batteries pour bus électriques est la stabilité du cycle. Lors de tests, une batterie au lithium pour véhicules a généralement encore une capacité de 80 pour cent de la valeur neuve après environ 6000 cycles complets. Un cycle complet signifie que 100 pour cent de l'énergie de la batterie est chargée et déchargée. Dans ces tests, cependant, la batterie n'est pas déchargée de 100 pour cent SOC (*state of charge*/niveau de charge) à 0 pour cent SOC, mais, par exemple, de 90 pour cent SOC à 70 pour cent SOC, avant d'être chargée à 80 pour cent SOC, déchargée à nouveau à 60 pour cent SOC, etc. Le SOC le plus bas est par exemple de 30 pour cent. Ensuite, on ajoute 20 pour cent, on décharge 10 pour cent, etc. jusqu'à atteindre à nouveau 90 pour cent. Avec ce régime, un grand cycle (de 90 pour cent SOC à 30 pour cent et retour à 90 pour cent) correspond à 1,4 cycle complet. Si la batterie était régulièrement déchargée de 100 pour cent SOC à 5 pour cent, puis rechargée, la résistance au cyclage serait nettement inférieure à la valeur d'essai. En revanche, si une batterie n'est utilisée qu'entre 75 pour cent et 25 pour cent SOC, sa durée de vie peut être nettement plus longue et atteindre plus de 10'000 cycles complets.

La capacité diminue relativement fortement dans la première moitié de la résistance au cyclage (par exemple, de 100 pour cent à environ 85-90 pour cent dans les 2'000 premiers cycles complets). Ensuite, la diminution devient plus stable avec des cycles supplémentaires. Avec de bonnes batteries, la capacité restante peut rester presque constante entre 4'000 et 6'000 cycles complets.

Un bus chargé au dépôt qui utilise 60 pour cent de la capacité de la batterie par jour et qui est chargé une fois par jour atteint environ 220 cycles complets par an. Il faudrait donc plus de 25 ans pour que la batterie atteigne la fin de sa durée de vie au fil des cycles. Même si un bus chargé au dépôt était chargé deux fois par jour, la résistance au cyclage serait toujours supérieure à la durée de conservation de la batterie. On peut donc supposer une durée de vie de 8 à 12 ans pour les batteries des bus rechargés au dépôt.

La situation est différente pour les bus alimentés par biberonnage et les trolleybus à batterie : les batteries, relativement petites, sont rechargées plusieurs fois par jour. Si nous supposons qu'un bus effectue 10 rotations par jour et utilise 50 pour cent de sa capacité maximale, nous arrivons à 5 cycles complets par jour ou 1'825 cycles complets par an. Ainsi, cette batterie subit presque 11'000 cycles complets en 6 ans, ce qui n'est réaliste qu'avec une décharge relativement faible par cycle (max. 50 pour cent).

Composition d'une batterie au lithium

Environ un quart du poids d'une batterie de véhicule est constitué d'aluminium et/ou d'acier, ainsi que de plastique pour le boîtier. Les cellules constituent environ 75 pour cent de la masse de la batterie. Ces dernières se composent à leur tour comme suit (tableau 26) :

Tableau 26 : composition d'une cellule lithium (NMC)

Matériau	Part en %	Masse dans la batterie du bus (kg)	Composante
Boîtier en acier	16.3%	458	Boîtier
Feuille de cuivre	8.8%	248	Anode
Graphite	20.9%	588	
Feuille d'aluminium	3.8%	107	
Poudre de cathode	36.1%	1015	Cathode
Nickel/cobalt/manganèse	21.6%	608	
Lithium	2.6%	73	
Oxygène	11.9%	335	Electrolyte
Électrolyte	12.8%	360	
Lithium	env. 2.6%	73	
Séparateur	1.4%	39	Séparateur

Une solution 1 molaire d'hexafluorophosphate de lithium (LiPF₆) dans du carbonate d'éthylène est souvent utilisée comme électrolyte. L'électrolyte est alors composé d'environ 20 pour cent de lithium. (Notter et al. 2010)

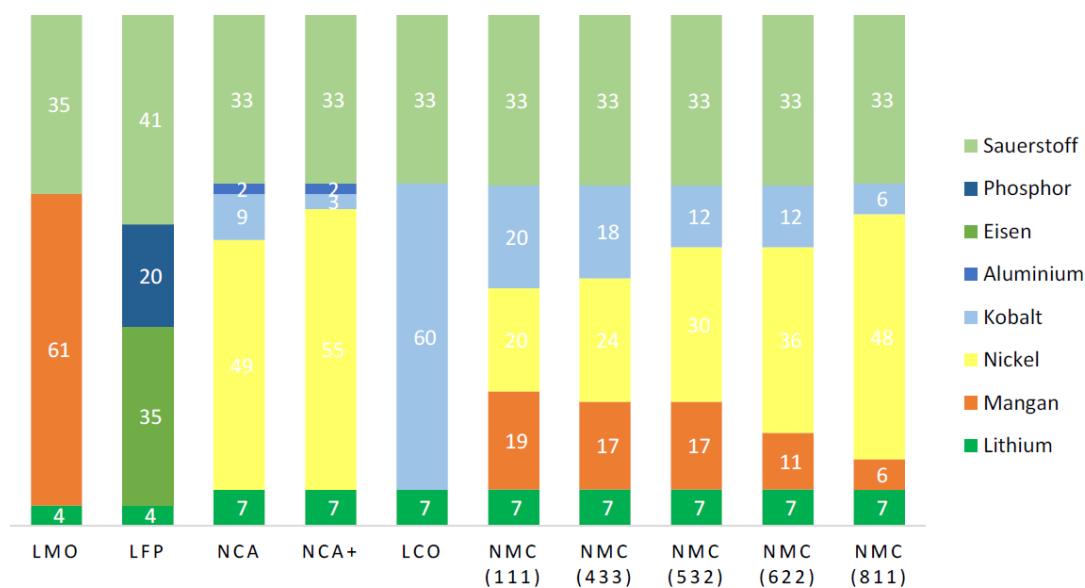
La masse de la batterie du bus se réfère à une batterie ayant un contenu énergétique de 450 kWh et une masse de 3'750 kg, sans compter le boîtier en aluminium ou en acier de la batterie. La masse de ce dernier serait d'environ 940 kg.

Tableau INFRAS. Source : Batrec 2020 / propre calcul

Les proportions de nickel (Ni), de cobalt (Co) et de manganèse (Mn) dans la poudre de cathode peuvent varier selon la batterie. Une batterie typique (NMC111) contient les trois éléments dans un rapport 1:1:1. Cependant, pour économiser le cobalt, on produit également des cathodes contenant beaucoup plus de nickel. Le rapport Co:Ni:Mg dans une NMC622 est de 1:3:1. La figure 53 montre la composition de différentes poudres de cathode.

Une batterie de 450 kWh, telle qu'elle est prévue pour les bus articulés de BVB, pèse environ 3'750 kg et contient environ une tonne de poudre de cathode. Les masses de tous les matériaux sont indiquées dans le tableau 27. Une voiture privée électrique dotée d'une batterie d'environ 400 kg (contenu énergétique de 50 kWh) nécessite un peu plus de 10 pour cent de la masse nécessaire pour la grande batterie d'un bus.

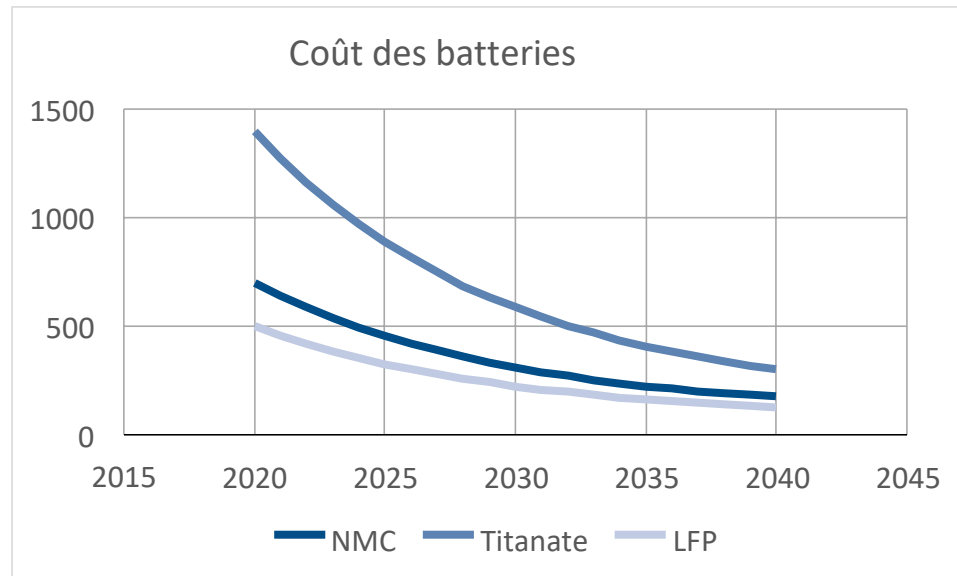
Figure 53 : composition de la poudre de cathode de différents types de cellules



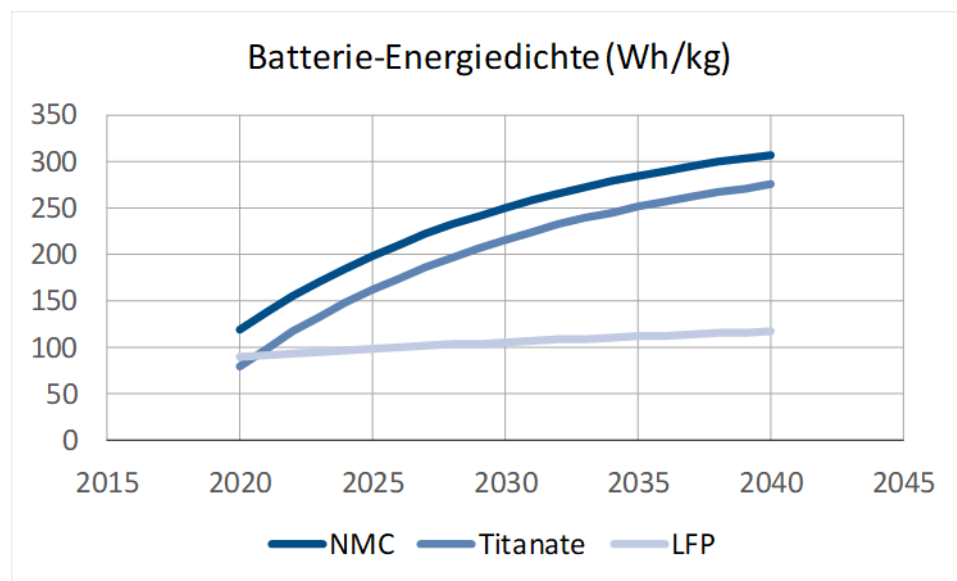
Les cathodes NMC sont surtout utilisées pour les bus électriques. Il existe également des bus équipés de batteries au phosphate de fer (LFP). Les batteries NCA ne sont pratiquement utilisées que par Tesla, tandis que Nissan utilise des batteries LMO sans cobalt pour la Leaf.

Graphique Batrec 2020

Pour la conduite proprement dite, l'énergie d'une batterie chargée ne peut pas être utilisée à 100 pour cent. Pour obtenir la plus grande autonomie possible, la batterie ne doit pas être complètement déchargée. Le vieillissement réduit également la capacité de charge. En outre, un bus électrique a également besoin d'énergie pour le chauffage/la ventilation/la climatisation (CVC) ainsi que pour d'autres unités auxiliaires telles que les ordinateurs et les moniteurs embarqués. À long terme, un maximum de 60 à 70 pour cent de la capacité de la batterie est disponible pour l'exploitation proprement dite, y compris le chauffage/la ventilation/la climatisation, en fonction de la réserve opérationnelle (cf. figure 56).

Figure 54 : évolution des coûts spécifiques des batteries pour les bus électriques

Graphique : INFRAS. Il convient de noter que les batteries des bus sont nettement plus chères que celles des voitures électriques. Voir les sources ci-dessous

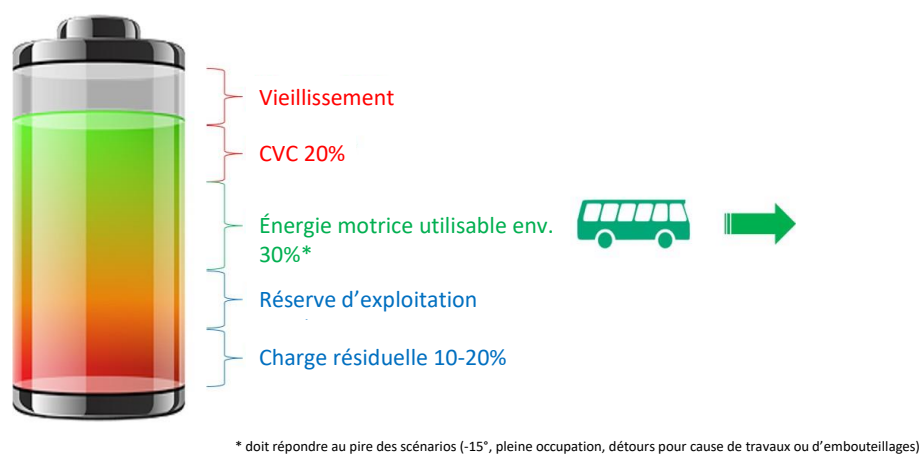
Figure 55 : évolution de la capacité spécifique des batteries pour les bus électriques

Graphique : INFRAS. Il convient de noter que les batteries des bus présentent des capacités spécifiques nettement plus faibles que celles des voitures électriques. Voir les sources ci-dessous

Les sources suivantes sont utilisées pour estimer l'évolution des coûts et des densités énergétiques :

- INFRAS 2018 : Marktübersicht Bus der Zukunft
- Bloomberg New Energy Finance 2017
- Fraunhofer 2017 : Energiespeicher Roadmap
- THELMA 2016 : Opportunities and challenges for electric mobility
- Cox B. 2018 : Mobility and the Energy transition. Diss. ETH NO 25081
- Cox et al. 2020
- Participation d'experts en matière de moteurs électriques et de systèmes de stockage

Figure 56 : énergie utilisable d'une batterie chargée



Source : VBZ

A1.2 Recyclage ou « seconde vie » des batteries en fin de vie

Une batterie, telle qu'utilisée dans un bus électrique, est constituée de plusieurs modules, eux-mêmes composés de plusieurs cellules. La batterie a atteint sa fin de vie lorsqu'elle ne possède plus que 80 pour cent de sa capacité initiale. Cela peut être le cas si certaines cellules sont défectueuses. Dans ce cas, ces cellules peuvent être remplacées et la batterie peut continuer à être utilisée dans le véhicule. Les cellules défectueuses devraient alors être recyclées.

Cependant, il est également possible que toutes les cellules de la batterie aient vieilli de la même manière et qu'à un moment donné, chaque cellule individuelle, et donc la batterie entière, n'atteigne que 80 pour cent de sa capacité initiale. Dans ce cas, il est concevable que la batterie soit retirée dans son ensemble et utilisée dans une application stationnaire pendant quelques années supplémentaires. On parle alors d'une « seconde vie » de la batterie.

Cela peut être intéressant pour un exploitant de bus, par exemple, s'il exploite un système photovoltaïque sur le toit du dépôt et peut stocker l'énergie produite dans la batterie stationnaire pour recharger les bus la nuit.

D'un point de vue écologique, cette utilisation est toujours plus judicieuse que le recyclage immédiat de la batterie. Sur le plan économique, comme indiqué, cette approche est pertinente si la batterie peut être utilisée pour augmenter la consommation d'électricité renouvelable.

Si la batterie n'est plus utilisable ultérieurement pour un usage stationnaire ou si une seconde vie n'était pas judicieuse dès le départ, la batterie sera presque certainement recyclée. Avec les prix actuels des matières premières (Co : 30'500 €/t ; Ni : 16'000 €/t ; cuivre (Cu) : 5'700 €/t ; Lithium (Li) : 11'200 €/t), une batterie NMC contenant notamment ces quatre matériaux vaut environ 2'700€/t. À cela s'ajoute la valeur des déchets d'acier et d'aluminium. Pour une grande batterie de bus de 450 kWh, qui pèse environ 3,75 tonnes, cela donne une valeur matérielle d'environ 10'000 € par batterie. Si le coût économique du recyclage de la batterie est inférieur à cette valeur, il sera certainement effectué.

Avant 2010, les batteries au lithium (provenant d'ordinateurs portables, de téléphones mobiles, etc.) étaient généralement recyclées par pyroméallurgie dans un processus de raffinage combiné cuivre-nickel, comme analysé dans Stamp et al. 2013. Le cuivre, le nickel, le cobalt, l'étain et tous les métaux du groupe or, argent et platine présents pourraient être récupérés sous forme de métaux. Le lithium, en revanche, est oxydé dans ces processus et se retrouve dans les scories, qui trouvent une autre utilisation dans la construction des routes, par exemple.

Étant donné que de plus en plus de véhicules électriques équipés de batteries au lithium sont mis sur le marché depuis une dizaine d'années et qu'une pénurie de lithium est attendue à long terme sans un bon recyclage, l'industrie du recyclage s'efforce depuis un certain temps d'optimiser les processus afin que le lithium puisse également être récupéré sous une forme utilisable pour la production de batteries. Cela se fait aujourd'hui, par exemple à Batrec en Suisse, par des procédés hydroméallurgiques, notamment par lixiviation de la fraction métallique (Batrec 2020).

A1.3 Aspects environnementaux et criticité des matières premières

La production de batteries nécessite des matériaux et des composants spécifiques, dont certains sont produits avec des besoins énergétiques importants. Ainsi, les piles ont une empreinte écologique déterminée dans les analyses du cycle de vie (bilans écologiques, *Life Cycle Assessment* ou LCA). Un LCA examine les processus nécessaires pour produire d'abord les supports d'énergie et les matières premières, puis les matériaux et les composants, et enfin la batterie finie. Pour chaque étape individuelle du processus, les ressources requises et les émissions entraînées sont compilées. Enfin, les ressources et les émissions de toutes les étapes de la chaîne d'approvisionnement sont additionnées. Cela crée un inventaire de toutes les émissions de CO₂, NO_x, SO₂, etc. causées par la production d'une batterie. Dans une dernière étape, les émissions qui causent les mêmes dommages environnementaux sont ensuite combinées. Par exemple, tous les gaz à effet de serre sont pondérés et additionnés pour donner le potentiel de gaz à effet de serre global total de la production de la batterie.

Outre les émissions liées à la production des batteries, il faut également tenir compte de la consommation de ressources des batteries. Une attention particulière doit être accordée aux matières premières rares et critiques, qui sont très importantes pour les batteries. Nous nous penchons donc d'abord sur les matériaux ou les matières premières dont est constituée une batterie. Ensuite, nous examinons le bilan écologique de la production et déterminons quelles sont les matières premières potentiellement critiques.

Bilan écologique d'une batterie

L'une des premières évaluations détaillées et publiées dans un cadre scientifique du cycle de vie d'une batterie Li pour l'électromobilité provient de l'Empa (Notter et al. 2010). Dans cette étude, toutes les étapes du processus permettant de passer des matières premières à une batterie dans un véhicule ont été inventoriées et cartographiées individuellement. La figure 57 montre les étapes. L'étude porte sur la production d'une batterie au lithium et à l'oxyde de manganèse (LiMn₂O₄/graphite) de 2015 à 2020 et tient compte des progrès technologiques attendus d'ici là. L'étude a révélé une contribution totale à l'effet de serre de la production de batteries de 6,00 kg d'équivalent CO₂ par kg de batterie. Les cellules de la batterie y contribuent pour un peu moins de 75 pour cent. Le reste provient de l'électronique pour la gestion de la batterie, de l'emballage en acier de la batterie et des câbles en cuivre. La cathode (environ 50 pour cent des émissions liées à la production des cellules) et l'anode (environ 25 pour cent des émissions liées à la production des cellules) contribuent le plus au bilan d'effet de serre des cellules de batterie. Pour les résultats de la production d'anodes et de cathodes, l'apport énergétique joue un rôle beaucoup plus faible que les matériaux nécessaires. En revanche, dans l'étape de production des cellules (*single cell*), qui entraîne près de 0,4 kg d'émissions d'équivalent CO₂ par kg de batterie, le besoin en électricité joue un rôle majeur. Une analyse de sensibilité a révélé que les émissions totales de gaz à effet de serre d'une batterie NMC ne seraient que légèrement supérieures.

D'autres études publiées entre 2008 et 2012 ont révélé dans certains cas des taux beaucoup plus élevés d'émissions de gaz à effet de serre provenant de la production de batteries au lithium. Les grandes différences proviennent principalement des hypothèses sur le besoin en électricité de la production de cellules. Le tableau 27 montre les études en comparaison avec les sources de besoin d'énergie dans la production. Ces différents résultats ont conduit au fait que, selon les données de la batterie, le bilan écologique d'un véhicule à batterie pourrait être plus ou moins performant par rapport à un véhicule à essence ou diesel.

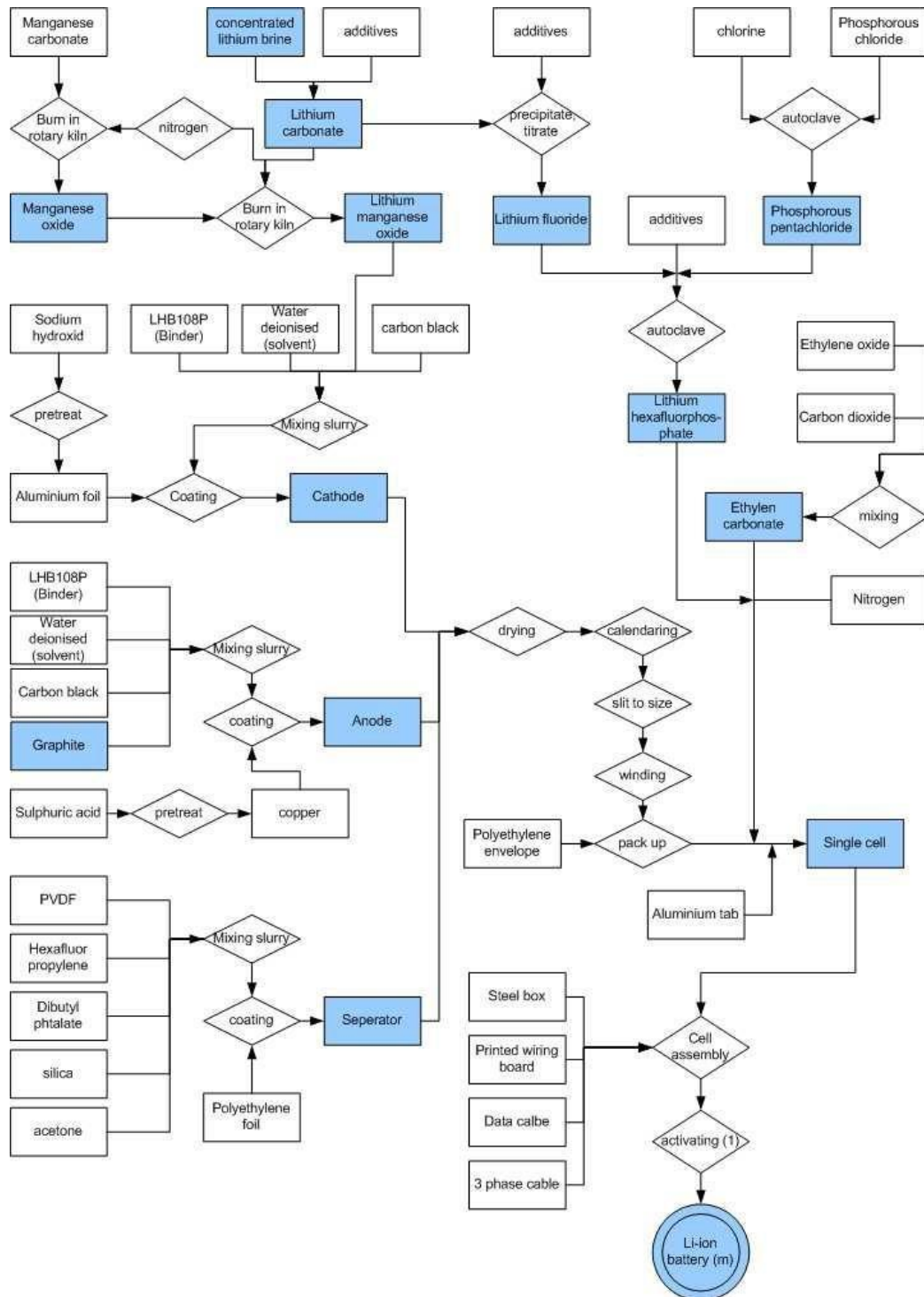
Dans des études plus récentes, le consensus a été établi que les valeurs plus élevées du tableau 27 surestiment la contribution des batteries à l'effet de serre. Cox et al. 2020 ont analysé cette littérature et en ont déduit une valeur de 12 kg d'équivalent CO₂ par kg de batterie comme étant la valeur actuelle la plus probable. Les résultats récents du PSI sont de 10,8 kg d'équivalent CO₂ par kg de batterie (INFRAS/PSI/Quantis 2020). Pour la production future de batteries, la valeur est susceptible de diminuer encore, car on peut supposer que l'émission spécifique de la production d'électricité pour la production de cellules diminuera. À titre d'hypothèse prudente, nous supposons aujourd'hui et pour l'avenir une valeur de 10,8 kg d'équivalent CO₂/kg de batterie.

Tableau 27 : comparaison des études sur les batteries jusqu'en 2012

Référence	PRG kg/kg	PRG kg/kWh	Source du besoin d'énergie Production	Commentaire sur la source
Ishihara et al. 2002	6	75	Mesures / calculs propres	
Greet 2006	7.5	75	Ishihara et al. 1999	
Notter et al., 2010	6	52	Calculs propres	
SEI 2007	20	200	Ecoinvent v2.0	Erreur de réfraction dans la source
Samaras et Meisterling, 2008	12	120	Rydh & Sandén 2005	La source s'appuie sur une étude suédoise pour les batteries de téléphones mobiles de 1999. L'étude originale est introuvable.
Majeau-Bettez et al. 2011	22	200 / 250	Rydh & Sandén 2005	
Helms et al., 2010	12	120	Rapport sur le développement durable Sanyo 2008	Besoin en énergie estimé sur la base de l'allocation économique. Comme les batteries Li étaient encore très chères à l'époque, le besoin en énergie est surestimé.
Zackrisson et al, 2010	15.5 / 23	166 / 250	Rapport sur le développement durable Saft 2008	
Frischknecht 2012	17.1	171	Rapport sur le développement durable Maxell 2003	

Tableau : Althaus 2013

Figure 57 : Procédés de production d'une batterie au lithium (LiMn_2O_4 /graphite) pour l'électromobilité



Graphique Notter et al. 2010 (SI)

Criticité des ressources dans le contexte des batteries et des moteurs électriques

Le National Research Council a développé le concept de criticité matérielle au cours de la première décennie de notre siècle. Dans ce concept, la criticité d'une matière première (ou d'un matériau) est déterminée par la combinaison de la probabilité d'une pénurie d'approvisionnement et de la gravité de l'impact potentiel de cette pénurie (National Research Council 2008). Selon la définition européenne, un matériau est considéré comme critique si le risque d'approvisionnement et l'impact potentiel d'une rupture d'approvisionnement sont tous deux supérieurs à la moyenne (Commission européenne 2010).

Les substances suivantes sont très souvent jugées critiques : indium, niobium, platine, rhodium, ruthénium, terres rares et tungstène. D'autres matières premières sont souvent considérées comme critiques : antimoine, béryllium, cobalt, fluor, gallium, germanium, lithium, magnésium, les autres métaux du groupe du platine (iridium, osmium, palladium), étain et zirconium (Erdmann et Graedel 2011). D'un point de vue européen, le tableau est quelque peu différent (figure 58). Ces différentes évaluations montrent clairement que la criticité n'est pas un concept absolu, mais dépend du contexte. Le lithium, par exemple, est un élément très important dans le contexte de l'électromobilité, mais d'un point de vue européen, il n'a qu'une importance économique moyenne et un faible risque d'approvisionnement. Du point de vue d'un fabricant de batteries, cependant, le risque d'approvisionnement pourrait bien être considérable, car la production de carbonate de lithium, qui est nécessaire comme produit de départ dans la fabrication des batteries, est concentrée dans un nombre relativement faible d'entreprises. Cependant, les métaux industriels tels que l'aluminium ou l'acier ne sont jamais considérés comme critiques et n'ont donc pas besoin d'être examinés plus avant.

Sur la base des matériaux qui sont importants pour les batteries et les moteurs électriques, il convient donc d'évoquer les matériaux suivants : cuivre, nickel, manganèse, cobalt, lithium, graphite et terres rares.

La figure 58 montre que le cuivre, le nickel et le manganèse ont une importance économique moyenne à élevée, mais que le risque de pénurie d'approvisionnement se situe dans une fourchette très basse. Les métaux sont extraits et traités dans de nombreux endroits du monde et sont négociés sur les marchés boursiers. Un risque d'approvisionnement ne peut être envisagé à très long terme que si la demande mondiale de ces matériaux devait augmenter fortement sur une longue période en raison d'une expansion massive du réseau électrique (cuivre) et/ou de la production d'électricité renouvelable et de l'électromobilité.

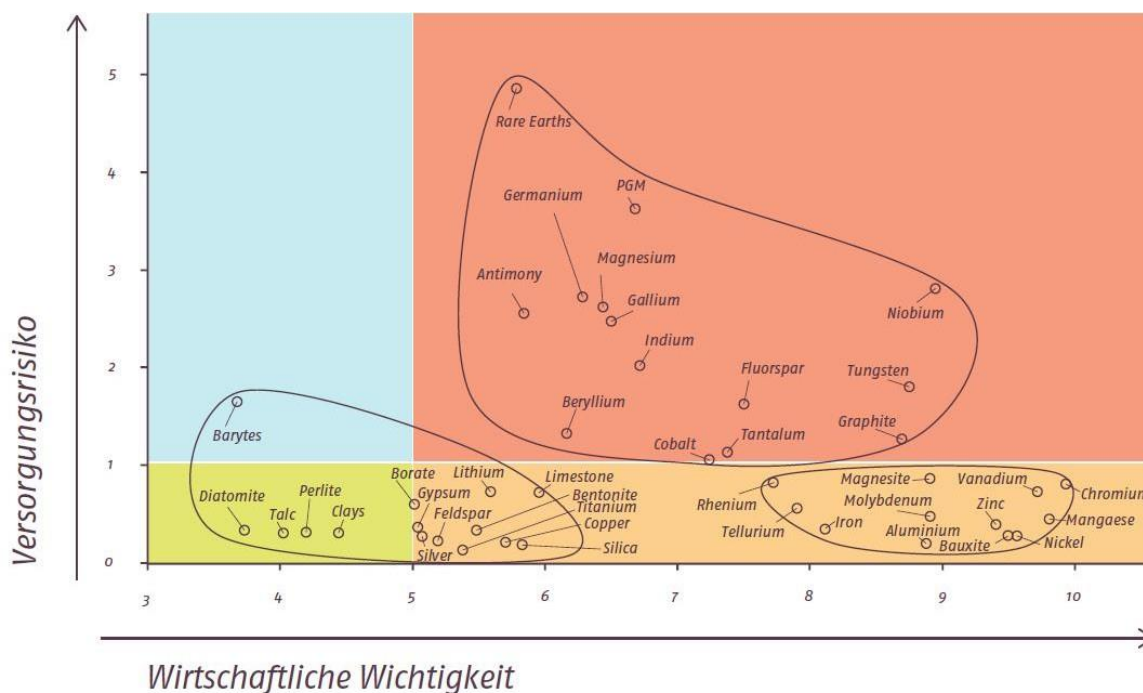
Le cobalt et le lithium présentent tous deux un intérêt économique moyen pour l'Europe. De ce point de vue, le risque de pénurie d'approvisionnement est à la limite de la criticité.

¹⁵⁴ Les moteurs électriques sont fabriqués en acier, en cuivre et, très souvent, en terres rares, qui sont utilisées dans les aimants permanents. Le cobalt est également présent dans les moteurs.

Dans le contexte de l'électromobilité, il est donc logique de considérer ces matériaux comme potentiellement critiques et de les examiner en profondeur.

Le graphite et les terres rares sont également clairement dans la fourchette critique d'un point de vue paneuropéen. En conséquence, ces matériaux sont examinés plus en détail ci-dessous.

Figure 58 : matrice de criticité selon la Commission européenne



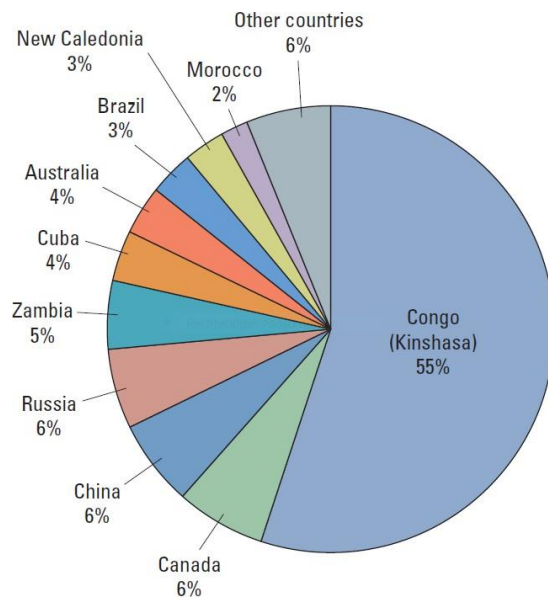
Graphique Swisscleantech. Source : Commission européenne 2010.

Cobalt

Plus de la moitié du minerai de cobalt mondial provenait des mines du Congo (Kinshasa)¹⁵⁵ en 2011. On estime que 15 à 20 pour cent de cette quantité est extraite dans des mines artisanales à petite échelle (Banza Lubaba Nkulu et al. 2018). Les autres producteurs importants sont le Canada, la Chine, la Russie, la Zambie, Cuba et l'Australie (Slack et al. 2017). Le cobalt est presque exclusivement exploité avec d'autres métaux (nickel, cuivre, métaux du groupe du platine [MGP] et zinc). La transformation des minerais en cobalt métallique avait lieu pour l'essentiel en Chine en 2011, où une grande partie des minerais du Congo (Kinshasa) étaient également traités. Les minerais des autres pays importants sont le plus souvent traités dans le pays même.

¹⁵⁵ République démocratique du Congo

Figure 59 : parts de la production mondiale de cobalt en 2011



Grafique Slack et al. 2017

La production mondiale de cobalt est passée de quelques milliers de tonnes en 1950 à un peu moins de 50'000 tonnes par an vers 1978. Entre 1985 et 1994, la production est tombée à environ 20'000 tonnes par an. Cette baisse a été suivie d'une forte augmentation, largement due à l'introduction et à la diffusion des batteries au lithium, pour atteindre environ 110'000 tonnes en 2011 (Slack et al. 2017). En 2018, la production mondiale de cobalt a atteint son record historique de 148'000 tonnes (Statista 2020). En 2019, la production a à nouveau accusé un léger recul à 140'000 tonnes. Cette baisse peut s'expliquer par le fait que la production était supérieure à la demande et que le prix du cobalt a donc également baissé.

La ressource terrestre totale de cobalt¹⁵⁶ est de l'ordre de 25 millions de tonnes. Ce chiffre inclut la quantité de cobalt déjà extraite, qui est toutefois relativement faible (Slack et al. 2017). Une quantité environ quatre fois plus importante de cobalt est également stockée dans les sédiments des fonds marins. Toutefois, pour exploiter ces ressources de manière rentable, il faut encore développer la technologie minière.

Le prix moyen du cobalt à long terme est d'environ 30 €/kg (20 \$/lb). Toutefois, comme le montre la figure 60, de fortes variations à la hausse sont possibles. C'est souvent le cas des métaux qui sont pratiquement exclusivement extraits en tant que coproduits avec d'autres métaux.

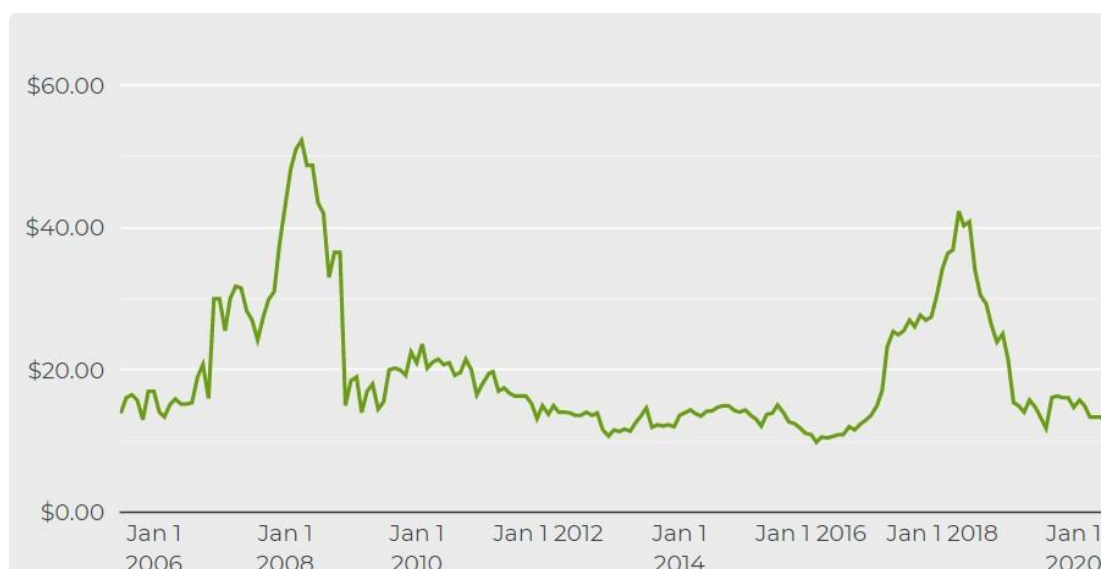
¹⁵⁶ Ce terme ne comprend que les gisements pour lesquels on peut estimer raisonnablement qu'ils puissent être exploités de manière économiquement rentable.

Dans ce cas, l'offre ne peut pas réagir aussi rapidement à une augmentation de la demande si cette dernière n'a pas également augmenté pour les principaux produits. Cependant, les fortes fluctuations de prix ne sont souvent pas le signe d'une réelle pénurie de matériaux, mais le résultat de la spéculation. Le prix des contrats à terme sur le cobalt (15 mois) en septembre 2020 est de 35 \$/t, ce qui correspond à la moyenne à long terme.

Outre les batteries, qui représentaient environ 30 pour cent de la demande de cobalt en 2011, les superalliages, notamment les matériaux durs pour les outils de coupe, les catalyseurs, les pigments et les alliages magnétiques (ces derniers étant utilisés dans les moteurs électriques) constituent des applications importantes du cobalt.

Le cobalt n'est pas absolument nécessaire pour les batteries au lithium. Les cellules LMO et LFP ne nécessitent pas du tout de cobalt. En revanche, elles n'atteignent qu'une partie de la densité énergétique des cellules NMC. D'autres cellules (NMC811, NCA) utilisent beaucoup moins de cobalt que les cellules NMC classiques.

Figure 60 : évolution du prix du cobalt depuis 2005 (en \$/lb)



Graphique <https://www.mining.com/markets/commodity/cobalt/>

Évaluation des risques

La République démocratique du Congo est un pays dont les infrastructures sont faibles, où règnent le nationalisme des ressources, la corruption et le manque de transparence. Le risque de guerre civile est également considéré comme relativement élevé (Slack et al. 2017). Le fait qu'une grande partie de la production actuelle de cobalt et une grande partie des ressources mondiales se trouvent dans ce pays contribue de manière significative à l'évaluation critique du matériau.

Les dommages environnementaux les plus importants liés à l'extraction du cobalt proviennent de la construction et de l'exploitation de la mine elle-même. La conversion des terres détruit des terrains et la fourniture de l'énergie nécessaire à l'excavation et au transport entraîne des émissions de gaz à effet de serre et de polluants.

Des produits chimiques (souvent des acides) sont également utilisés dans l'exploitation de la mine pour dissoudre les métaux de la roche. Et de grandes quantités de résidus (*tailings*) sont produites, qui sont stockées dans des bassins ou sous forme de terrils et dans lesquels des quantités considérables de métaux lourds peuvent être lessivées au fil des siècles.

Le cobalt est également directement toxique, surtout lorsqu'il est inhalé en grande quantité. Bien qu'il serait relativement facile de protéger les travailleurs des mines contre la poussière, plusieurs études ont montré que les travailleurs engagés dans l'exploitation minière artisanale présentent des concentrations élevées de cobalt dans le sang ou l'urine (Banza Lubaba Nkulu et al. 2018).

Ce type d'exploitation minière est informel et en partie aussi illégal. En conséquence, il n'existe pas de réglementation et/ou de contrôle concernant la sécurité au travail, le travail des enfants et d'autres aspects sociaux. Bon nombre des principaux producteurs, qui affirment respecter le droit du travail et les normes environnementales locales, s'inquiètent du fait que les rapports faisant état du travail des enfants, de conditions de travail dangereuses et d'impacts environnementaux excessifs dans la production de cobalt ternissent l'image des produits et de l'industrie. C'est pourquoi, sous la bannière du Cobalt Institute¹⁵⁷, le « Cobalt Industry Responsible Assessment Framework (CI-RAF) » a été mis en place. Dans ce cadre, les producteurs s'engagent à rendre compte régulièrement des risques liés à l'environnement, à la santé et à la sécurité au travail, au respect des droits humains et à l'interaction avec la population locale.

Lithium

En 2012, environ la moitié du lithium était encore extraite de saumures en Amérique du Sud (notamment au Chili). L'autre moitié de la production provenait d'Australie, du Brésil, de Chine, du Portugal et du Zimbabwe, où est exploitée la pegmatite, roche porteuse de lithium. La production annuelle a nettement augmenté du début des années 1990 jusqu'en 2012, la production à partir de la saumure en particulier ayant connu une forte hausse (Bradley et al. 2017). Depuis 2012, la production en Australie notamment a été fortement augmentée. Elle était de 42'000 tonnes pour la seule année 2019 (Statista 2020). Avec les 18'000 tonnes produites au Chili, les 7'500 tonnes de la Chine, les 6'400 tonnes de l'Argentine et les 3'600 tonnes de quatre autres pays, la production annuelle en 2019 est de 77'200 tonnes (Statista 2020). USGS 2019 parle d'une production mondiale de 85'000 tonnes en 2018. Cela signifie une multiplication par trois environ de la quantité produite depuis 2012.

Environ un tiers de la production de lithium, soit un peu plus de 25'000 tonnes en 2012, a été utilisé pour les produits en céramique et en verre. Près de 30 pour cent ont été utilisés pour les batteries et le reste se répartit entre diverses applications (Bradley et al. 2017).

¹⁵⁷ voir <https://www.cobaltinstitute.org/responsible-mining-of-cobalt.html>, consulté le 25.02.2020

Si l'on part du principe que la production de batteries est à l'origine de la plus grande partie de l'expansion de la production de lithium en 2012, on peut supposer qu'aujourd'hui, environ 75 pour cent de la production de lithium est utilisée pour les batteries.

La ressource mondiale était de plus de 39 millions de tonnes en 2012 (Bradley et al. 2017). En 2019, la ressource mondiale était déjà estimée par la même institution (USGS) à 62 millions de tonnes (USGS 2019). Il est bien connu qu'avec l'augmentation de la demande, la ressource – c'est-à-dire la présence d'une substance dans la croûte terrestre qui est disponible sous une forme, un grade ou une qualité et dans une quantité tels qu'il existe une perspective raisonnable de son éventuelle extraction économiquement rentable – ne devient pas plus petite, mais plus grande (Althaus et al. 2015). Étant donné que la production de batteries pour les véhicules électriques continuera d'augmenter massivement au cours des prochaines décennies, nous devons nous attendre à une demande beaucoup plus élevée à long terme. Cela signifie que la ressource estimée à 60 millions de tonnes serait épuisée en quelques décennies et que de nouvelles installations de stockage devraient être développées. Une possibilité est l'extraction du lithium de l'eau de mer, dans laquelle il est présent à une concentration moyenne de 0,18 ppm (Wendel 2009). Dans les usines de dessalement, le lithium est concentré environ 500 fois et présente alors une concentration comparable aux saumures utilisées pour la production aujourd'hui (100 à 1000 ppm (Bradley et al. 2017)). Ce processus nécessite beaucoup d'énergie et entraîne donc des coûts élevés. Par conséquent, la production de lithium à partir d'eau de mer n'a de sens que si l'eau douce extraite peut être utilisée.

Actuellement, il n'existe pas de bonne alternative aux batteries lithium-ion pour les applications dans l'électromobilité. Par conséquent, cette technologie est pour l'instant dépendante du lithium.

Évaluation des risques

La production actuelle de lithium est concentrée en Australie et au Chili. Au moins, l'Australie est considérée comme un pays stable. La production future se fera de plus en plus dans d'autres pays et régions en raison de la demande croissante. Le risque géopolitique d'une pénurie est donc relativement faible. Toutefois, la production va tellement augmenter que la disponibilité de la ressource deviendra un défi à moyen terme. En tout état de cause, il sera important à l'avenir de récupérer le lithium lors du recyclage des batteries sous une forme sous laquelle il pourra également être réutilisé dans les batteries, ce qui n'est souvent pas le cas aujourd'hui (cf. chapitre A1.2).

La production de lithium en Australie, comme toute activité minière, entraîne des émissions dues au fonctionnement des machines et des véhicules. En outre, il existe des impacts environnementaux liés aux déblais, dont certains ont été traités avec des acides et dont les métaux dissous peuvent pénétrer dans le sol et l'eau.

Le lithium n'est toxique qu'à des concentrations élevées (utilisé dans les médicaments). Comme il est également très soluble dans l'eau, il est rapidement excrété par l'organisme. Par conséquent, l'extraction comporte des risques relativement faibles pour l'environnement et pour la main-d'œuvre.

Les violations des droits humains liées à la production de lithium sont peu probables en Australie. Au Chili, on signale des effets négatifs de la production sur la population indigène. Le problème concerne essentiellement le besoin en eau de l'industrie, qui exacerbe les goulets d'étranglement existants.

Graphite

Environ 700'000 tonnes de graphite ont été produites en Chine en 2019. Le deuxième producteur était le Brésil avec un peu moins de 100'000 tonnes. Madagascar, le Canada et l'Inde suivent avec un peu moins de 50'000 tonnes chacun. Environ 1,1 million de tonnes de graphite ont été produites dans le monde en 2019 (Statista 2020). La production est restée à peu près constante depuis 2010 (Robinson et al. 2017).

Le graphite est extrait dans des mines à ciel ouvert ou des exploitations minières, broyé et enrichi par un procédé relativement simple.

Outre l'utilisation du graphite comme anode dans les batteries, il est également utilisé comme anode dans les électrolyses ou comme graphène dans les piles solaires. Les autres applications comprennent les matériaux réfractaires (par exemple dans les hauts fourneaux ou l'aérospatiale), les crayons et les lubrifiants. La demande croissante d'énergies renouvelables et de batteries pourrait à peu près doubler la demande de graphite à moyen terme (Robinson et al. 2017).

La ressource mondiale déclarée en 2012 était d'environ 80 millions de tonnes, mais on estime que ce chiffre est en réalité beaucoup plus élevé, car les ressources ne sont généralement déclarées que peu de temps avant leur utilisation. Les estimations sont de l'ordre de 1'500 millions de tonnes (Robinson et al. 2017).

Les batteries ont besoin de graphite comme anode. Cependant, il existe plusieurs possibilités d'utiliser d'autres matériaux. Des recherches intensives sont également menées sur d'autres matériaux d'anode, car ceux-ci pourraient être utilisés pour augmenter la densité d'énergie et/ou de puissance de la batterie. Un matériau possible serait le silicium ou les composites silicium-carbone, tandis que d'autres chercheurs se concentrent sur le lithium métallique comme matériau d'anode.

Évaluation des risques

Le graphite est présent en quantité suffisante dans la nature. Par conséquent, il n'y a pas de pénurie d'un point de vue géologique. Cependant, il existe un risque géopolitique, car la production est principalement concentrée en Chine.

Le graphite est un matériau inerte et non toxique et la majorité de la roche-mère n'est pas non plus problématique. Par conséquent, la production présente peu de risques pour la santé et les déblais posent peu de problèmes pour l'environnement.

Comme pour tous les produits provenant de Chine, il faut s'attendre à ce que des violations des droits humains se produisent dans la chaîne de production du graphite.

Terres rares

Les terres rares ne sont guère utilisées dans les batteries, mais elles sont importantes dans les moteurs électriques. Étant donné que tous les véhicules à batterie ont également besoin de moteurs électriques, nous abordons ici aussi les aspects de criticité.

Les « terres rares » comprennent 15 éléments chimiques qui se situent entre le lanthane et le lutécium dans le tableau périodique (les lanthanides) ainsi que l'yttrium, qui possède des propriétés chimiques comparables. Le nom de « terres rares » vient d'une époque où ces éléments étaient encore considérés comme rares, bien qu'ils ne le soient pas réellement en raison des concentrations moyennes de la croûte terrestre (Van Gosen et al. 2017).

Jusqu'en 2012, plus de 90 pour cent des terres rares étaient extraites en Chine. En 2010, la Chine a introduit des quotas d'exportation et prélevé des taxes, ce qui a entraîné une forte hausse du prix de ces matériaux. Depuis lors, de nouvelles (et anciennes) mines ont été (ré)ouvertes dans de nombreux autres pays et régions. En 2019, la part de la production chinoise était encore de 62 pour cent avec 132'000 tonnes. Les autres grands producteurs actuels sont les États-Unis, le Myanmar (Birmanie) et l'Australie (USSG 2020). La production annuelle mondiale de 210'000 tonnes (en 2019) est à comparer à une réserve¹⁵⁸ de 120 millions de tonnes (USGS 2020). Van Gosen et al. 2017 estiment la ressource à plusieurs milliers de millions de tonnes.

La plupart des terres rares sont utilisées dans l'industrie du verre. Elles peuvent être utilisées pour colorer ou décolorer le verre et les éléments les plus lourds augmentent l'indice de réfraction du verre, ce qui les rend intéressants pour les lentilles optiques. Une autre application importante est celle des catalyseurs, par exemple dans les raffineries de pétrole. L'application pertinente dans le contexte de l'électromobilité est celle des aimants permanents utilisés dans les moteurs électriques.

¹⁵⁸ Le terme « réserve » désigne la partie de la « ressource » indiquée ou mesurée qui peut être extraite de manière économiquement rentable avec la technologie actuelle et dans l'environnement de marché actuel.

Ici, on utilise principalement du néodyme et de plus petites quantités de dysprosium, de gadolinium et de praséodyme. Outre les moteurs électriques, les générateurs, par exemple pour les centrales éoliennes, les disques durs et les téléphones portables ont également besoin de ces aimants.

Les aimants permanents ne sont pas absolument nécessaires dans les moteurs des véhicules électriques. Il existe également des moteurs qui fonctionnent avec des bobines au lieu d'aimants permanents. Toutefois, le degré d'efficacité diminue alors quelque peu.

Évaluation des risques

Comme la production ne se fait plus presque entièrement en Chine, les risques géopolitiques de pénurie ont considérablement diminué. Il n'y a jamais eu de pénurie géologique. Néanmoins, avec la demande croissante de certains éléments de cette famille, les processus de recyclage deviennent de plus en plus importants. Aux États-Unis et en Europe, des efforts importants sont en cours de la part des gouvernements et de l'industrie.

Les gisements de terres rares contiennent souvent aussi des traces des éléments radioactifs que sont le thorium et l'uranium. Ils sont principalement extraits et traités dans des mines à ciel ouvert. Les déblais dans les mines sont tout aussi problématiques.

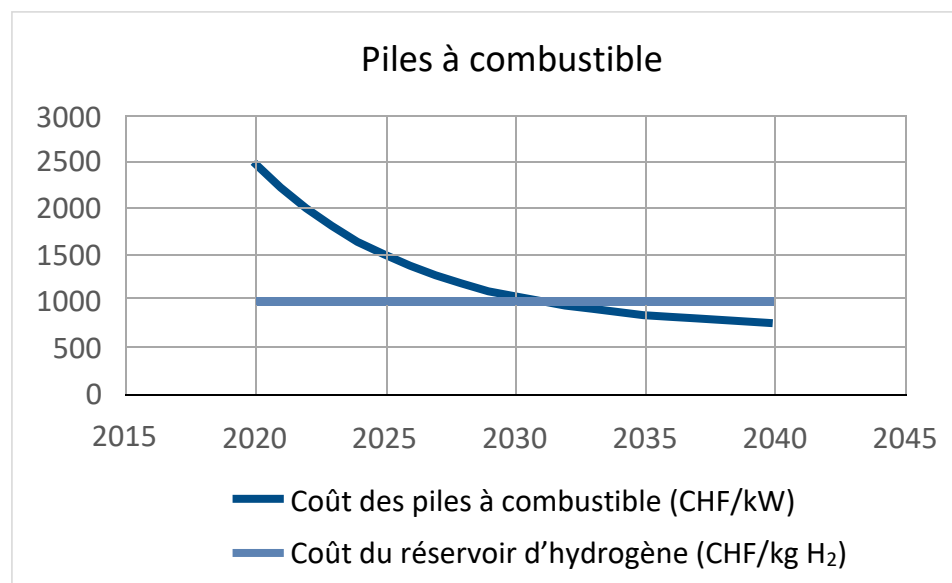
Comme pour tous les produits provenant de Chine, il faut s'attendre à ce que des violations des droits humains se produisent dans la chaîne de production des terres rares. Les produits des États-Unis et de l'Australie sont moins suspects à cet égard. Aucun élément n'a été trouvé sur la situation au Myanmar (Birmanie).

A2 Contexte sur les piles à combustible

Les modules de piles à combustible les plus couramment utilisés dans le secteur de l'automobile sont les « *polymer electrolyte membrane fuel cell* » (PEMFC). La puissance électrique typique de ces modules pour les véhicules utilitaires lourds est de l'ordre de 60 à 180 kW, ce qui correspond approximativement à la puissance moyenne requise par un bus standard ou articulé. Ces modules pèsent entre 250 et 400 kg environ. Il y a quelques années, les modules de piles à combustible pour un bus standard coûtaient environ 600'000 euros. Aujourd'hui, selon Ballard, ils se situent entre 200'000 et 300'000 euros. L'objectif de Ballard est de réduire ces coûts encore de moitié.

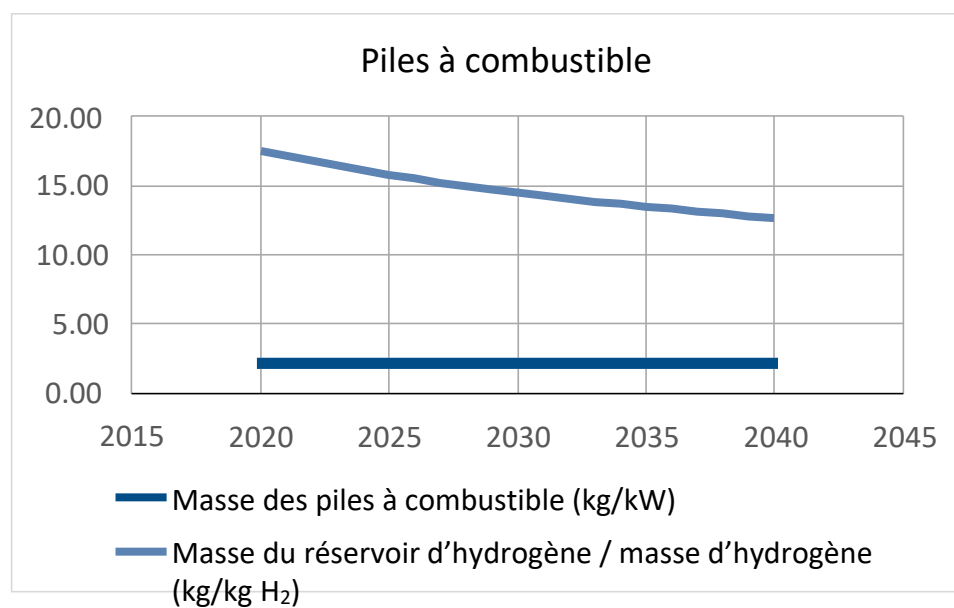
La production d'un système de piles à combustible et de réservoirs d'hydrogène pour un bus électrique entraîne des émissions de gaz à effet de serre de l'ordre de grandeur de la production d'une batterie de bus alimenté par biberonnage de 400 kWh. La durée de vie des modules de piles à combustible est aujourd'hui de l'ordre de celle des batteries classiques.

Figure 61 : coûts spécifiques des piles à combustible et des réservoirs d'hydrogène dans le temps



Graphique INFRAS.

Figure 62 : masses spécifiques des piles à combustible et des réservoirs d'hydrogène dans le temps



Graphique INFRAS.

A3 Contexte sur les carburants renouvelables

Les carburants renouvelables comprennent également les biocarburants et les carburants synthétiques produits à partir d'électricité renouvelable. Le potentiel de ces deux sources est limité. Toutefois, dans le cadre des efforts visant à réduire massivement les émissions de gaz à effet de serre, la demande de ces carburants augmentera tant dans le secteur des transports que dans d'autres secteurs (par exemple, l'industrie). Cela signifie que les quantités disponibles de ces carburants seront probablement bientôt totalement épuisées. Toutefois, il est très difficile de prévoir comment les différents secteurs et applications au sein des secteurs réagiront à une pénurie. Il est donc impossible de déterminer (dans le cadre de ce travail) si une quantité suffisante de carburants renouvelables sera disponible ou non pour les bus de transport public.

Il existe des applications pour lesquelles il n'y a pratiquement aucune alternative aux hydrocarbures liquides comme carburants. C'est particulièrement vrai pour l'aviation et, dans une moindre mesure, pour la navigation. Il est également peu probable qu'il existe des alternatives viables à grande échelle pour le transport routier de marchandises sur de longues distances, du moins à moyen terme. Nous supposons que la volonté de payer de ces applications pour les carburants liquides renouvelables sera plus élevée que celle des applications avec des alternatives moins chères, comme le secteur des bus.

A3.1 Biocarburants

Les biocarburants comprennent le biodiesel, le bioéthanol et le biogaz. Le bioéthanol ne joue pas de rôle dans les véhicules utilitaires lourds et n'est donc pas examiné plus avant.

Biodiesel :

Plus de 99 pour cent du biodiesel actuellement produit dans le monde provient directement des fruits des plantes oléagineuses. Ces carburants n'ont pas encore été utilisés par les exploitants de bus en Suisse parce qu'ils ne peuvent pas bénéficier de l'exonération de l'impôt sur les huiles minérales et qu'il n'existe donc aucune incitation à les utiliser. Aujourd'hui, la Suisse n'utilise pratiquement que du biodiesel issu d'huiles de cuisson usagées. La plupart du biodiesel disponible aujourd'hui à partir d'huiles de cuisson usagées est produit par estérification d'huiles végétales et est appelé FAME (*fatty acid methyl ester*). Contrairement au diesel fossile, le FAME n'est pas un hydrocarbure pur, mais un ester méthylique d'acide gras, qui est hygroscopique et légèrement corrosif en raison de la présence d'atomes d'oxygène dans sa structure moléculaire et dont le contenu énergétique est légèrement inférieur à celui du diesel fossile. Le diesel qui n'est pas spécifiquement déclaré à la station-service peut contenir jusqu'à 7 pour cent de FAME selon la « norme diesel » (EN 590). Dans ce mélange, il peut être utilisé dans n'importe quel moteur diesel normal. Toutefois, certains constructeurs de véhicules utilitaires lourds proposent depuis un certain temps des modèles pouvant également fonctionner avec 100 pour cent de FAME.

Une alternative à l'estérification de l'huile végétale est son hydrogénation, c'est-à-dire une transformation des acides gras en hydrocarbures purs par hydrogénation avec de l'hydrogène. En principe, les mêmes matières premières que pour la production de FAME peuvent être utilisées. Le biodiesel produit de cette manière est appelé huile végétale hydrogénée ou HVO (*hydrogenated vegetable oil*). La HVO est chimiquement très similaire au diesel fossile et, selon la norme sur le diesel, elle peut être présente dans le diesel quelle que soit sa quantité (c'est-à-dire également à 100 pour cent).

D'ici 2030, il est prévu que le biodiesel produit synthétiquement à partir de plantes lignocellulosiques, de déchets de bois ou de déchets biogènes sera également sur le marché, ce qui ne concurrencera pas la production alimentaire en termes d'utilisation des terres. Ce carburant est appelé diesel « *biomass to liquid* » (BtL) selon sa filière de production. Le diesel BtL est produit par un procédé de synthèse et présente des propriétés directement comparables au diesel fossile.

Le biodiesel nécessite une infrastructure de réservoirs séparée afin de garantir que le carburant ne soit pas mélangé au diesel fossile. Cette infrastructure, tout comme les véhicules, est techniquement très similaire à l'infrastructure de ravitaillement du diesel normal.

À l'heure actuelle, le biodiesel est l'une des rares options permettant de réduire les émissions de gaz à effet de serre provenant du transport longue distance avec des poids lourds. Le biogaz et l'hydrogène nécessitent des réservoirs trop grands et trop lourds pour cette application, les véhicules à batterie auront encore longtemps une autonomie trop faible par charge et des temps de charge trop longs, et une alimentation électrique nationale pour les trolleybus sera mise en place lentement, au mieux, en raison des coûts élevés. On s'attend donc à ce que le développement et la demande de camions fonctionnant au biodiesel continuent d'augmenter. La production de biodiesel à base de déchets va également augmenter. Cela s'explique notamment par le fait que la nouvelle directive sur les énergies renouvelables de l'UE stipule que les quotas de mélange de ces carburants doivent être augmentés en permanence. Cependant, en raison de la quantité limitée de matières premières disponibles pour ce biodiesel, il faut s'attendre à ce que la production ne puisse pas augmenter à volonté.

Dans le cadre de la directive sur les énergies renouvelables de l'UE, il existe déjà des incitations à utiliser le biodiesel pour des applications pour lesquelles il n'existe pratiquement aucune alternative (transport aérien, bateaux de haute mer, éventuellement poids lourds longue distance). Des incitations similaires sont susceptibles d'être créées en Suisse. Pour les bus urbains, cela pourrait signifier que le biodiesel deviendra plus cher à partir des années 2030 et que les véhicules correspondants disparaîtront lentement du marché.

Biogaz

Le biogaz est produit par la fermentation anaérobie de la biomasse, généralement des déchets végétaux et alimentaires. Après purification du produit, le biogaz se compose presque entièrement de méthane et peut être utilisé comme substitut 1:1 du gaz naturel.

Des véhicules au biogaz et des stations-service sont déjà en service dans de nombreux endroits. Toutefois, ces véhicules ont un rendement énergétique nettement inférieur à celui des véhicules fonctionnant au biodiesel. En outre, une certaine quantité de biogaz est toujours émise lors de la production de biogaz ainsi que lors du ravitaillement. Ce méthane étant un puissant gaz à effet de serre, les véhicules au biogaz produisent des émissions de GES légèrement supérieures à celles des véhicules au biodiesel.

Comme le biodiesel, le biogaz est également basé sur des matières premières dont la disponibilité est limitée. Afin d'augmenter l'offre de biogaz, des efforts supplémentaires devraient être consentis pour la collecte sélective des déchets ménagers biogènes. Cela a d'une part une incidence sur les coûts du carburant et, d'autre part, cela aggrave le bilan climatique de l'utilisation du biogaz, car une expansion de ces collectes implique toujours des transports supplémentaires.

A3.2 Carburants synthétiques

Les carburants synthétiques comprennent ici les carburants dits « *Power-to-X* » (PtX), dont le contenu énergétique stocké chimiquement a été constitué par l'utilisation d'électricité (renouvelable). Plus précisément, cela s'applique à l'hydrogène (H₂) issu de l'électrolyse et aux hydrocarbures liquides ou gazeux produits à partir de cet hydrogène et du CO₂ extrait de l'air.

Hydrogène (PtH₂)

La plupart de l'hydrogène utilisé aujourd'hui est produit à partir de gaz naturel fossile par reformage à la vapeur. Cette partie est exclue de notre étude car elle n'est pas renouvelable. L'hydrogène renouvelable peut être produit par électrolyse de l'eau avec de l'électricité renouvelable. Pour des raisons énergétiques et économiques, il est préférable de réaliser l'électrolyse directement dans une centrale électrique (par exemple, une centrale au fil de l'eau). Cela permet de réduire les pertes et les coûts de transmission. Le processus d'électrolyse, qui est exploité avec un rendement énergétique moyen d'environ 65 pour cent, entraîne des coûts et des pertes d'énergie. Pour stocker et transporter l'hydrogène, il faut le comprimer à au moins 300 bars, ce qui nécessite d'utiliser environ 15 pour cent du contenu énergétique de l'hydrogène. Cela signifie qu'environ 45 pour cent de l'énergie électrique est perdue lors de la production et du stockage de l'hydrogène à partir de l'électricité.

Dans le cadre d'une conversion du système énergétique vers une énergie sans CO₂ et sans énergie nucléaire, il est toutefois impératif d'utiliser l'énergie de la manière la plus efficace possible. Étant donné que la production d'électricité reposera davantage sur l'énergie éolienne et solaire à l'avenir, la production de l'ensemble de la production d'électricité ne sera plus aussi constante dans le temps qu'elle ne l'était jusqu'à présent. En d'autres termes, il y aura des moments où l'électricité sera trop disponible et d'autres où elle sera plutôt rare.

S'il y a trop d'électricité disponible, elle est en conséquence bon marché et la mauvaise efficacité de la conversion d'énergie est moins problématique à ce moment-là. C'est pourquoi il a été dit que cette électricité bon marché pouvait être utilisée pour produire des carburants synthétiques. Aussi plausible que ce raisonnement puisse paraître à première vue, il comporte des difficultés : les périodes où la quantité d'électricité provenant de sources renouvelables est trop importante et ne peut être compensée par d'autres flexibilités du système¹⁵⁹ ne sont pas très fréquentes dans l'ensemble. À l'avenir, il y aura donc certainement un certain potentiel d'électricité renouvelable pouvant être utilisé à bon marché pour la production d'hydrogène. Le potentiel sera toutefois limité, car les investissements dans les installations de production ne peuvent être amortis que si ces installations peuvent produire une grande partie du temps.

Hydrocarbures synthétiques (PtG / PtL)

Les hydrocarbures synthétiques sont produits à partir de CO₂ et d'hydrogène. Le CO₂ est extrait de l'air, l'hydrogène de l'électrolyse. En principe, on peut produire du méthane de cette manière ou des hydrocarbures liquides à longue chaîne dont les propriétés sont comparables à celles du diesel.

La production de carburants synthétiques nécessite beaucoup d'électricité (renouvelable), car le rendement énergétique global de la production est de l'ordre de 40 pour cent. Dans le cadre d'une conversion du système énergétique vers une énergie sans CO₂ et sans énergie nucléaire, il est toutefois d'autant plus important d'utiliser l'énergie de la manière la plus efficace possible. Étant donné que la production d'électricité reposera davantage sur l'énergie éolienne et solaire à l'avenir, la production de l'ensemble de la production d'électricité ne sera plus aussi constante dans le temps qu'elle ne l'était jusqu'à présent. En d'autres termes, il y aura des moments où l'électricité sera trop disponible et d'autres où elle sera plutôt rare. S'il y a trop d'électricité disponible, elle est en conséquence bon marché et la mauvaise efficacité de la conversion d'énergie est moins problématique à ce moment-là. C'est pourquoi il a été dit que cette électricité bon marché pouvait être utilisée pour produire des carburants synthétiques. Aussi plausible que ce raisonnement puisse paraître à première vue, il comporte des difficultés : les périodes où il y a trop d'électricité provenant de sources renouvelables ne sont pas très fréquentes dans l'ensemble. Cela signifie qu'une usine de production qui n'utilise que ce « surplus d'électricité » fonctionnerait peut-être 20 pour cent du temps et resterait à l'arrêt le reste de l'année. L'investissement dans une telle usine ne serait donc pas amorti, ou au mieux très lentement. Pour cette raison, les prix des carburants synthétiques devraient rester très élevés à moyen terme.

¹⁵⁹ Par exemple, les pompes à chaleur ou les véhicules alimentés par batterie qui utilisent une commande intelligente pour consommer de l'électricité lorsque l'offre est élevée.

A4 Contexte sur le bruit des bus conventionnels et électriques

Le bruit des bus affecte les passagers d'une part et les personnes à l'extérieur du bus qui sont exposées au bruit d'autre part. Dans le second cas, il faut faire la distinction entre le bruit des bus en mouvement et le bruit des bus à l'arrêt (y compris le bruit des stations de recharge / processus de recharge). Nous examinons ces situations séparément.

Bruit dans le bus

Le bruit à l'intérieur des véhicules se compose du bruit du moteur, du bruit de la route, du bruit aérodynamique et du bruit des composants. Le spectre sonore à l'intérieur des véhicules électriques diffère considérablement de celui des véhicules conventionnels. Par exemple, le son haute fréquence des véhicules électriques est beaucoup plus fort que celui des véhicules conventionnels. Mais les vibrations à basse fréquence peuvent aussi être très différentes. D'une part, cela rend la mesure plus difficile et, d'autre part, les effets ne peuvent être comparés que dans une mesure limitée (Genuit 2008). Quelques publications anciennes montrent que le niveau sonore à l'intérieur d'un bus diesel est d'environ 60 dB. Les constructeurs annoncent que les bus électriques sont plus silencieux, mais malheureusement, aucune valeur concrète n'a été trouvée. Or même la valeur pour les bus diesel est bien inférieure à la valeur limite du bruit sur le lieu de travail auquel les employés peuvent être exposés pendant 8 heures par jour. Dans ce contexte, on peut dire que le bruit dans l'habitacle des bus est une question de confort mais pas de santé. Par conséquent, il convient d'évaluer la situation sonore dans l'habitacle des bus sur la base d'enquêtes auprès des passagers. Dans une étude suédoise (Boren et al. 2016), par exemple, la situation sonore et le confort du bus électrique testé (EBusco) ont été jugés meilleurs par les passagers que ceux d'un bus diesel.

Bruit à l'extérieur du bus pendant le trajet

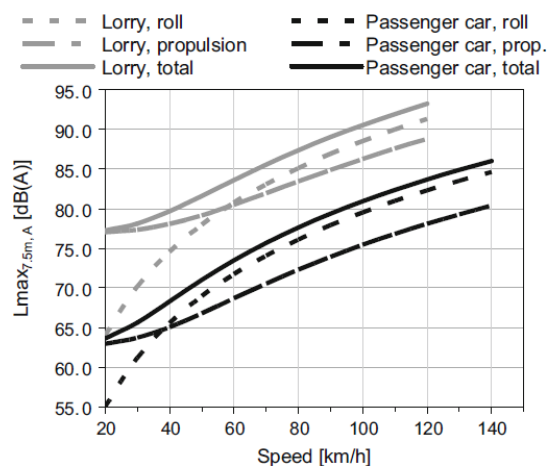
Dans le cas du bruit, contrairement aux polluants et au CO₂, tant l'émission que la pollution de fond, et donc les dommages potentiels, sont extrêmement dépendants du lieu et du moment. Néanmoins, une simple comparaison des valeurs d'émission moyennes peut être utilisée pour estimer les changements dans les effets du bruit lorsque les bus classiques sont remplacés par des bus électriques.

Le modèle actuel d'émissions pour le bruit routier de la Confédération, SonRoad (Heutschi 2004), n'inclut pas les véhicules électriques. Les émissions en fonction de la vitesse pour les véhicules légers et lourds à moteur à combustion sont présentées dans la figure 63. Lors de l'interprétation du graphique, il est important de noter que le dB est une échelle logarithmique.

Une augmentation de 3 dB correspond ainsi à un doublement de l'énergie sonore¹⁶⁰. Selon ce modèle, les bruits de roulement des véhicules lourds sont dominants jusqu'à une vitesse de 50 km/h environ. À environ 40 km/h, le bruit de roulement est environ deux fois moins fort que celui de l'entraînement. À 30 km/h, le bruit de roulement ne représente encore qu'une très faible partie de l'émission sonore.

Les émissions de roulement des bus électriques et diesel ne diffèrent pas en principe, contrairement au bruit émis par l'entraînement. Dans une première approximation, le bruit de propulsion des bus électriques peut même être négligé. À une vitesse moyenne (sans les temps d'arrêt aux arrêts) de 40 km/h, on peut, selon une estimation prudente, supposer une réduction de 4 à 7 dB des bus électriques par rapport aux bus diesel.

Figure 63 : bruit maximal de roulement et de propulsion des véhicules routiers lourds (poids lourds) et légers (voitures particulières).



Graphique Althaus et al. 2009a. Source : Heutschi 2004

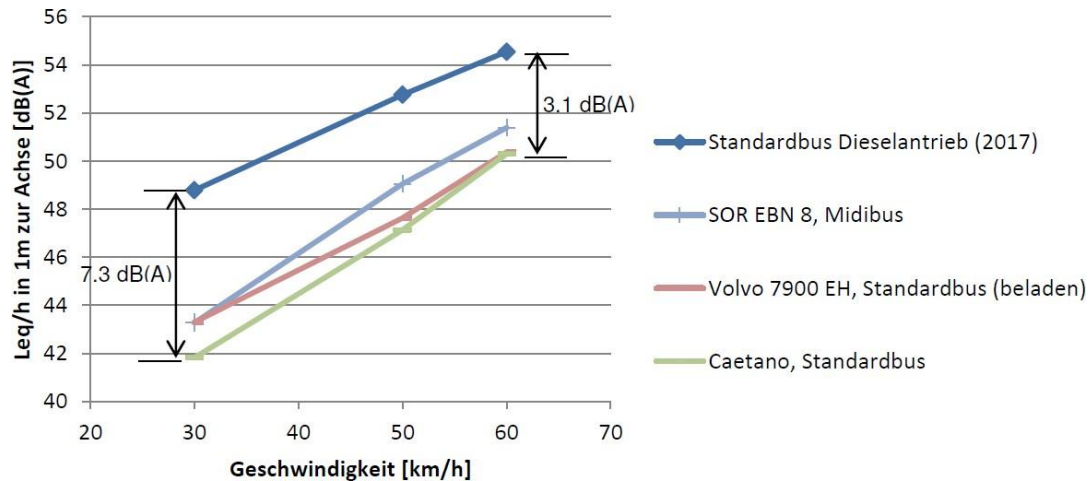
Une nouvelle version, SonRoad 18, sera publiée en 2020¹⁶¹ et contiendra également des données sur les bus électriques. Les mesures commandées et financées par la ville de Zurich en constituent la base (B&S 2018a). La figure 64 du rapport de mesure associé montre que la différence entre les bus diesel et électriques estimée à partir de SonRoad 2004 se situe dans une fourchette raisonnable.

En comparant les valeurs absolues des deux chiffres, il faut noter que dans un cas on donne le niveau sonore maximal à une distance de 7,5 m et, dans l'autre cas, le niveau à une distance de 1 m, moyenné sur une heure. Les chiffres absolus ne sont donc pas comparables. Cependant, une étude de mesure réalisée par B&S AG et l'Empa (B&S 2018b) indique que les émissions pour les véhicules lourds selon la norme SonRoad 2004 à basse vitesse (moins de 40 km/h) sont beaucoup plus élevées qu'en réalité pour les bus de transport public.

¹⁶⁰ Toutefois, cela ne signifie pas que le bruit perçu ou l'effet du bruit est doublé.

¹⁶¹ Communication personnelle avec Kurt Heutschi, Empa. 2 mars 2020.

Figure 64 : niveau de pression acoustique en fonction de la vitesse



Moyenne de toutes les valeurs mesurées des différents types de bus depuis 2017

Graphique / Source : B+S AG 2018

En principe, on peut dire que sur une route très fréquentée et bruyante, la contribution d'un bus diesel aux émissions de la route est faible, alors que sur une route calme avec peu de trafic, elle peut être relativement importante. Il en va de même pour la contribution d'un bus électrique. Cependant, quelle que soit la situation de la circulation, la contribution d'un bus électrique au niveau sonore de la route est environ 2,5 fois (3-7 dB) inférieure à celle d'un bus diesel.

Sur la base de SonRoad (2004) et de SonBase, la base de données sur le bruit de l'OFEV, Althaus 2012 a calculé les émissions spécifiques supplémentaires pour un kilomètre supplémentaire parcouru dans différents contextes. Ainsi, un kilomètre supplémentaire avec un poids lourd conventionnel (3 essieux) dans la zone urbaine entraîne une pollution sonore supplémentaire de 3,6E-9 dB/km si ce kilomètre est parcouru pendant la journée. Si le kilomètre est parcouru pendant la nuit (entre 22h et 6h), le bruit supplémentaire causé est beaucoup plus élevé, soit 5,2E-8 dB/km¹⁶². La même étude (Althaus 2012) calcule encore un préjudice de santé de ce fait en « Disability Adjusted Life Years Lost » (DALY). Ces valeurs sont basées sur un concept de l'OMS (OMS 2011), qui normalise les différentes atteintes à la santé et les met en relation avec le décès prématuré.

¹⁶² Cela s'explique par le fait qu'il y a moins de véhicules sur la route la nuit et que la contribution d'un seul véhicule est donc plus importante.

Un DALY signifie donc que les effets pondérés du bruit causent autant de dommages à la santé que si une personne mourait un an plus tôt. Les résultats sont de $2,3E-5$ DALY/km par kilomètre supplémentaire parcouru par un véhicule lourd à 3 essieux dans un contexte urbain pour les trajets de jour et de $2,8E-2$ DALY/km pour les trajets de nuit. Les valeurs pour les bus électriques ne sont pas calculées dans Althaus 2012, mais devraient être environ 2,5 fois plus faibles. Cependant, comme SonRoad 2004 surestime fortement les émissions des bus de transport public (B&S 2018b), les DALY correspondants estimés selon Althaus 2012 sont également fortement surestimés. Une extrapolation des dommages sonores avec ces valeurs et le kilométrage annuel de tous les bus des transports publics en Suisse pourrait surestimer les dommages réels d'un facteur d'environ 10.

Bruit à l'extérieur du bus aux arrêts et terminus

À l'arrêt, les émissions sonores des bus électriques sont très faibles. Ils sont pratiquement limités au bruit de la ventilation. Les bus diesel, en revanche, font du bruit même à l'arrêt, lorsque le moteur tourne, ce qui peut être assez dérangement dans un environnement autrement calme. Cependant, les bus à l'arrêt ne provoquent pratiquement jamais de nuisances sonores critiques au sens de l'ordonnance sur la protection contre le bruit.

En raison de leur puissance élevée, les stations de recharge rapide situées aux arrêts de bus nécessitent un refroidissement actif, qui peut être source de bruit. Cependant, comme il s'agit d'une unité fixe, il est relativement facile d'insonoriser ce type d'unité si nécessaire. La mise en contact du rail de chargement par le pantographe n'entraîne pas d'émissions sonores importantes, car le contact est établi ou rompu alors qu'aucune tension n'est appliquée.

A5 Hypothèses pour le calcul des coûts

A5.1. Hypothèses générales

Hypothèses pour le cadre estimatif		Bus articulé	Bus standard	Bus midi	Minibus
Électricité : besoin en énergie spécifique, y compris CVC - en 2020	kWh/km	2.00	1.50	1.10	0.80
Diesel : besoin en énergie spécifique, y compris CVC - en 2020	l/km	0.50	0.37	0.28	0.20
Hydrogène : besoin en énergie spécifique, y compris CVC - en 2020	kg/km	0.13	0.09	0.06	0.05
Biodiesel : besoin en énergie spécifique, y compris CVC - en 2020	l/km	0.55	0.41	0.31	0.22
Biogaz : besoin en énergie spécifique, y compris CVC - en 2020	kg/km	0.48	0.35	0.26	0.20

Énergie utilisable de la charge de la batterie pour le fonctionnement	%	60%
Puissance de charge au cours du trajet en cas d'IMC	kW	120
Capacité de charge à la station de charge du terminus	kW	450
Capacité de charge à la station de charge au dépôt	kW	150
Réserve du véhicule	%	10%
Nombre de véhicules par point de charge au dépôt pour les bus rechargés au dépôt	nb	1
Nombre de véhicules par point de charge dans le dépôt pour les bus alimentés par biberonnage et IMC	nb	3
Nombre de redresseurs de courant par km de caténaire	nb/km	0.5
Durée de vie des véhicules	Années	12
Durée de vie des batteries	Années	6
Durée de vie de la caténaire	Années	30
Durée de vie des stations de charge au dépôt	Années	12
Durée de vie des stations de charge aux arrêts : raccordement électrique/installation (pondération : 60%)	Années	30
Durée de vie des stations de charge aux arrêts : station de charge (pondération : 40%)	Années	12
Durée de vie de la station de redresseurs	Années	30
Durée de vie du raccordement électrique au dépôt/ pour le redresseur de courant	Années	30
Efforts supplémentaires de personnel roulant pour les déplacements vers et depuis le dépôt par véhicule remplacé	min	20

*1): les valeurs de consommation d'énergie spécifique représentent des conditions « moyennes » – en fonction de la topographie, des besoins en chauffage/refroidissement, de la température ambiante, etc., elles peuvent varier légèrement.

A5.2 Hypothèses de coût des bus

		Bus articulé (18 m)							
	Unité	Bus diesel conventionnel (Euro VI)	Bus biodiesel (Euro VI)	Bus à biogaz	Bus électrique à batterie (recharge au dépôt)	Bus électrique à batterie (recharge combinée)	Bus électrique à batterie (biberonnage)	Trolleybus	Bus à pile à combustible (H2)
Année de référence	-	2020	2020	2020	2020	2020	2020	2020	2020
Durée de vie des bus	Ans	12	12	12	12	12	12	12	12
Distance annuelle	km/an	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000
Coûts des bus									
Achat	CHF	500'000	520'000	545'000	936'000	964'000	810'000	1'055'000	1'298'000
Coûts variables (énergie et maintenance)	CHF/an	107'875	161'627	155'377	69'990	76'655	76'655	77'988	196'087
Coûts énergétiques	CHF/km	0.57	1.11	1.05	0.30	0.30	0.30	0.30	1.40
Impôt sur les huiles minérales	CHF/km	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Taxe CO ₂	CHF/km	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Entretien	CHF/km	0.51	0.51	0.51	0.40	0.47	0.47	0.48	0.56
		Bus standard (12 m)							
	Unité	Bus diesel conventionnel (Euro VI)	Bus biodiesel (Euro VI)	Bus à biogaz	Bus électrique à batterie (recharge au dépôt)	Bus électrique à batterie (biberonnage)	Trolleybus	Bus à pile à combustible (H2)	
Année de référence	-	2020	2020	2020	2020	2020	2020	2020	
Durée de vie des bus	Ans	12	12	12	12	12	12	12	
Distance annuelle	km/an	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	
Coûts des bus									
Achat	CHF	350'000	370'000	395'000	744'000	625'000	825'000	1'043'000	
Coûts variables (énergie et maintenance)	CHF/an	80'378	120'155	114'130	52'500	57'500	58'500	142'242	
Coûts énergétiques	CHF/km	0.42	0.82	0.76	0.23	0.23	0.23	1.00	
Impôt sur les huiles minérales	CHF/km	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Taxe CO ₂	CHF/km	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Entretien	CHF/km	0.38	0.38	0.38	0.30	0.35	0.36	0.42	
		Bus midi (< 11 m)							
	Unité	Bus diesel conventionnel (Euro VI)	Bus biodiesel (Euro VI)	Bus à biogaz	Bus électrique à batterie (recharge au dépôt)	Bus électrique à batterie (biberonnage)	Bus à pile à combustible (H2)		
Année de référence	-	2020	2020	2020	2020	2020	2020		
Durée de vie des bus	Ans	12	12	12	12	12	12		
Parcours annuel	km/an	100000	100000	100000	100000	100000	100000		
Coûts des bus									
Achat	CHF	330'000	350'000	375'000	640'000	541'000	780'000		
Coûts variables (énergie et maintenance)	CHF/an	66'319	96'420	92'003	43'500	48'000	109'079		
Coûts énergétiques	CHF/km	0.32	0.62	0.58	0.17	0.17	0.71		
Impôt sur les huiles minérales	CHF/km	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
Taxe sur le CO ₂	CHF/km	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
Maintenance	CHF/km	0.34	0.34	0.34	0.27	0.32	0.38		

	Unité	Bus diesel conventionnel (Euro VI)	Bus biodiesel (Euro VI)	Bus à biogaz	Bus électrique batterie (recharge au dépôt)	Bus à pile à combustible (H2)
Année de référence	-	2020	2020	2020	2020	2020
Durée de vie des bus	Ans	8	8	8	8	8
Distance annuelle	km/an	55000	55000	55000	55000	55000
Coûts des bus						
Achat	CHF	100'000	115'000	133'750	301'000	437'500
Coûts variables (énergie et maintenance)	CHF/an	28'308	40'133	40'457	18'975	46'841
Coûts énergétiques	CHF/km	0.23	0.44	0.45	0.12	0.54
Impôt sur les huiles minérales	CHF/km	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Taxe CO ₂	CHF/km	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Maintenance	CHF/km	0.29	0.29	0.29	0.23	0.31

A5.3 Hypothèses de coûts pour l'infrastructure de recharge

Hypothèses pour les documents VAN : infrastructure de charge, coûts d'exploitation divers (de l'ancien onglet « Hypothèses_Coûts »)		Biberonnage conductif-dynamique (trolleybus à batterie)	Biberonnage conductif-statique	Recharge de dépôt conductive- statique	Pile à combustible
Investissement dans les caténaires	CHF/km	CHF 800'000			
Entretien des caténaires (km de route)	CHF/a/km	CHF 16'000			
Alimentation électrique avec transformateur et redresseur	CHF/km	CHF 600'000			
Entretien du redresseur	CHF/a/km	CHF 12'000			
Station de charge rapide (450 kW) investissement	CHF/pc	CHF 800'000			
Station de charge rapide (450 kW) entretien	CHF/a/pc	CHF 16'000			
Station de charge rapide (450 kW) coûts de raccordement	CHF/pc	CHF 0			
Point de charge au dépôt (150 kW) investissement	CHF/pc	CHF 85'000	CHF 85'000	CHF 85'000	
Point de charge au dépôt (150 kW) entretien	CHF/a/pc	CHF 4'250	CHF 4'250	CHF 4'250	
Frais de raccordement au dépôt 1'000 kW de charge connectée	CHF	CHF 210'000	CHF 210'000	CHF 210'000	
Frais de raccordement au dépôt 4'000 kW de charge connectée	CHF	CHF 650'000	CHF 650'000	CHF 650'000	
Station de ravitaillement d'hydrogène (y compris l'électrolyse) investissement	CHF/pc				CHF 2'000'000
Station de ravitaillement d'hydrogène (y compris l'électrolyse) entretien	CHF/a/pc				CHF 100'000
Station de ravitaillement d'hydrogène (y compris l'électrolyse) coûts de raccordement	CHF				CHF 100'000
Frais de personnel de conduite (pour les rotations de véhicules supplémentaires)	CHF/h	CHF 65.00	CHF 65.00	CHF 65.00	
Frais fixes des véhicules (pour les besoins supplémentaires en véhicules) (garage, assurance, entretien, etc.)	CHF/a/bus	CHF 30'000.00	CHF 30'000.00	CHF 30'000.00	

A6 Hypothèses pour le bilan écologique

A6.1. Masses de véhicules

		Bus articulé (18 m)							
	Unité	Bus diesel conventionnel (Euro VI)	Bus biodiesel (Euro VI)	Bus à biogaz	Bus électrique à batterie (recharge au dépôt)	Bus électrique à batterie (recharge combinée)	Bus électrique à batterie (biberonnage)	Trolleybus	Bus à pile à combustible (H2)
Année de référence	-	2020	2020	2020	2020	2020	2020	2020	2020
Durée de vie des bus	Ans	12	12	12	12	12	12	12	12
Distance annuelle	km/an	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000
Poids total du bus à vide		18000	18000	18000	21760	21430	19180	18867.5	19524
Poids de la structure	kg	16800	16800	16800	16800	16800	16800	16800	16800
Poids de base des organes de transmission	kg	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
Mise à l'échelle poids transmission	%	100%	100%	100%	80%	90%	90%	90%	80%
Type de batterie		None	None	None	NMC	NMC	Titanate	Titanate	Titanate
Poids de la batterie (uniquement pour info.)	kg	0	0	0	4000	3500	1250	937.5	125
Taille de la batterie (kWh) (pour info.)	kWh	0	0	0	480	420	100	75	10
Masse du pantographe	kg	0	0	0	0	50	50	50	0
Puissance de la pile à combustible	kW	0	0	0	0	0	0	0	180
Masse de la pile à combustible	kg/kW	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
Capacité de stockage H ₂	kg H ₂	0	0	0	0	0	0	0	70
Densité énergétique ravitaillement en H ₂	kg/kg H ₂	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5

		Bus standard (12 m)							
	Unité	Bus diesel conventionnel (Euro VI)	Bus biodiesel (Euro VI)	Bus à biogaz	Bus électrique à batterie (recharge au dépôt)	Bus électrique à batterie (biberonnage)	Trolleybus	Bus à pile à combustible (H2)	
Année de référence	-	2020	2020	2020	2020	2020	2020	2020	
Durée de vie des bus	Ans	12	12	12	12	12	12	12	
Distance annuelle	km/an	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	
Poids total du bus à vide		11000	11000	11000	14300	11887.5	11887.5	12057.5	
Poids de la structure	kg	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	
Poids de base des organes de transmission	kg	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	
Mise à l'échelle poids transmission	%	100%	100%	100%	80%	90%	90%	80%	
Type de batterie		None	None	None	NMC	Titanate	Titanate	Titanate	
Poids de la batterie (pour info.)	kg	0	0	0	3500	937.5	937.5	125	
Taille de la batterie (kWh) (pour info.)	kWh	0	0	0	420	75	75	10	
Masse du pantographe	kg	0	0	0	0	50	50	0	
Puissance de la pile à combustible	kW	0	0	0	0	0	0	150	
Masse de la pile à combustible	kg/kW	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	
Capacité de stockage H ₂	kg H ₂	0	0	0	0	0	0	45	
Densité énergétique ravitaillement en H ₂	kg/kg H ₂	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5	

		Bus midi (< 11 m)					
	Unité	Bus diesel conventionnel (Euro VI)	Bus biodiesel (Euro VI)	Bus à biogaz	Bus électrique à batterie (recharge au dépôt)	Bus électrique à batterie (biberonnage)	Bus à pile à combustible (H2)
Année de référence	-	2020	2020	2020	2020	2020	2020
Durée de vie des bus	Ans	12	12	12	12	12	12
Distance annuelle	km/an	100000	100000	100000	100000	100000	100000
Poids total du bus à vide		8000	8000	8000	10340	8782.5	8766
Poids de la structure	kg	7200	7200	7200	7200	7200	7200
Poids de base des organes de transmission	kg		800	800	800	800	800
	800						
Mise à l'échelle poids transmission	%	100%	100%	100%	80%	90%	80%
Type de batterie		None	None	None	NMC	Titanate	Titanate
Poids de la batterie (pour info.)	kg	0	0	0	2500	812.5	125
Taille de la batterie (kWh) (pour info.)	kWh	0	0	0	300	65	10
Masse du pantographe	kg	0	0	0	0	50	0
Puissance de la pile à combustible	kW	0	0	0	0	0	120
Masse de la pile à combustible	kg/kW	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
Capacité de stockage H ₂	kg H ₂	0	0	0	0	0	30
Densité énergétique ravitaillement en H ₂	kg/kg H ₂	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5

		Minibus (<9 m)				
	Unité	Bus diesel conventionnel (Euro VI)	Bus biodiesel (Euro VI)	Bus à biogaz	Bus électrique à batterie (recharge au dépôt)	Bus à pile à combustible (H2)
Année de référence	-	2020	2020	2020	2020	2020
Durée de vie des bus	Ans	8	8	8	8	8
Distance annuelle	km/an	55000	55000	55000	55000	55000
Poids total du bus à vide		4800	4800	4800	6180	5374.5
Poids de la structure	kg	4200	4200	4200	4200	4200
Poids de base des organes de transmission	kg		600	600	600	600
	600					
Mise à l'échelle poids transmission	%	100%	100%	100%	80%	80%
Type de batterie		None	None	None	NMC	Titanate
Poids de la batterie (pour info.)	kg	0	0	0	1500	93.75
Taille de la batterie (kWh) (pour info.)	kWh	0	0	0	180	7.5
Masse du pantographe	kg	0	0	0	0	0
Puissance de la pile à combustible	kW	0	0	0	0	90
Masse de la pile à combustible	kg/kW	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
Capacité de stockage H ₂	kg H ₂	0	0	0	0	22.5
Densité énergétique ravitaillement H ₂	kg/kg H ₂	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5

A6.2 Besoin en énergie

Bus articulé (18 m)

		Bus diesel conventionnel (Euro VI)	Bus biodiesel (Euro VI)	Bus à biogaz	Bus électrique à batterie (recharge au dépôt)	Bus électrique à batterie (recharge combinée)	Bus électrique à batterie (biberonnage)	Trolleybus	Bus à pile à combustible (H2)
Année de référence	Unité	2020	2020	2020	2020	2020	2020	2020	2020
Besoin en énergie									
Besoin en énergie (sans électricité)	kWh/km	5.00	5.00	6.04	0.00	0.00	0.00	0.00	4.15
Besoin en énergie (pour info.)	l/km	0.50	0.55	0.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13
Besoin en énergie (part électricité)	kWh/km	0.00	0.00	0.00	2.00	2.00	2.00	2.00	0.00
Part d'énergie (base km)									
Diesel	%	90%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Biodiesel	%	10%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Gaz	%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Biogaz	%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%
Électricité	%	0%	0%	0%	100%	100%	100%	100%	0%
Hydrogène	%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%

Bus standard (12 m)

		Bus diesel conventionnel (Euro VI)	Bus biodiesel (Euro VI)	Bus à biogaz	Bus électrique à batterie (recharge au dépôt)	Bus électrique à batterie (biberonnage)	Trolleybus	Bus à pile à combustible (H2)
Année de référence	Unité	2020	2020	2020	2020	2020	2020	2020
Besoin en énergie								
Besoin en énergie (sans électricité)	kWh/km	3.70	3.70	4.39	0.00	0.00	0.00	2.97
Besoin en énergie (pour info.)	l/km	0.37	0.41	0.35	0.00	0.00	0.00	0.09
Besoin en énergie (part électricité)	kWh/km	0.00	0.00	0.00	1.50	1.50	1.50	0.00
Part d'énergie (base km)								
Diesel	%	90%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Biodiesel	%	10%	100%	0%	0%	0%	0%	0%
Gaz	%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Biogaz	%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%
Électricité	%	0%	0%	0%	100%	100%	100%	0%
Hydrogène	%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%

		Bus midi (< 11 m)					
	Unité	Bus diesel conventionnel (Euro VI)	Bus biodiesel (Euro VI)	Bus à biogaz	Bus électrique à batterie (recharge au dépôt)	Bus électrique à batterie (biberonnage)	Bus à pile à combustible (H2)
Année de référence	-	2020	2020	2020	2020	2020	2020
Besoin en énergie							
Besoin en énergie (sans électricité)	kWh/km	2.80	2.80	3.34	0.00	0.00	2.11
Besoin en énergie (pour info.)	l/km	0.28	0.31	0.26	0.00	0.00	0.06
Besoin en énergie (part électricité)	kWh/km	0.00	0.00	0.00	1.10	1.10	0.00
Part d'énergie (base km)							
Diesel	%	90%	0%	0%	0%	0%	0%
Biodiesel	%	10%	100%	0%	0%	0%	0%
Gaz	%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Biogaz	%	0%	0%	100%	0%	0%	0%
Électricité	%	0%	0%	0%	100%	100%	0%
Hydrogène	%	0%	0%	0%	0%	0%	100%

		Minibus (<9 m)				
	Unité	Bus diesel conventionnel (Euro VI)	Bus biodiesel (Euro VI)	Bus à biogaz	Bus électrique à batterie (recharge au dépôt)	Bus à pile à combustible (H2)
Année de référence	-	2020	2020	2020	2020	2020
Besoin en énergie						
Besoin en énergie (sans électricité)	kWh/km	2.00	2.00	2.60	0.00	1.59
Besoin en énergie (pour info.)	l/km	0.20	0.22	0.20	0.00	0.05
Besoin en énergie (part électricité)	kWh/km	0.00	0.00	0.00	0.80	0.00
Part d'énergie (base km)						
Diesel	%	90%	0%	0%	0%	0%
Biodiesel	%	10%	100%	0%	0%	0%
Gaz	%	0%	0%	0%	0%	0%
Biogaz	%	0%	0%	100%	0%	0%
Électricité	%	0%	0%	0%	100%	0%
Hydrogène	%	0%	0%	0%	0%	100%

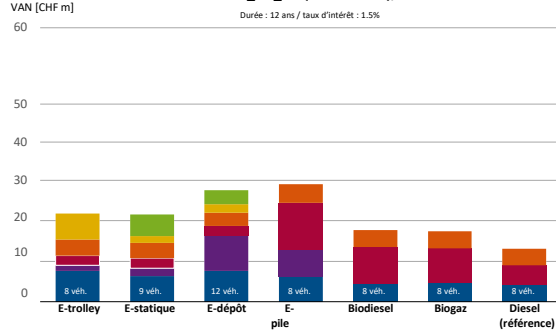
A6.3 Facteurs d'émission

		Climate change		Source
		(IPCC 2013) GWP	Cumulative Energy	
		100	demand total	
		kg CO2 eq	MJ	
Lithium ion battery production and end of life	kg system	10.8	170	Cox et al. 2020, Zurich Project, Carculator Biodiesel
(from used cooking oil)	kg	0.41	6.20	Cozzolino F. (2018) Life Cycle assessment of Biofu
Diesel	kg	0.520153	55.019156	Ecoinvent 3.6
CNG	kg	0.498106	58.57161	Ecoinvent 3.6
Biogaz	kg	2.291010602	13.226	Ecoinvent 3.6
Hydrogen (from renewable electricity)	kg	2.85	265	Cox and Bauer 2017
Electricity (Swiss consumption mix)	kWh	0.105905	7.953119	Ecoinvent 3.6
Electricity)(Swiss label certified mix)	kWh	0.020432	4.56843	Ecoinvent 3.6
Bus (without battery, FC or powertrain) production and EoL	kg	6.392755	90.882219	Ecoinvent 3.6
Fuel cell system	kg	10.1	149.1	Cox and Bauer 2017, Simons and Bauer 2015
Bus electric powertrain production and EoL	kg	19.517397	263.354057	Ecoinvent 3.6
Bus conventional powertrain production and EoL	kg	8.090777	111.304879	Ecoinvent 3.6
Hydrogen tank (350 Bar)	kg	30.268	556.62	Cox and Bauer 2017
Pantograph production and EoL	kg	4	60	Ecoinvent 3.6
Bus powertrain production impacts Bus diesel conventionnel (Euro VI)	kg	8.090777	111.304879	Ecoinvent 3.6
Bus biodiesel (Euro VI)	kg	8.090777	111.304879	Ecoinvent 3.6
Bus au gaz (CNG/LNG)	kg	8.090777	111.304879	Ecoinvent 3.6
Bus à biogaz	kg	8.090777	111.304879	Ecoinvent 3.6
Bus hybride diesel (Euro VI)	kg	13.804087	187.329468	Ecoinvent 3.6
Bus hybride biodiesel (Euro VI)	kg	13.804087	187.329468	Ecoinvent 3.6
Bus électrique à batterie (recharge au dépôt)	kg	19.517397	263.354057	Ecoinvent 3.6
Bus électrique à batterie (biberonnage)	kg	19.517397	263.354057	Ecoinvent 3.6
Bus électrique à batterie (recharge combinée)	kg	19.517397	263.354057	Ecoinvent 3.6
Trolleybus	kg	19.517397	263.354057	Ecoinvent 3.6
Bus hybride plug-in (diesel/électrique)	kg	13.804087	187.329468	Ecoinvent 3.6
Bus hybride plug-in (gaz/électrique)	kg	13.804087	187.329468	Ecoinvent 3.6
Bus à pile à combustible (H2)	kg	19.517397	263.354057	Ecoinvent 3.6
Bus hybride plug-in (H2/électrique)	kg	19.517397	263.354057	Ecoinvent 3.6
Émissions de gaz à effet de serre provenant de la production d'électricité : Production d'électricité :				
Mix de consommation suisse	kWh	0.11	7.95	Ecoinvent 3.6
Mix renouvelable suisse	kWh	0.02	4.57	Ecoinvent 3.6
Importation d'Europe	kWh	0.41	10.61	Ecoinvent 3.6(ENTSO-E)
Éolien offshore	kWh	0.03	4.59	
Éolien (CH)	kWh	0.03	4.66	
Solaire PV	kWh	0.08	5.34	
Biomasse (bois)	kWh	0.08	17.18	Ecoinvent 3.6. Il est tenu compte de la
Biogaz	kWh	0.30	1.08	production d'électricité ainsi que du
Gaz naturel CHP	kWh	0.68	10.81	transport et de la transformation en basse tension
Centrale électrique à cycle combiné au gaz naturel	kWh	0.43	7.86	conformément à ecoinvent
			3.6	
Énergie hydraulique (barrage)	kWh	0.01	4.28	
Énergie hydraulique (centrale au fil de l'eau)	kWh	0.01	4.26	
Nucléaire	kWh	0.02	14.82	
Production d'hydrogène				
reformage à la vapeur	kWh H ₂	0.33	184.00	Bhandari 2012
(fossile)				
Électrolyse	kWh H ₂			
Émissions de GES de la production de l'électrolyseur	kWh H ₂	0.00201	0.02983	approximation

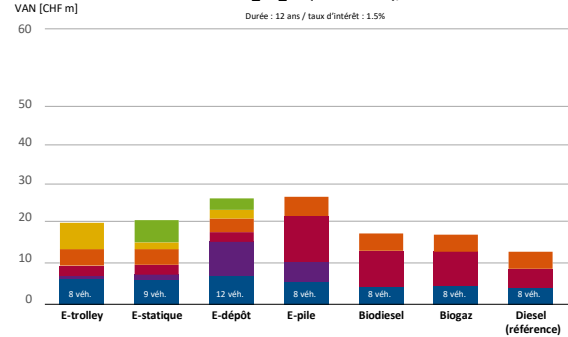
A7 Résultats détaillés sur le calcul des coûts

Étude de cas trafic local/bus articulé/cadence intégrale

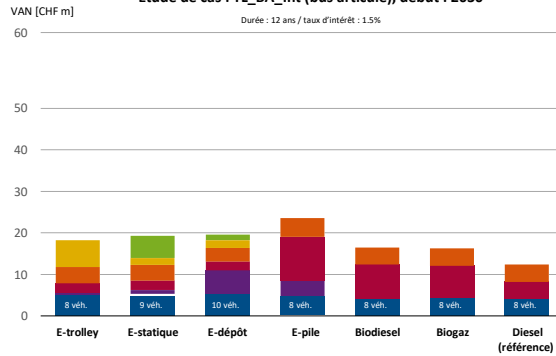
Étude de cas : TL_BA_Int (bus articulé), début : 2021



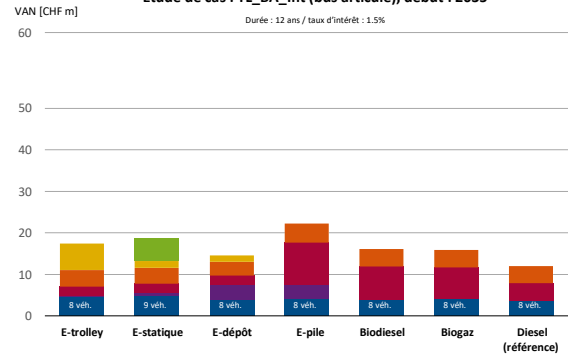
Étude de cas : TL_BA_Int (bus articulé), début : 2025



Étude de cas : TL_BA_Int (bus articulé), début : 2030



Étude de cas : TL_BA_Int (bus articulé), début : 2035



■ Acquisition de véhicules

■ Véhicules - entretien

■ Acquisition de batteries

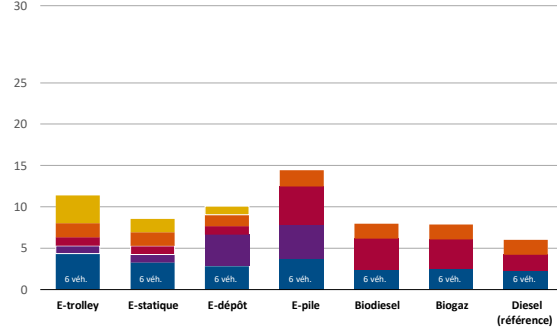
■ Infrastructure de recharge (investissement et entretien)

■ Véhicules - énergie

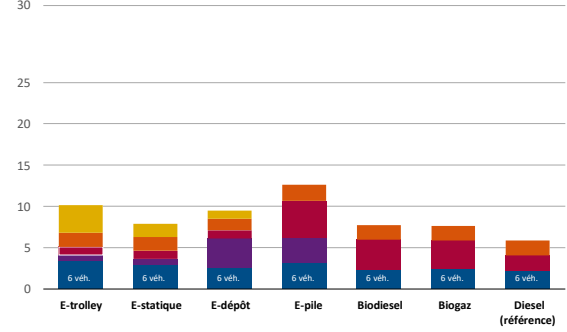
■ Frais d'exploitation suppl. (processus de recharge)

Étude de cas trafic local/bus standard/cadence densifiée aux HDP

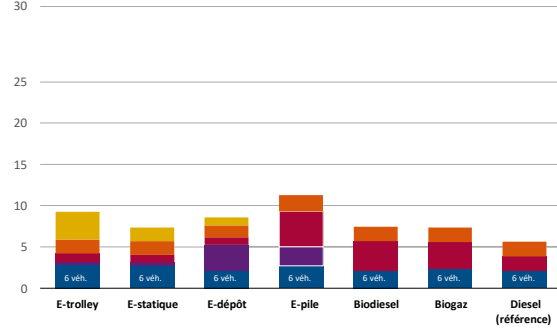
Étude de cas : TL_BS_D-HDP (bus standard), début : 2021
VAN [CHF m] Durée : 12 ans / taux d'intérêt : 1.5%



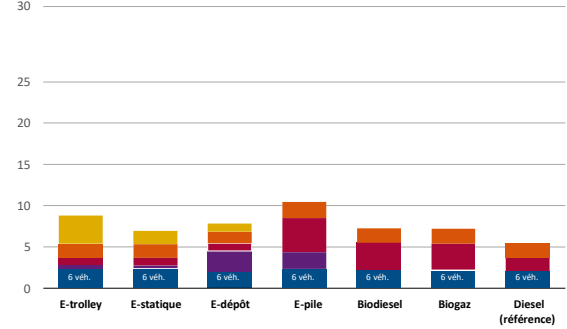
Étude de cas : TL_BS_D-HDP (bus standard), début : 2025
VAN [CHF m] Durée : 12 ans / taux d'intérêt : 1.5%



Étude de cas : TL_BS_D-HDP (bus standard), début : 2030
VAN [CHF m] Durée : 12 ans / taux d'intérêt : 1.5%



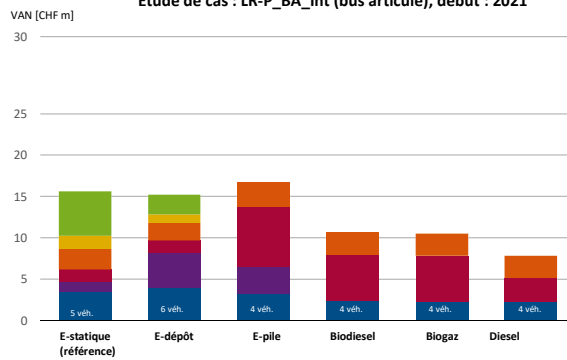
Étude de cas : TL_BS_D-HDP (bus standard), début : 2035
VAN [CHF m] Durée : 12 ans / taux d'intérêt : 1.5%



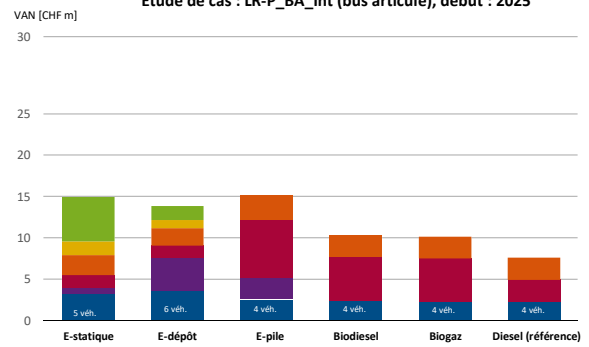
■ Acquisition de véhicules
■ Acquisition de batteries
■ Véhicules – énergie
■ Véhicules – entretien
■ Infrastructure de recharge (investissement et entretien)
■ Frais d'exploitation suppl. (processus de recharge)

Étude de cas trafic régional Plateau/bus articulé/cadence intégrale

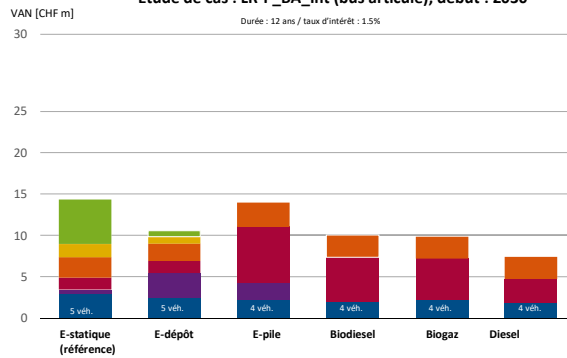
Étude de cas : LR-P_BA_Int (bus articulé), début : 2021



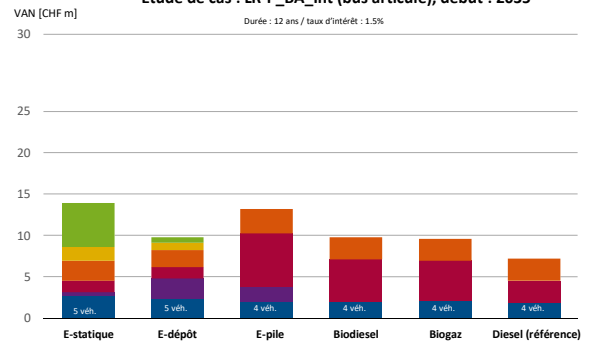
Étude de cas : LR-P_BA_Int (bus articulé), début : 2025



Étude de cas : LR-P_BA_Int (bus articulé), début : 2030



Étude de cas : LR-P_BA_Int (bus articulé), début : 2035



■ Acquisition de véhicules

■ Acquisition de batteries

■ Véhicules – énergie

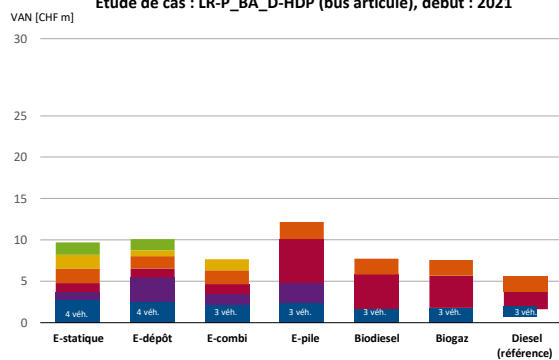
■ Véhicules – entretien

■ Infrastructure de recharge
(investissement et
entretien)

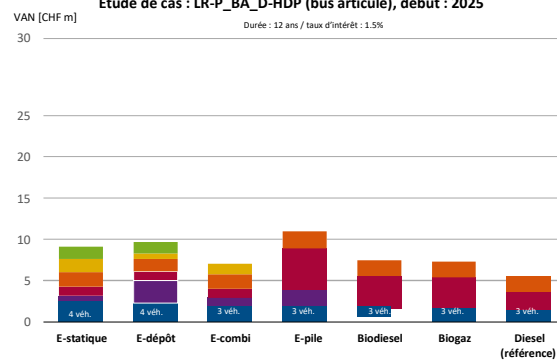
■ Frais d'exploitation suppl. (processus de recharge)

Étude de cas trafic régional Plateau/bus articulé/cadence intensifiée aux HDP

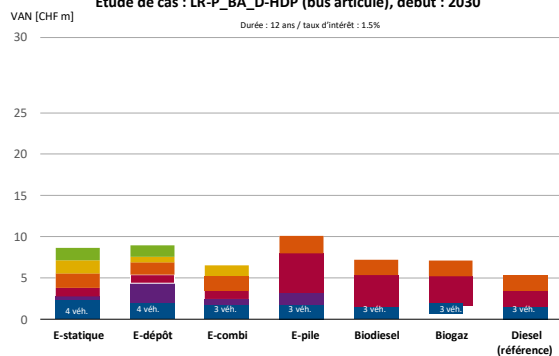
Étude de cas : LR-P_BA_D-HDP (bus articulé), début : 2021



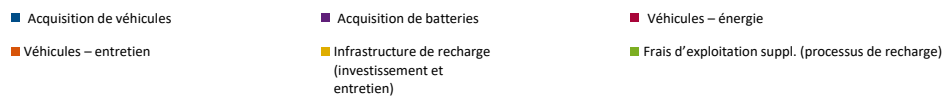
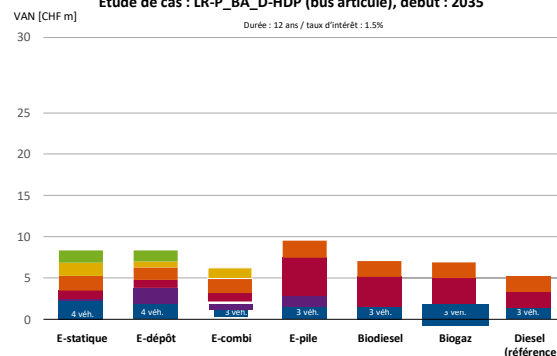
Étude de cas : LR-P_BA_D-HDP (bus articulé), début : 2025



Étude de cas : LR-P_BA_D-HDP (bus articulé), début : 2030

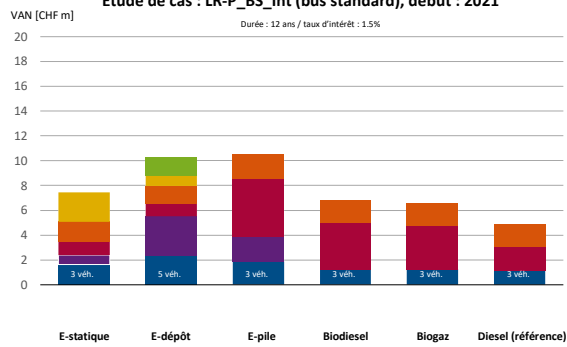


Étude de cas : LR-P_BA_D-HDP (bus articulé), début : 2035

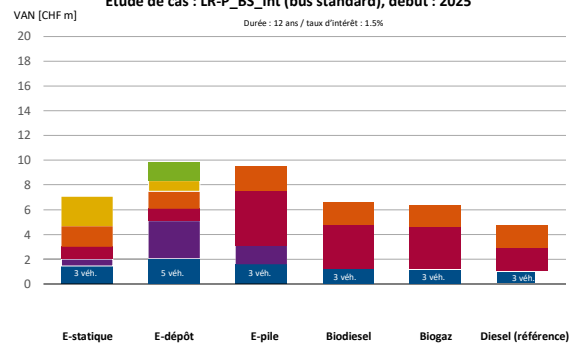


Étude de cas trafic régional Plateau/bus standard/cadence intégrale

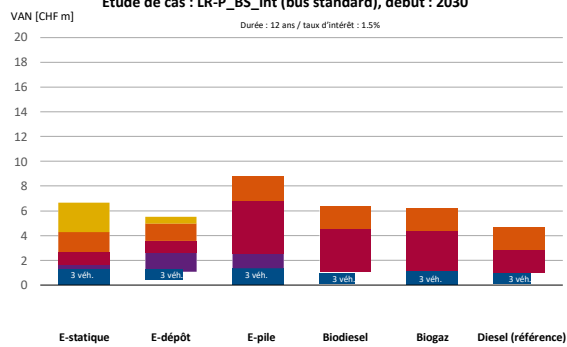
Étude de cas : LR-P_BS_Int (bus standard), début : 2021



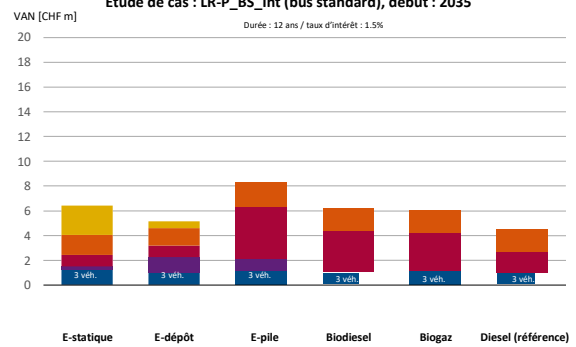
Étude de cas : LR-P_BS_Int (bus standard), début : 2025



Étude de cas : LR-P_BS_Int (bus standard), début : 2030



Étude de cas : LR-P_BS_Int (bus standard), début : 2035



■ Acquisition de véhicules

■ Acquisition de batteries

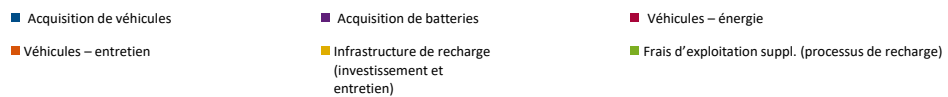
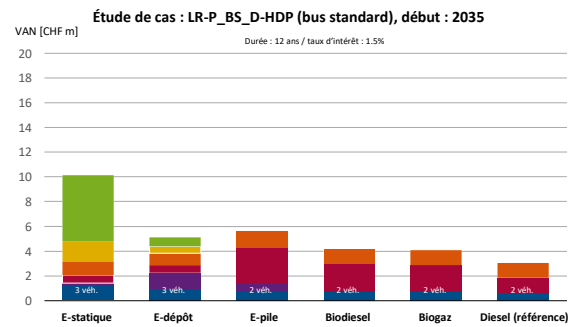
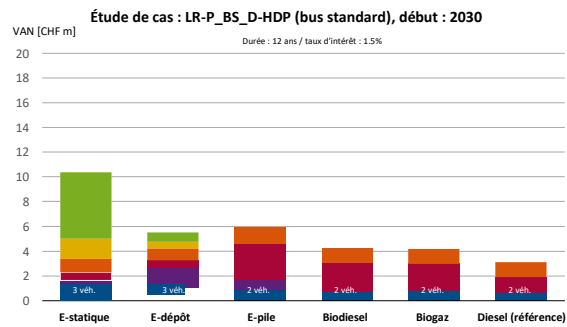
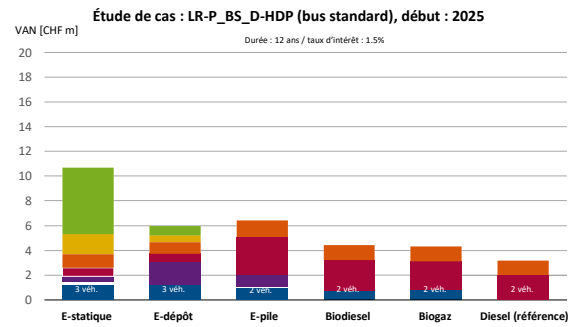
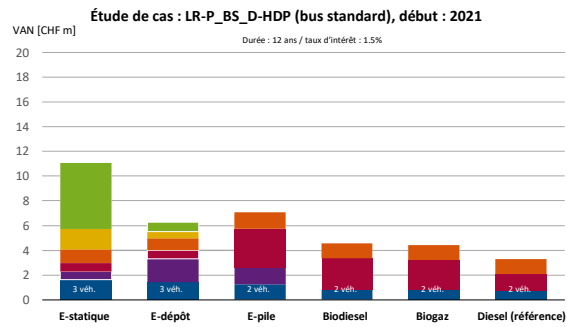
■ Véhicules - énergie

■ Véhicules - entretien

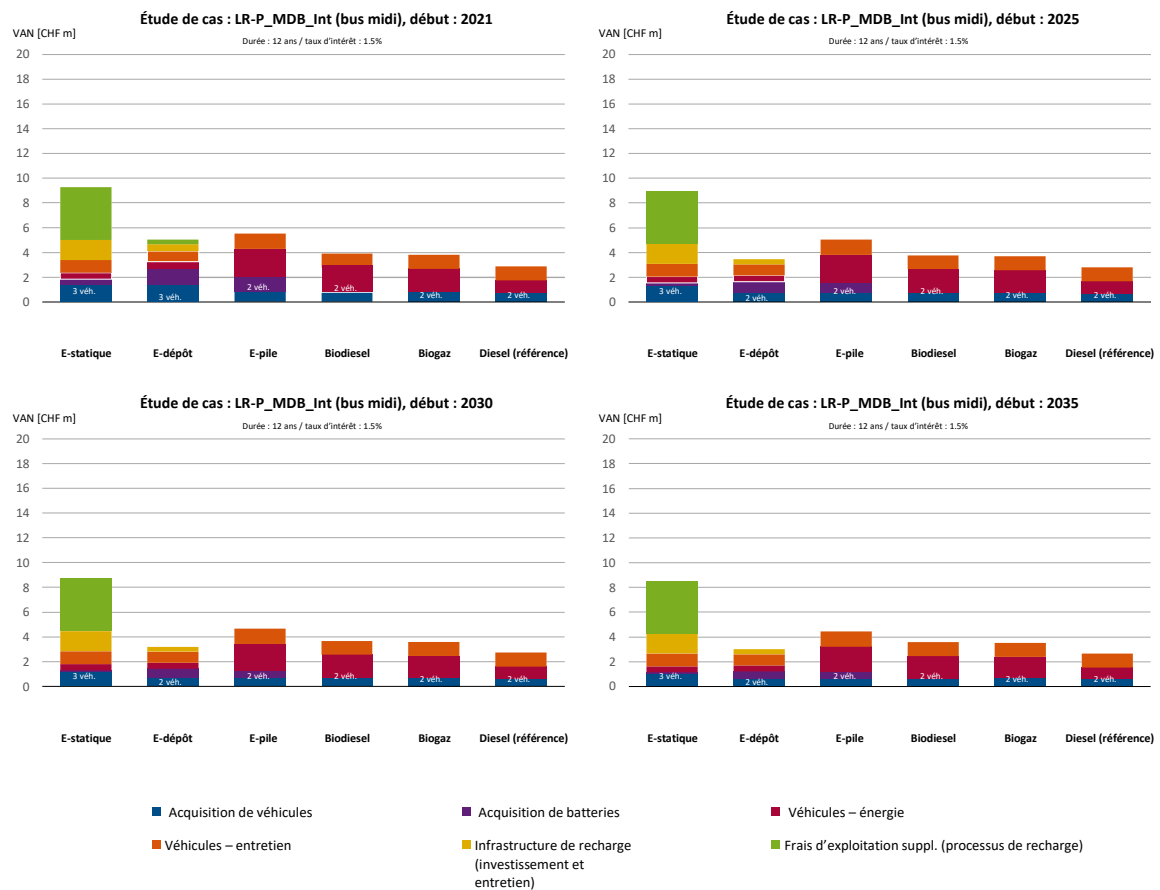
■ Infrastructure de recharge
(investissement et
entretien)

■ Frais d'exploitation suppl. (processus de recharge)

Étude de cas trafic régional Plateau/bus standard/cadence intensifiée aux HDP

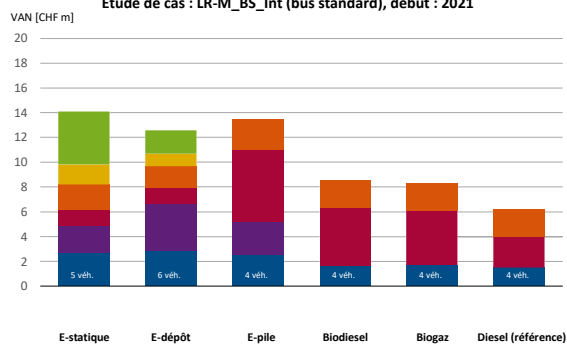


Étude de cas trafic régional Plateau/bus midi/cadence intégrale

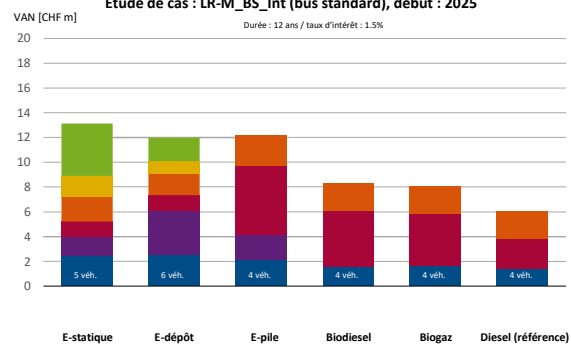


Étude de cas trafic régional région de montagne/bus standard/cadence intégrale

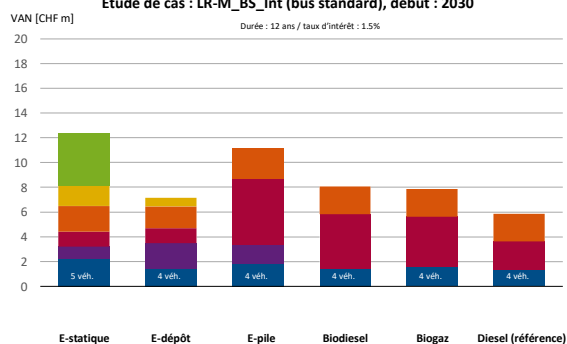
Étude de cas : LR-M_BS_Int (bus standard), début : 2021



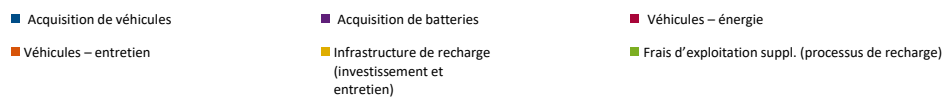
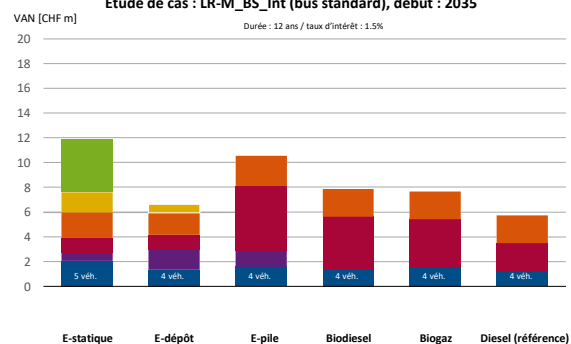
Étude de cas : LR-M_BS_Int (bus standard), début : 2025



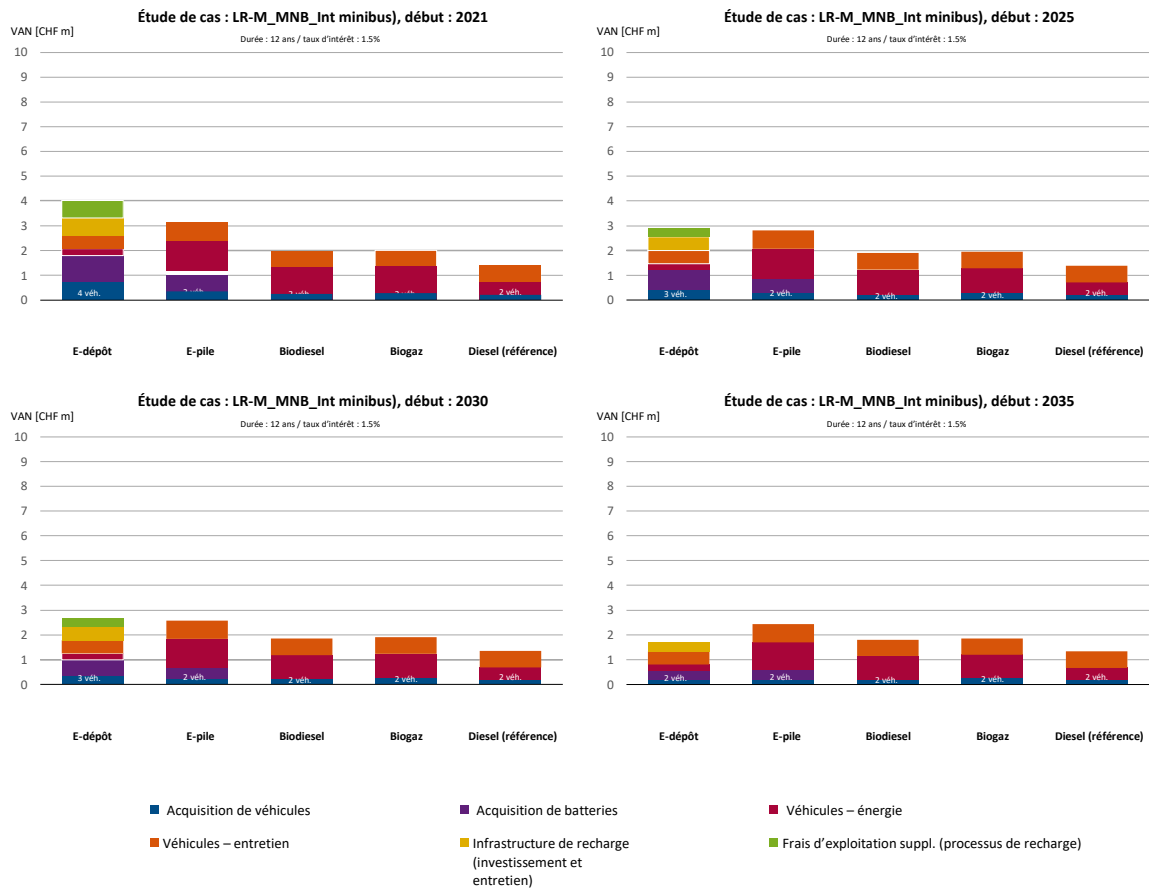
Étude de cas : LR-M_BS_Int (bus standard), début : 2030



Étude de cas : LR-M_BS_Int (bus standard), début : 2035



Étude de cas trafic régional région de montagne/minibus/cadence intégrale



A8 Hypothèses sur le mix de bus à batteries pour l'extrapolation des coûts supplémentaires

TRV – Scénario « maximal »

Horizon temporel 2021/2025						
	30%		15%		30%	
	10%					
	Bus articulé		Bus standard		Bus midi	
	Trolley à batterie		Trolley à batterie		Trolley à batterie	
Option de propulsion	Bus alimentés par biberonnage statique		Bus alimentés par biberonnage statique		Bus alimentés par biberonnage statique	
Conditions cadres	Rotations supplémentaires		Rotations supplémentaires		Rotations supplémentaires	
	oui non		oui non		oui non	
Coûts supplémentaires relatifs (résultats des études de cas)	0%	0%	30%	15%	30%	10%
Hypothèse de la part de véhicules par option			15%	15%	50%	20%
Coûts supplémentaires moyens par véhicule					24%	
	30%		15%		30%	
	10%					
	Bus standard		Bus midi		Bus midi	
	Trolley à batterie		Trolley à batterie		Trolley à batterie	
Option de propulsion	Bus alimentés par biberonnage statique		Bus alimentés par biberonnage statique		Bus alimentés par biberonnage statique	
Conditions cadres	Rotations supplémentaires		Rotations supplémentaires		Rotations supplémentaires	
	oui non		oui non		oui non	
Coûts supplémentaires relatifs (résultats des études de cas)	0%	0%	30%	15%	30%	10%
Hypothèse de la part de véhicules par option			15%	15%	50%	20%
Coûts supplémentaires moyens par véhicule					24%	
	65%		15%		25%	
	10%					
	Bus midi		Bus midi		Bus midi	
	Trolley à batterie		Trolley à batterie		Trolley à batterie	
Option de propulsion	Bus alimentés par biberonnage statique		Bus alimentés par biberonnage statique		Bus alimentés par biberonnage statique	
Conditions cadres	Rotations supplémentaires		Rotations supplémentaires		Rotations supplémentaires	
	oui non		oui non		oui non	
Coûts supplémentaires relatifs (résultats des études de cas)	0%	0%	65%	15%	25%	10%
Hypothèse de la part de véhicules par option			0%	15%	60%	25%
Coûts supplémentaires moyens par véhicule					20%	
	30%		15%		30%	
	15%					
	Minibus		Minibus		Minibus	
	Trolley à batterie		Trolley à batterie		Trolley à batterie	
Option de propulsion	Bus alimentés par biberonnage statique		Bus alimentés par biberonnage statique		Bus alimentés par biberonnage statique	
Conditions cadres	Rotations supplémentaires		Rotations supplémentaires		Rotations supplémentaires	
	oui non		oui non		oui non	
Coûts supplémentaires relatifs (résultats des études de cas)	0%	0%	0%	0%	30%	15%
Hypothèse de la part de véhicules par option					60%	40%
Coûts supplémentaires moyens par véhicule					24%	
Horizon temporel 2030/2035						
	30%		7%		20%	
	7%					
	Bus articulé		Bus standard		Bus midi	
	Trolley à batterie		Trolley à batterie		Trolley à batterie	
Option de propulsion	Bus alimentés par biberonnage statique		Bus alimentés par biberonnage statique		Bus alimentés par biberonnage statique	
Conditions cadres	Rotations supplémentaires		Rotations supplémentaires		Rotations supplémentaires	
	oui non		oui non		oui non	
Coûts supplémentaires relatifs (résultats des études de cas)	0%	0%	30%	7%	20%	7%
Hypothèse de la part de véhicules par option				20%	15%	65%
Coûts supplémentaires moyens par véhicule					9%	
	20%		7%		20%	
	7%					
	Bus standard		Bus midi		Bus midi	
	Trolley à batterie		Trolley à batterie		Trolley à batterie	
Option de propulsion	Bus alimentés par biberonnage statique		Bus alimentés par biberonnage statique		Bus alimentés par biberonnage statique	
Conditions cadres	Rotations supplémentaires		Rotations supplémentaires		Rotations supplémentaires	
	oui non		oui non		oui non	
Coûts supplémentaires relatifs (résultats des études de cas)	0%	0%	20%	7%	20%	7%
Hypothèse de la part de véhicules par option				20%	15%	65%
Coûts supplémentaires moyens par véhicule					9%	
	65%		25%		20%	
	5%					
	Bus midi		Bus midi		Bus midi	
	Trolley à batterie		Trolley à batterie		Trolley à batterie	
Option de propulsion	Bus alimentés par biberonnage statique		Bus alimentés par biberonnage statique		Bus alimentés par biberonnage statique	
Conditions cadres	Rotations supplémentaires		Rotations supplémentaires		Rotations supplémentaires	
	oui non		oui non		oui non	
Coûts supplémentaires relatifs (résultats des études de cas)	0%	0%	65%	25%	20%	5%
Hypothèse de la part de véhicules par option			0%	5%	15%	80%
Coûts supplémentaires moyens par véhicule					8%	
	25%		8%			
	8%					
	Minibus		Minibus		Minibus	
	Trolley à batterie		Trolley à batterie		Trolley à batterie	
Option de propulsion	Bus alimentés par biberonnage statique		Bus alimentés par biberonnage statique		Bus alimentés par biberonnage statique	
Conditions cadres	Rotations supplémentaires		Rotations supplémentaires		Rotations supplémentaires	
	oui non		oui non		oui non	
Coûts supplémentaires relatifs (résultats des études de cas)	0%	0%	0%	0%	25%	8%
Part de véhicules					10%	90%
Coûts supplémentaires moyens par véhicule					10%	

TRV – Scénario « réaliste »

Horizon temporel 2021/2025						
	Bus articulé		30%	15%	30%	10%
Option d'entraînement	Trolley à batterie		Bus alimentés par biberonnage statique		Bus rechargés au dépôt	
Conditions cadres			Rotations supplémentaires		Bus supplémentaires	
			oui	non	oui	non
Coûts supplémentaires relatifs (résultats des études de cas)	0%	0%	30%	15%	30%	10%
Hypothèse de la part de véhicules par option			0%	30%	0%	70%
Coûts supplémentaires moyens par véhicule						12%

	Bus standard		30%	15%	30%	10%
Option d'entraînement	Trolley à batterie		Bus alimentés par biberonnage statique		Bus rechargés au dépôt	
Conditions cadres			Rotations supplémentaires		Bus supplémentaires	
			oui	non	oui	non
Coûts supplémentaires relatifs (résultats des études de cas)	0%	0%	30%	15%	30%	10%
Hypothèse de la part de véhicules par option			0%	30%	0%	70%
Coûts supplémentaires moyens par véhicule						12%

	Bus midi		65%	15%	25%	10%
Option d'entraînement	Trolley à batterie		Bus alimentés par biberonnage statique		Bus rechargés au dépôt	
Conditions cadres			Rotations supplémentaires		Bus supplémentaires	
			oui	non	oui	non
Coûts supplémentaires relatifs (résultats des études de cas)	0%	0%	65%	15%	25%	10%
Hypothèse de la part de véhicules par option			0%	30%	0%	70%
Coûts supplémentaires moyens par véhicule						12%

	Minibus		30%	15%		
Option d'entraînement	Trolley à batterie		Bus alimentés par biberonnage statique		Bus rechargés au dépôt	
Conditions cadres					Bus supplémentaires	
					oui	non
Coûts supplémentaires relatifs (résultats des études de cas)	0%	0%	0%	0%	30%	15%
Hypothèse de la part de véhicules par option					0%	100%
Coûts supplémentaires moyens par véhicule						15%

Horizon temporel 2030/2035						
	Bus articulé		30%	7%	20%	7%
Option d'entraînement	Trolley à batterie		Bus alimentés par biberonnage statique		Bus rechargés au dépôt	
Conditions cadres			Rotations supplémentaires		Bus supplémentaires	
			oui	non	oui	non
Coûts supplémentaires relatifs (résultats des études de cas)	0%	0%	30%	7%	20%	7%
Hypothèse de la part de véhicules par option				20%	0%	80%
Coûts supplémentaires moyens par véhicule						7%

	Bus standard		20%	7%	20%	7%
Option d'entraînement	Trolley à batterie		Bus alimentés par biberonnage statique		Bus rechargés au dépôt	
Conditions cadres			Rotations supplémentaires		Bus supplémentaires	
			oui	non	oui	non
Coûts supplémentaires relatifs (résultats des études de cas)	0%	0%	20%	7%	20%	7%
Hypothèse de la part de véhicules par option				20%	0%	80%
Coûts supplémentaires moyens par véhicule						7%

	Bus midi		65%	25%	20%	5%
Option d'entraînement	Trolley à batterie		Bus alimentés par biberonnage statique		Bus rechargés au dépôt	
Conditions cadres			Rotations supplémentaires		Bus supplémentaires	
			oui	non	oui	non
Coûts supplémentaires relatifs (résultats des études de cas)	0%	0%	65%	25%	20%	5%
Hypothèse de la part de véhicules par option			0%	0%	0%	100%
Coûts supplémentaires moyens par véhicule						5%

	Minibus		25%	8%		
Option d'entraînement	Trolley à batterie		Bus alimentés par biberonnage statique		Bus rechargés au dépôt	
Conditions cadres					Bus supplémentaires	
					oui	non
Coûts supplémentaires relatifs (résultats des études de cas)	0%	0%	0%	0%	25%	8%
Hypothèse de la part de véhicules par option					0%	100%
Coûts supplémentaires moyens par véhicule						8%

Trafic local – Scénario « maximal »

Horizon temporel 2021/2025							
Frais supplémentaires avec remboursement de l'impôt sur les huiles minérales		20%	15%	20%	15%	35%	20%
	Bus articulé						
Option de propulsion	Trolley à batterie			Bus alimentés par biberonnage statique		Bus rechargés au dépôt	
Conditions cadres	Part du trajet avec nouvelle caténaire			Rotations supplémentaires		Bus supplémentaires	
	30%	15%	oui	non	oui	non	
Coûts supplémentaires relatifs (résultats des études de cas)	20%	15%	20%	15%	35%	20%	
Hypothèse de la part de véhicules par option	5%	5%	15%	15%	30%	30%	
Coûts supplémentaires moyens par véhicule							24%

Frais supplémentaires avec remboursement de l'impôt sur les huiles minérales							
		25%	20%	20%	15%	35%	20%
	Bus standard						
Option de propulsion	Trolley à batterie			Bus alimentés par biberonnage statique		Bus rechargés au dépôt	
Conditions cadres	Part du trajet avec nouvelle caténaire			Rotations supplémentaires		Bus supplémentaires	
	30%	15%	oui	non	oui	non	
Coûts supplémentaires relatifs (résultats des études de cas)	25%	20%	20%	15%	35%	20%	
Hypothèse de la part de véhicules par option	0%	0%	20%	20%	30%	30%	
Coûts supplémentaires moyens par véhicule							24%

Frais supplémentaires avec remboursement de l'impôt sur les huiles minérales							
		65%		15%	25%	10%	
	Bus midi						
Option de propulsion	Trolley à batterie			Bus alimentés par biberonnage statique		Bus rechargés au dépôt	
Conditions cadres				Rotations supplémentaires		Bus supplémentaires	
				oui	non	oui	non
Coûts supplémentaires relatifs (résultats des études de cas)	0%	0%	65%	15%	25%	10%	
Hypothèse de la part de véhicules par option			0%	15%	40%	45%	
Coûts supplémentaires moyens par véhicule							17%

Frais supplémentaires avec remboursement de l'impôt sur les huiles minérales							
				30%		15%	
	Minibus						
Option de propulsion	Trolley à batterie			Bus alimentés par biberonnage statique		Bus rechargés au dépôt	
Conditions cadres						Bus supplémentaires	
						oui	non
Coûts supplémentaires relatifs (résultats des études de cas)	0%	0%	0%	0%	30%	15%	
Hypothèse de la part de véhicules par option					50%	50%	
Coûts supplémentaires moyens par véhicule							23%

Horizon temporel 2030/2035							
Frais supplémentaires avec remboursement de l'impôt sur les huiles minérales		15%	10%	20%	8%	20%	7%
	Bus articulé						
Option d'entraînement	Trolley à batterie			Bus alimentés par biberonnage statique		Bus rechargés au dépôt	
Conditions cadres	Part du trajet avec nouvelle caténaire			Rotations supplémentaires		Bus supplémentaires	
	30%	15%	oui	non	oui	non	
Coûts supplémentaires relatifs (résultats des études de cas)	15%	10%	20%	8%	20%	7%	
Hypothèse de la part de véhicules par option	5%	5%	0%	20%	10%	60%	
Coûts supplémentaires moyens par véhicule							9%

Frais supplémentaires avec remboursement de l'impôt sur les huiles minérales							
		20%	15%	20%	8%	20%	8%
	Bus standard						
Option d'entraînement	Trolley à batterie			Bus alimentés par biberonnage statique		Bus rechargés au dépôt	
Conditions cadres	Part du trajet avec nouvelle caténaire			Rotations supplémentaires		Bus supplémentaires	
	30%	15%	oui	non	oui	non	
Coûts supplémentaires relatifs (résultats des études de cas)	20%	15%	20%	8%	20%	8%	
Hypothèse de la part de véhicules par option	0%	0%	0%	20%	10%	70%	
Coûts supplémentaires moyens par véhicule							9%

Frais supplémentaires avec remboursement de l'impôt sur les huiles minérales							
		65%		15%	20%	5%	
	Bus midi						
Option d'entraînement	Trolley à batterie			Bus alimentés par biberonnage statique		Bus rechargés au dépôt	
Conditions cadres				Rotations supplémentaires		Bus supplémentaires	
				oui	non	oui	non
Coûts supplémentaires relatifs (résultats des études de cas)	0%	0%	65%	15%	20%	5%	
Hypothèse de la part de véhicules par option			0%	5%	15%	80%	
Coûts supplémentaires moyens par véhicule							8%

Frais supplémentaires avec remboursement de l'impôt sur les huiles minérales							
		25%		8%			
	Minibus						
Option d'entraînement	Trolley à batterie			Bus alimentés par biberonnage statique		Bus rechargés au dépôt	
Conditions cadres						Bus supplémentaires	
						oui	non
Coûts supplémentaires relatifs (résultats des études de cas)	0%	0%	0%	0%	25%	8%	
Hypothèse de la part de véhicules par option					10%	90%	
Coûts supplémentaires moyens par véhicule							10%

Trafic local – Scénario « réaliste »

Horizon temporel 2021/2025						
	20%	15%	20%	15%	35%	20%
	Bus articulé					
Option d'entraînement	Trolley à batterie		Bus alimentés par biberonnage statique		Bus rechargés au dépôt	
Conditions cadres	Part du trajet avec nouvelle caténaire		Rotations supplémentaires		Bus supplémentaires	
	30%	15%	oui	non	oui	non
Coûts supplémentaires relatifs (résultats des études de cas)	20%	15%	20%	15%	35%	20%
Hypothèse de la part de véhicules par option	5%	5%	0%	30%	0%	60%
Coûts supplémentaires moyens par véhicule						18%

	25%	20%	20%	15%	35%	20%
	Bus standard					
Option d'entraînement	Trolley à batterie		Bus alimentés par biberonnage statique		Bus rechargés au dépôt	
Conditions cadres	Part du trajet avec nouvelle caténaire		Rotations supplémentaires		Bus supplémentaires	
	30%	15%	oui	non	oui	non
Coûts supplémentaires relatifs (résultats des études de cas)	25%	20%	20%	15%	35%	20%
Hypothèse de la part de véhicules par option	0%	0%	0%	40%	0%	60%
Coûts supplémentaires moyens par véhicule						18%

	65%	15%	25%	10%
	Bus midi			
Option d'entraînement	Trolley à batterie		Bus alimentés par biberonnage statique	
Conditions cadres			Rotations supplémentaires	
			oui	non
Coûts supplémentaires relatifs (résultats des études de cas)	0%	0%	65%	15%
Hypothèse de la part de véhicules par option			0%	30%
Coûts supplémentaires moyens par véhicule				12%

	30%	15%
	Minibus	
Option d'entraînement	Trolley à batterie	
Conditions cadres		
Coûts supplémentaires relatifs (résultats des études de cas)	0%	0%
Hypothèse de la part de véhicules par option		
Coûts supplémentaires moyens par véhicule		

Horizon temporel 2030/2035						
	15%	10%	20%	8%	20%	7%
	Bus articulé					
Option d'entraînement	Trolley à batterie		Bus alimentés par biberonnage statique		Bus rechargés au dépôt	
Conditions cadres	Part du trajet avec nouvelle caténaire		Rotations supplémentaires		Bus supplémentaires	
	30%	15%	oui	non	oui	non
Coûts supplémentaires relatifs (résultats des études de cas)	15%	10%	20%	8%	20%	7%
Hypothèse de la part de véhicules par option	5%	5%	0%	20%		70%
Coûts supplémentaires moyens par véhicule						8%

	20%	15%	20%	8%	20%	8%
	Bus standard					
Option d'entraînement	Trolley à batterie		Bus alimentés par biberonnage statique		Bus rechargés au dépôt	
Conditions cadres	Part du trajet avec nouvelle caténaire		Rotations supplémentaires		Bus supplémentaires	
	30%	15%	oui	non	oui	non
Coûts supplémentaires relatifs (résultats des études de cas)	20%	15%	20%	8%	20%	8%
Hypothèse de la part de véhicules par option	0%	0%	0%	20%	0%	80%
Coûts supplémentaires moyens par véhicule						8%

	65%	15%	20%	5%
	Bus midi			
Option d'entraînement	Trolley à batterie		Bus alimentés par biberonnage statique	
Conditions cadres			Rotations supplémentaires	
			oui	non
Coûts supplémentaires relatifs (résultats des études de cas)	0%	0%	65%	15%
Hypothèse de la part de véhicules par option			0%	15%
Coûts supplémentaires moyens par véhicule				7%

	25%	8%
	Minibus	
Option d'entraînement	Trolley à batterie	
Conditions cadres		
Coûts supplémentaires relatifs (résultats des études de cas)	0%	0%
Hypothèse de la part de véhicules par option		
Coûts supplémentaires moyens par véhicule		

Répertoire des illustrations

Figure 1 : entreprises de transport et nombre de bus inclus dans l'enquête auprès des ET (état : janvier 2020)	48
Figure 2 : répartition des bus diesel en Suisse selon les différentes tailles de bus (TRV et trafic local)	49
Figure 3 : ordre de grandeur des longueurs de véhicules et des capacités de transport de différentes tailles de bus	49
Figure 4 : utilisation des bus selon le secteur des transports	50
Figure 5 : âge des bus en service aujourd'hui	51
Figure 6 : véhicules par norme sur les gaz d'échappement	52
Figure 7 : aperçu des remplacements de véhicules par secteur et par taille de bus selon l'enquête auprès des ET	53
Figure 8 : nombre de lignes par longueur de ligne pour le TRV et le trafic local	54
Figure 9 : nombre de lignes par taille de véhicule pour le TRV et le trafic local	54
Figure 10 : aperçu et sélection des options de propulsion et des carburants	58
Figure 11 : développement de l'autonomie réelle des bus à batterie avec concept de charge au dépôt	61
Figure 12 : coûts d'acquisition des options de propulsion dans le temps	67
Figure 13 : besoin d'énergie primaire pour la production et l'élimination des options de propulsion au fil du temps	68
Figure 14 : émissions de gaz à effet de serre provenant de la production et de l'élimination des options de propulsion au fil du temps	68
Figure 15 : évaluation des options de propulsion d'un point de vue technique et opérationnel	73
Figure 16 : études de cas examinées	77
Figure 17 : aperçu des options de propulsion calculées dans l'analyse d'impact	78
Figure 18 : surcoûts dans le trafic local/d'agglomération par rapport au bus diesel Euro 6 (analyse des coûts complets)	89
Figure 19 : surcoûts dans le trafic local/d'agglomération par rapport au bus diesel Euro 6 (analyse des coûts complets)	91
Figure 20 : surcoûts dans le trafic local/d'agglomération par rapport au bus diesel Euro 6 (analyse des coûts complets)	92
Figure 21 : surcoûts dans le trafic local/d'agglomération par rapport au bus diesel Euro 6 (analyse des coûts complets)	93
Figure 22 : surcoûts dans le trafic régional du plateau par rapport au bus diesel Euro 6 (analyse des coûts complets)	96

Figure 23 : surcoûts dans le trafic régional du plateau par rapport au bus diesel Euro 6 (analyse des coûts complets)	97
Figure 24 : surcoûts dans le trafic régional des régions de montagne par rapport au bus diesel Euro 6 (analyse des coûts complets)	99
Figure 25 : surcoûts dans le trafic régional des régions de montagne par rapport au bus diesel Euro 6 (analyse des coûts complets)	100
Figure 26 : potentiel de réduction des gaz à effet de serre des options de propulsion sans fossile par rapport au bus diesel (=100 %)	103
Figure 27 : consommation d'énergie primaire des options de propulsion sans fossile par rapport au bus diesel (=100 %)	106
Figure 28 : émissions de polluants atmosphériques des options de propulsion sans fossile en fonctionnement par rapport au bus diesel (=100 %)	108
Figure 29 : coûts de réduction par tonne d'équivalent CO ₂ à court/long terme, avec/sans remboursement de l'impôt sur les huiles minérales	111
Figure 30 : évaluation qualitative d'autres critères	112
Figure 31 : profils d'évaluation des options de propulsion sans fossile étudiées	118
Figure 32 : aperçu des processus et des conditions cadres pour le financement des transports publics	121
Figure 33 : responsabilités pour l'octroi de concessions et pour la commande / le financement dans les transports publics	123
Figure 34 : déroulement de la procédure de commande du TRV	124
Figure 35 : classification	158
Figure 36 : processus d'introduction des bus électriques	171
Figure 37 : potentiel maximal en matière de remplacement des bus diesel par des bus à batterie dans le TRV	177
Figure 38 : potentiel maximal en matière de remplacement des bus diesel par des bus à batterie dans le trafic local	177
Figure 39 : part des bus utilisant une énergie non fossile par rapport au total des bus diesel à remplacer par année, dans le scénario « réaliste »	178
Figure 40 : potentiel réaliste en matière de remplacement des bus à batterie dans le trafic régional de voyageurs (TRV)	179
Figure 41 : potentiel réaliste pour les bus à batterie dans le trafic local	179
Figure 42 : surcoûts annuels pour la conversion des bus diesel en bus à batterie – calcul de base (estimation approximative avec remboursement de l'impôt sur les huiles minérales)	181
Figure 43 : surcoûts annuels pour la conversion des bus diesel en bus à batterie – sensibilité (estimation approximative avec remboursement de l'impôt sur les huiles minérales)	182
Figure 44 : surcoûts annuels pour la conversion des bus diesel en bus à batterie – sensibilité (estimation approximative avec remboursement de l'impôt sur les huiles minérales)	183
Figure 45 : potentiel de réduction du CO ₂ de la conversion des bus diesel en bus à batterie	184

Figure 46 : potentiel financier réaliste estimé du programme myclimate/KliK de l'instrument de la compensation de CO ₂ pour les importateurs de carburant dans le TRV + TL en cas de contribution de 200 francs par tonne de CO ₂ p.a. pour les bus électriques	187
Figure 47 : potentiel financier réaliste estimé du programme myclimate/KliK de l'instrument de la compensation de CO ₂ pour les importateurs de carburant dans le TRV + TL en cas de contribution de 200 francs par tonne de CO ₂ p.a. pour les bus électriques	188
Figure 48 : estimation du potentiel financier des contributions fédérales provenant du PTA dans le TL p.a., y compris le remboursement de l'impôt sur les huiles minérales aux ETC	189
Figure 49 : estimation du potentiel financier du programme myclimate/KliK de l'instrument de la compensation de CO ₂ pour les importateurs de carburant et du PTA dans le TRV et le TL p.a., avec le remboursement de l'impôt sur les huiles minérales aux ETC	190
Figure 50 : besoins de financement tenant compte des mesures d'encouragement nationales dans le TRV et le TL, avec le remboursement de l'impôt sur les huiles minérales	191
Figure 51 : évolution des surcoûts couverts et non couverts par les contributions d'encouragement (obligation de compensation de CO ₂ par les importateurs de carburant / myclimate/KliK + PTA) pour le TRV + TL (avec remboursement de l'impôt sur les huiles minérales pour les ETC)	192
Figure 52 : répartition possible des besoins de financement selon le financement ordinaire des transports publics (TRV + TL), avec le remboursement de l'impôt sur les huiles minérales	193
Figure 53 : composition de la poudre de cathode de différents types de cellules	200
Figure 54 : évolution des coûts spécifiques des batteries pour les bus électriques	201
Figure 55 : évolution de la capacité spécifique des batteries pour les bus électriques	201
Figure 56 : énergie utilisable d'une batterie chargée	202
Figure 57 : procédés de production d'une batterie au lithium (LiMn ₂ O ₄ /graphite) pour l'électromobilité	206
Figure 58 : matrice de criticité selon la Commission européenne	208
Figure 59 : parts de la production mondiale de cobalt en 2011	209
Figure 60 : évolution du prix du cobalt depuis 2005 (en \$/lb)	210
Figure 61 : coûts spécifiques des piles à combustible et des réservoirs d'hydrogène dans le temps	216
Figure 62 : masses spécifiques des piles à combustible et des réservoirs d'hydrogène dans le temps	216
Figure 63 : bruit maximal de roulement et de propulsion des véhicules routiers lourds (poids lourds) et légers (voitures particulières)	222
Figure 64 : niveau de pression acoustique en fonction de la vitesse	223

Répertoire des tableaux

Tabelle Z-1: Finanzierung bzw. Fördermöglichkeiten von Fahrzeugen et Antriebstechnologien _____	13
Tableau Z-1 : instruments de financement ou de promotion de véhicules et de technologies de propulsion _____	26
Tabella Z-1: finanziamento o possibilità di promozione di veicoli e tecnologia di propulsione _____	40
Tabelle 2 : coûts complets et indemnités en 2019 pour les lignes TRV (enquête complète) _____	55
Tableau 3 : coûts complets et indemnités en 2019 pour les lignes locales selon l'enquête auprès des ET (échantillon) _____	55
Tableau 4 : indicateurs généraux pour les études de cas dans le trafic local _____	79
Tableau 5 : spécification des bus à batterie pour le trafic local _____	80
Tableau 6 : indicateurs généraux pour les études de cas dans le trafic régional du Plateau _____	81
Tableau 7 : spécification des bus à batterie pour le trafic régional du Plateau : bus articulés _____	82
Tableau 8 : spécification des bus à batterie pour le trafic régional du Plateau : bus standard et bus midi _____	83
Tableau 9 : indicateurs généraux pour les études de cas dans le trafic régional en région de montagne _____	84
Tableau 10 : spécification des bus à batterie pour le trafic régional d'une région de montagne _____	85
Tableau 11 : systématisation des mesures de soutien de la demande en matière de transports publics _____	120
Tableau 12 : financement des transports publics par les pouvoirs publics _____	126
Tableau 13 : remboursement de l'impôt sur les huiles minérales pour les trajets effectués par des véhicules routiers destinés au transport de voyageurs sous concession fédérale _____	129
Tableau 14 : promotion des projets pilotes et de démonstration et des projets phares (OFEN) _____	131
Tableau 15 : obligation de compensation des émissions de CO ₂ des importateurs de carburant en vertu de la loi sur le CO ₂ _____	134
Tableau 16 : Fondation Suisse pour le Climat _____	136
Tableau 17 : soutien financier aux transports publics non fossiles (état 2019) _____	138
Tableau 18 : programme d'encouragement « Énergies renouvelables et efficacité énergétique » _____	141
Tableau 19 : programme d'encouragement « 2000-Watt-Gesellschaft » (société à 2000 watts) (Zurich / Grisons) _____	156
Tableau 20 : aperçu des mesures existantes de financement et de soutien des transports publics _____	159
Tableau 21 : financement et options d'encouragement pour les véhicules et les systèmes de propulsion _____	160
Tableau 22 : points forts et points faibles des instruments ou des mesures d'encouragement _____	161
Tableau 23 : vue d'ensemble des études de cas à l'étranger _____	166
Tableau 24 : options d'achat pour les bus électriques _____	172
Tableau 25 : financement et options de financement des bus électriques au niveau international _____	173
Tableau 26 : composition d'une cellule lithium (NMC) _____	199
Tableau 27 : comparaison des études sur les batteries jusqu'en 2012 _____	205

Abréviations

LMP	Loi fédérale sur les marchés publics
CCS	Carbon Capture and Storage
CNG	Compressed natural gas
EEV	Enhanced Environmentally Friendly Vehicle
FAME	fatty acid methyl ester (ester méthylique d'acide gras)
MICET	Manuel informatisé des coefficients d'émission du trafic routier
HDP	Heures de pointe
IMC	in motion charging
AIMP	Accord intercantonal sur les marchés publics
CDCTP	Conférence des délégués cantonaux des transports publics
ETC	Entreprises de transport concessionnaires
LFP	Lithium-fer-phosphate
LNG	Liquified natural gas
LTO	Titanate de lithium
NMC	Lithium-nickel-manganèse-cobalt
NO _x	Oxyde d'azote
TP	Transports publics
TL	Trafic local
LTV	Loi sur le transport de voyageurs
SMQ TRV	Système de mesure de la qualité dans le trafic régional de voyageurs
TRV	Trafic régional de voyageurs
LSu	Loi sur les subventions
ET	Entreprise de transport
UCO	Used Cooking-Oil
CE	Crédit d'engagement
WtW	Well-to-Wheel

Littérature

Althaus et al. 2009a : Althaus H.J., De Haan P. and Scholz R.W. 2009. Traffic noise in LCA Part 1: state-of-science and requirement profile for consistent context-sensitive integration of traffic noise in LCA. *International Journal of Life Cycle Assessment* 14(6): 560-570.

Althaus et al. 2009b : Althaus H.J., De Haan P. and Scholz R.W. 2009. Traffic noise in LCA Part 2: Analysis of existing methods and proposition of a new framework for consistent, context-sensitive LCI modeling of road transport noise emission. *International Journal of Life Cycle Assessment* 14(7): 676-686.

Althaus 2012 : Althaus H.J. 2012. Inventories and Impact Assessment for Road Transport Noise in Generic Life cycle assessments. Diss. ETH No 20546 ETH Zurich, Zurich.

Althaus 2013 (Conf) : Althaus H.J. Comparison of LCA Studies on Li-Ion Batteries. NAREP Seminar, Dübendorf.

Althaus et al. 2015 : Althaus H.J., Duschmalé J. and Fries N. 2015, Cleantech Ressourcenstrategie. Foundation for global sustainability, Zurich, Suisse. www.swisscleantech.ch/Ressourcenstrategie DOI: 10.13140/RG.2.1.2651.7529.

ARE 2020a : Directives pour le programme en faveur du trafic d'agglomération (DPTA), Berne, 13 février 2020.

ARE 2020b : Coûts et bénéfices externes des transports en Suisse, Transport par la route et le rail, par avion et par bateau 2017, tableaux de résultats, juin 2020.

Boren et al. 2016 : Boren S., Nurhadi L. and Ny H. Preferences of Electric Busses in Public Transport; Conclusions from Real Life Testing in Eight Swedish Municipalities. *International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering* Vol:10, No:3, 2016

B&S 2018a : Klauser, A. (2018) Lärmemissionen öffentlicher Verkehr. Batteriebetriebene Busse. Messbericht 2018. B+S AG, Berne, sur mandat du VBZ et de la ville de Zurich

B&S 2018b : Klauser, A. Kindler, B., Heutschi, K. (2018) Lärmemissionen öffentlicher Verkehr. Städtischer Verkehrsbusse. Definition von Emissionswerten. B+S AG, Berne, sur mandat de l'OFEV, du VBZ, de l'office pour l'environnement et l'énergie de Bâle et de la ville de Lucerne

BAFU 2020 : Compensation des émissions de CO₂, <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/fachinformationen/klimapolitik/kompensation-von-co2-emissionen.htm>, 2020.

Banza Lubaba Nkulu et al. 2018 : Banza Lubaba Nkulu, C., Casas, L., Haufroid, V. et al. Sustainability of artisanal mining of cobalt in DR Congo. *Nat Sustain* 1, 495–504 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0139-4>

Batrec 2020 : Gergö Rimaszéki (2010) Recycling von Lithium-Ionen-Batterien – nicht nur Energie sondern auch Wertstoffspeicher. LiBa Protect Forum, Olten, 7.2.2020

- BAV 2016** : Guide Bus – Conventions d’objectifs Confédération/cantons - entreprises de transport (TU) dans le cadre de la procédure de commande, état au 31 août 2016.
- OFT 2017a** : Guide sur l’acquisition de moyens d’exploitation dans le TRV (approbation OITRV, cautionnement solidaire de la Confédération, Office fédéral des transports, mars 2017.
- OFT 2017b** : Fiche-info recherche et innovation OFT, Office fédéral des transports, décembre 2017.
- OFT 2017c** : Mise en œuvre de la stratégie énergétique 2050 dans les transports publics (SETP 2050), programme de recherche pour la période 2017-2020, 15 juin 2017.
- OFT 2020a** : Rapport explicatif concernant le crédit d’engagement pour l’indemnisation des prestations de transport régional de voyageurs (TRV) pour les années 2022-2025, Berne, 2 avril 2020.
- OFT 2020b** : Grâce au cautionnement, les TP vont pouvoir continuer à bénéficier de crédits avantageux, communiqué de presse de l’Office fédéral des transports, 5 juin 2020.
- OFT 2020c** : Réforme du transport régional de voyageurs (TRV), Rapport sur les résultats de la consultation, juin 2020.
- OFEN 2016** : Faktenblatt für Pilot- und Demonstrationsprojekte: Elektrische Maschinen und Fahrzeuge, <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/forschung-und-cleantech/pilot-und-demonstrationsprogramm.exturl.html/aHR0cHM6Ly9wdWJkYi5iZmUuYWRTaW4uY2gvZGUVcHVibGljYX/Rpb24vZG93bmVvYVQvODQyOQ==.html>, septembre 2016.
- OFEN 2019** : Vollzugsweisung zur Einreichung und Evaluation von Gesuchen um Finanzhilfe für Energieforschungs-, Pilot- und Demonstrationsprojekte, Version 17.12.2019.
- Bradley et al. 2017** : Bradley, D.C., Stillings, L.L., Jaskula, B.W., Munk, LeeAnn, and McCauley, A.D., 2017, Lithium, chap. K of Schulz, K.J., DeYoung, J.H., Jr., Seal, R.R., II, and Bradley, D.C., eds., Critical mineral resources of the United States—Economic and environmental geology and prospects for future supply: U.S. Geological Survey Professional Paper 1802, p. K1– K21, <https://doi.org/10.3133/pp1802K>.
- Brannigan et al. 2015** : Ex-post Evaluation of Directive 2009/33/EC on the promotion of clean and energy efficient road transport vehicles, étude sur mandat de la Commission européenne, rapport final, 21 septembre 2015.
- Cox et al. 2018** : Cox, B., Mutel, C., Bauer, C., Mendoza Beltran, A. and van Vuuren, D. (2018). The uncertain environmental footprint of current and future battery electric vehicles, Environmental Science & Technology, doi:10.1021/acs.est.8b00261.
- Cox et al. 2020** : Cox B., Bauer C., Mendoza Beltran A., van Vuuren DP., Mutel CL. Life cycle environmental and cost comparison of current and future passenger cars under different energy scenarios. Applied Energy, Volume 269, 2020, 115021, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115021>.

- De Haan et al. 2017** : Dispositifs d'incitation à l'achat de véhicules efficients : impacts sur l'achat et l'utilisation des voitures, projet de recherche SVI 2014/002_ENG sur demande de l'Association suisse des ingénieurs et experts en transports (SVI), décembre 2017.
- Ecoplan 2012** : Coûts et potentiels d'évitement des GES en Suisse, analyse de la littérature et conception d'enquêtes complémentaires, sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), rapport final, Berne, 7 juin 2012.
- Erdmann und Graedel 2011** : Erdmann, L., Graedel, T.E. (2011). The Criticality of Non-Fuel Minerals: A Review of Major Approaches and Analyses. Environmental Science & Technology 45:7620–7630.
- Commission européenne, s.d** : Juncker Plan and Connecting Europe Facility provide financing for electric buses in Rotterdam, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_19_5952, consulté le 12.03.2020, sans date.
- Commission européenne 2010** : Commission européenne (2010). Critical Raw Materials for the EU. Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials.
- FuelCellBuses.eu, sans date** : MEHRLIN, <https://www.fuelcellbuses.eu/projects/mehrlin>, consulté le 12.03.2020, sans date.
- FuelCellElectricBuses.eu, sans date** : JIVE, <https://www.fuelcellbuses.eu/projects/jive>, consulté le 12.03.2020, sans date.
- Frischknecht 2012** : Frischknecht R. Umweltaspekte von Elektroautos. ESU / OFEV
- Genuit 2008** : Genuit, Klaus. (2008). Vehicle interior noise - A combination of sound, vibration and interactivity. Noise-Con 2008, Dearborn, Michigan.
- Greet 2006** : Greet 2.7 2006 (base de données) : The Transportation Vehicle-Cycle Model. Argonne National Laboratory
- Helms et al, 2010 (conf.)** : Electric vehicle and plug-in hybrid energy efficiency and life cycle emissions. Ifeu
- Heutschi 2004** : Heutschi K (2004b) SonRoad – Modèle de calcul du trafic routier Cahier de l'environnement n° 366. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Berne.
- ICCT 2017** : Financing the transition to soot-free urban bus fleets in 20 megacities, Washington DC, octobre 2017.
- INFRAS 2018** : Externe Evaluation des Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprogramms, sur mandat de l'Office fédéral de l'énergie, octobre 2018.
- Ishihara et al. 1999 / 2002** : Ishihara et al. Environmental Burdens of Large Li-Ion Batteries Developed in a Japanese National Project. Central Research Institute of Electric Power Industry 1999 / 2002

- Li, Castellanos et Maassen 2018** : Emerging trends and innovations for electric bus adoption – a comparative case study of contracting and financing of 22 cities in the Americas, Asia-Pacific, and Europe, *Research in Transportation Economics*, p. 470–481, 2018.
- Litra 2019** : Les Transports en chiffres, édition 2019, Service d'information pour les transports publics, Berne, août 2019.
- INEA, sans date a** : Connecting Europe Facility, <https://ec.europa.eu/inea/en/connecting-europe-facility>, consulté le 12.03.2020, sans date.
- INEA, sans date b** : TEN-T Projects, <https://ec.europa.eu/inea/en/ten-t/ten-t-projects>, consulté le 12.03.2020, sans date.
- INFRAS/PSI/Quantis 2020** : Umweltauswirkungen von Fahrzeugen im urbanen Kontext. INFRAS, PSI & Quantis sur mandat de la ville et du canton de Zurich. Berne, Villigen, Zurich, juillet 2020.
- IWSB et HSLU 2018** : Evaluation Solidarbürgschaften im regionalen Personenverkehr, IWSB – Institut d'études économiques de Bâle et Haute école de Lucerne, étude mandatée par l'Office fédéral des transports OFT, rapport final, 12.12.2018.
- Majeau-Bettez et al. 2011** : Majeau-Bettez G., Hawkins TR., Strommann AH. Life Cycle Environmental Assessment of Lithium-Ion and Nickel Metal Hydride Batteries for Plug-In Hybrid and Battery Electric Vehicles. *Environmental Science & Technology* 2011 45(10),4548-4554 DOI: 10.1021/es103607c
- National Research Council 2008** : National Research Council (2008). Minerals, Critical Minerals and the U.S. Economy. The National Academies Press, Washington D.C.
- Notter et al. 2010** : Notter D. A., Gauch M., Widmer R., Wager P., Stamp A., Zah R. and Althaus H.J. (2010). "Contribution of Li-Ion Batteries to the Environmental Impact of Electric Vehicles." *Environmental Science & Technology* 44(17): 6550-6556.
- Robinson et al. 2017** : Robinson, G.R., Jr., Hammarstrom, J.M., and Olson, D.W., 2017, Graphite, chap. J of Schulz, K.J., DeYoung, J.H., Jr., Seal, R.R., II, and Bradley, D.C., eds., Critical mineral resources of the United States—Economic and environmental geology and prospects for future supply: U.S. Geological Survey Professional Paper 1802, p. J1– J24, <https://doi.org/10.3133/pp1802J>.
- Rydh & Sandén 2005** : Rydh CJ., Sandén B. Energy analysis of batteries in photovoltaic systems Part II. Energy return factors and overall battery efficiencies. *Energy Conversion and Management* 0196-8904 (ISSN) Vol. 46 Issue 11-12 p. 1980-2000
- Samaras and Meisterling, 2008** : Samaras C. and Meisterling K. Life Cycle Assessment of Greenhouse Gas Emissions from Plug-in Hybrid Vehicles: Implications for Policy. *Environmental Science & Technology* 2008 42(9),3170-3176 DOI: 10.1021/es702178s
- SEI 2007** : Hybrid Electric and Battery Electric Vehicles, Technology, Costs and Benefits. Sustainable Energy Ireland

- Slack et al. 2017** : Slack, J.F., Kimball, B.E., and Shedd, K.B., 2017, Cobalt, chap. F of Schulz, K.J., DeYoung, J.H., Jr., Seal, R.R., II, and Bradley, D.C., eds., Critical mineral resources of the United States—Economic and environmental geology and prospects for future supply: U.S. Geological Survey Professional Paper 1802, p. F1– F40, <https://doi.org/10.3133/pp1802F>.
- Stamp et al. 2013** : Stamp, A., Althaus, H.J. and Wäger, P.A. (2013) Limitations of applying life cycle assessment to complex co-product systems: The case of an integrated precious metals smelter-refinery, Resources, Conservation and Recycling, Available online 8 October 2013, ISSN 0921-3449, <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.09.003>.
- Statista 2020**: www.statista.com; consulté le 25.02.2020
- TA Swiss 2012** : De Haan P., Zah R. avec les contributions de Althaus H.J., Bernath K., Bruns F., Fussen D., Gauch M., Wäger P., Widmer R. 2012. Chancen und Risiken der Elektromobilität in der Schweiz. Vdf Hochschulverlag, Zurich
- USGS 2019** : U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, février 2019. Fiche technique sur le lithium. <https://prd-wret.s3-us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/mcs-2019-lithi.pdf>
- USGS 2020** : U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, février 2019. Fiche technique sur les éléments de terres rares. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020-rare-earths.pdf>
- UVEK 2019** : Reform des regionalen Personenverkehrs (Änderung des Personenbeförderungsgesetzes), Erläuternder Bericht zur Eröffnung des Vernehmlassungsverfahrens, Berne, 17 avril 2019.
- Van Gosen et al. 2017** : Van Gosen, B.S., Verplanck, P.L., Seal, R.R., II, Long, K.R., and Gambogi, Joseph, 2017, Rare-earth elements, chap. O of Schulz, K.J., DeYoung, J.H., Jr., Seal, R.R., II, and Bradley, D.C., eds., Critical mineral resources of the United States— Economic and environmental geology and prospects for future supply: U.S. Geological Survey Professional Paper 1802, p. O1– O31, <https://doi.org/10.3133/pp1802O>.
- WHO 2011** : La charge de morbidité imputable au bruit ambiant. Quantification du nombre d'années de vie en bonne santé perdues en Europe ; ISBN 978 92 890 0229 5 ; OMS : Copenhagen, 2011.
- Wendel 2009** : Wendel M. 2009, Abschätzung des künftigen Angebot-Nachfrage-Verhältnisses von Lithium vor dem Hintergrund des steigenden Verbrauchs in der Elektromobilität. Fraunhofer ISI, Karlsruhe.
- WRI 2019a** : How to enable electric bus adoption in cities worldwide – A guiding report for city transit agencies and bus operating entities, Washington DC, mai 2019.
- WRI 2019b** : Barriers to adopting electric buses, Washington DC, mai 2019.
- WRI 2019c** : Financing electric and hybrid-electric buses: 10 questions city decision-makers should ask, Working Paper, Washington DC, octobre 2019.
- Zackrisson et al. 2010** : Zackrisson M., Avellán L., Orlenius J. Life cycle assessment of lithium-ion batteries for plug-in hybrid electric vehicles – Critical issues. Journal of Cleaner Production, Volume 18, Issue 15, 2010, Pages 1519-1529, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.06.004>.