



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et
de la communication (DETEC)
Office fédéral des transports OFT
Programme Stratégie énergétique 2050 des transports publics
(SETP 2050)

Système de propulsion alternatif au Diesel pour les lignes desservant la gare routière de Porrentruy

Rapport final

Mandataires, Syndicat Intercommunal du District de Porrentruy, Jérémie Huber
Rue d'Airmont 7, 2900 Porrentruy, jeremy.huber@porrentruy.ch, www.sidp.ch

Auteur (e), HES-SO Fribourg, Thierry Robert
Thierry Robert, thierry.robert-nicoud@hefr.ch, heia-fr.ch/fr/recherche-appliquee/instituts/sesi/

Co-auteurs, Jean-Luc Robyr, Leewan Bonvin et Alessandro Lambrughi

Groupe d'accompagnement

Madame Anne Roy, cheffe du département d'urbanisme, Municipalité de Porrentruy

Monsieur Eric Lorenzo, section mobilité et transports de la République et Canton du Jura

Monsieur Roland Cattin, CarPostal

Mentions légales

Éditeur:

Office fédéral des transports OFT

Programme : Stratégie Énergétique 2050 dans les transports publics (SETP 2050)

CH-3003 Berne

Conduite du programme

Tristan Chevroulet, OFT

Numéro de projet: P-224

Source

Accessible gratuitement par Internet

www.bav.admin.ch/energie2050

Seuls l'auteur (e) ou les auteurs (es) sont responsables du contenu et des conclusions de ce rapport.

Berne, le 14.12.2024

Table des matières

Executive Summary auf Deutsch	2
Executive Summary en français	2
Executive Summary in English	3
Zusammenfassung auf Deutsch.....	4
Résumé dans une seconde langue nationale (FR)	9
1 Situation de départ	14
2 Objectifs du travail.....	14
3 Approche adoptée et état des connaissances actuelles	15
3.1 Approche de résolution.....	15
3.2 État des connaissances actuelles.....	15
4 Résultats obtenus pour les différentes étapes et discussions	17
4.1 Recherche des données techniques	17
4.1.1 Données des véhicules	17
4.1.2 Données infrastructure	20
4.2 Caractérisation des parcours (lignes)	21
4.3 Modèles numériques.....	26
4.3.1 Modèle pour la modélisation physique du bus.....	26
4.3.2 Algorithme d'optimisation.....	32
4.4 Calcul des coûts.....	38
4.4.1 Véhicules diesel (Référence actuelle).....	39
4.4.2 Véhicules à propulsion électrique.....	40
4.4.3 Véhicules à gaz naturel compressé (CNG).....	42
4.4.4 Véhicules à hydrogène.....	43
4.4.5 Analyse comparative des solutions retenues	46
4.5 Solution de production d'énergie.....	47
4.5.1 Production d'énergie solaire équivalente	47
4.5.2 Production d'énergie solaire st stockage dans des batteries.....	49
4.5.3 Production d'hydrogène à partir d'énergie solaire avec stockage dans des réservoirs	51
4.5.4 Analyse comparative avec les solutions de production et stockage d'énergie.....	52
5 Conclusions et recommandations	53
Liste des symboles et abréviations	55
Références bibliographiques	55
Annexes.....	57
A1 Données techniques des bus (base des données).....	57
A2 Profils vitesse et altitude des différents tracés (lignes).....	61
A3 Profils passagers des différents tracés.....	62
A4 Horaires considérés dans l'étude.....	62

Executive Summary auf Deutsch

Die Energiestrategie des Bundes hat zum Ziel, bis 2050 die erneuerbaren Energiequellen zu fördern und die Energieeffizienz zu verbessern, unter anderem auch im Bereich Mobilität. Derzeit werden im öffentlichen Verkehrsnetz der Gemeinde Porrentruy Dieselbusse eingesetzt. Ihr täglicher Betrieb führt mit einem hohen CO₂-Ausstoss und Lärm zu einer erheblichen Umweltbelastung. Um die Energiestrategie zu befolgen, beabsichtigt die Gemeinde, die Dieselbusse durch Fahrzeuge mit alternativen Antriebssystemen zu ersetzen, die erlauben, die Schadstoffemissionen zu verringern. Zur Erreichung dieses Ziels wurde die Hochschule für Technik und Architektur in Freiburg beauftragt, eine Machbarkeitsstudie durchzuführen. Diese Studie hatte zum Zweck, das Umwelt- und Wirtschaftspotential dieser Umstellung aufzuzeigen und zu begründen.

Für die Durchführung der Analysen wurden zwei numerischen Modellen entwickelt: Im ersten Modell wird der tägliche Betrieb eines Busses im öffentlichen Verkehrsnetz simuliert. Das zweite Modell ist ein Optimierungsalgorithmus, der die optimale Busflotte (tiefste Kosten) mit der notwendigen Infrastruktur berechnet. Um diesen Modellen zu alimentieren und um repräsentative Resultate zu erhalten, wurden in Zusammenarbeit mit PostAuto einige Informationen über die Fahrzeuge, die Infrastruktur und die Fahrgäste erfasst und verarbeitet. Für die Linienbeschreibung wurde zudem eine Messkampagne durchgeführt.

Die so erhaltenen numerischen Ergebnisse haben erlaubt, Kosten- und Energiebilanzen zu erstellen. Diese berücksichtigen die folgenden Bustechnologien: Diesel (als Referenz), 100% Elektrobusse, Naturgasbusse und Wasserstoffbusse. In der Kostenbilanz sind Fahrzeug-, Infrastruktur- und Energiekosten berücksichtigt. In der Energiebilanz sind die CO₂-Belastungen verglichen. Die erhaltenen Werten ergeben, dass die berücksichtigten alternativen Treibstoffvarianten im Vergleich zur Dieseltechnologie im Allgemeinen sowohl wirtschaftliche als auch ökologische Vorteile bieten. Damit ist die Machbarkeit einer Umstellung des Antriebssystems der Busse im öffentlichen Verkehrsnetz in der Gemeinde Porrentruy belegt. Aus dem Kostenvergleich ist hervorzuheben, dass die Elektrobusse die beste Lösung darstellen. Diese Feststellung sowie ein eventueller abschliessender Entscheid sind jedoch mit vertieften Studien zu begründen. Eine Empfehlung in Bezug auf die Kostenanalyse betrifft eine zusätzliche Iteration, um die mit den angewendeten Preisen verbundenen Unsicherheiten zu verringern. In der Energiebilanz sollte auch der CO₂-Ausstoss, der notwendigen grauen Energie für die Herstellung der Fahrzeuge und der Infrastruktur berücksichtigt werden, und nicht bloss jener aus dem Betrieb der Fahrzeuge.

Executive Summary en français

La stratégie énergétique de la confédération vise, d'ici 2050, à favoriser les sources d'énergie renouvelables et à augmenter l'efficacité énergétique, entre autres dans le domaine de la mobilité. Aujourd'hui, dans la commune de Porrentruy, le réseau de transports publics est constitué de bus diesel dont l'exploitation quotidienne génère un impact environnemental important avec des émissions élevées de CO₂ et de bruit. C'est pourquoi, afin de suivre la stratégie énergétique, la commune a l'intention de remplacer les bus diesel par des véhicules à propulsion alternative permettant de réduire les émissions polluantes. Pour atteindre cet objectif, l'école d'ingénieurs et d'architectes de Fribourg a été mandatée pour réaliser une étude de faisabilité. Cette étude devait démontrer et justifier le potentiel écologique et économique de ce changement.

Afin de pouvoir effectuer les analyses, deux modèles numériques ont été développés : le premier modélise l'exploitation quotidienne d'un bus dans le réseau des transports publics. Le second est un algorithme d'optimisation qui permet d'obtenir de manière optimale (meilleurs coûts) la flotte de bus et l'infrastructure nécessaire. Afin d'alimenter ces modèles et d'obtenir des résultats représentatifs, en collaboration avec CarPostal, plusieurs informations sur les véhicules, l'infrastructure et les passagers ont été recherchées et traitées. Une campagne de mesure a été également réalisée pour la caractérisation des lignes.

Les résultats numériques obtenus ont permis d'établir un bilan de l'énergie et des coûts. Celui-ci prend en compte les technologies de bus suivantes : Diesel (référence), bus 100% électriques, bus au gaz naturel et bus à hydrogène. Le bilan des coûts considère les véhicules, l'infrastructure et l'énergie. Le bilan énergétique compare l'impact CO₂. Les valeurs obtenues montrent que, en général, les variantes avec carburants alternatifs considérées présentent des avantages économiques et écologiques par rapport à la technologie diesel. Ceci démontre la faisabilité d'un changement de système de propulsion pour les bus du réseau de transports publics de Porrentruy. En comparant les coûts, il est possible de souligner que les bus électriques sont la meilleure solution. Cependant, cette affirmation, et une éventuelle décision finale doivent être justifiées par des études plus approfondies. Une recommandation pour l'analyse des coûts concerne une itération supplémentaire permettant de

réduire les incertitudes liées aux tarifs utilisés. Pour le bilan énergétique, il serait utile de considérer les émissions de CO₂ de l'énergie grise nécessaire à la production des véhicules et de l'infrastructure et pas seulement celle émise pendant l'exploitation.

Executive Summary in English

The confederation's energy strategy aims to promote the development of renewable energy sources and to increase energy efficiency in several sectors including mobility by 2050. Currently, in the municipality of Porrentruy, the public transport network comprises diesel buses. Their day-to-day operation has a major environmental impact, with high CO₂ and noise emissions. Therefore, in line with the energy strategy, the municipality intends to replace these diesel vehicles with buses featuring alternative propulsion systems that emit fewer pollutants. To meet this objective, the School of Engineering and Architecture of Fribourg (HEIA-FR) was mandated to carry out a feasibility study designed to demonstrate and justify the ecological and economic potential of this change.

To carry out the analyses, two numerical models were developed. The first modelled the daily operation of a bus in the public transport network. The second was an optimization algorithm designed to optimize (on a cost basis) the bus fleet and necessary infrastructure. For the model inputs, and to obtain representative results, in collaboration with Postauto, various information about the vehicles, infrastructure and passengers were collected and processed. A measurement campaign was also carried out to provide information about the different bus routes.

The results from these numerical models were used to draw up an energy and cost assessment featuring the following bus technologies: diesel (current reference), 100% electric buses, and buses using compressed natural gas and hydrogen. The cost analysis took into account the vehicles, infrastructure and energy costs, while the energy analysis compared the different CO₂ impacts. The values obtained show that, overall, the alternative propulsion systems considered present economic and environmental advantages with respect to diesel technology. This demonstrates the feasibility of a change to the propulsion system for the buses used in the Porrentruy public transport network. The cost comparison also emphasizes that electric technology is the best solution. However, this affirmation, and any future final decision, must be justified through more in-depth studies. One recommendation for the cost analysis concerns an additional study designed to reduce the uncertainties about the rates used. For the energy assessment, it would be useful to include the CO₂ emissions from the grey energy used to produce the vehicles and infrastructure and not just the emissions caused by the vehicles' operation.

Zusammenfassung auf Deutsch

Schlussfolgerung

In diesem Projekt wurden mehrere Antriebsalternativen mit reduzierter Umweltbelastung untersucht, um die derzeit im öffentlichen Verkehrsnetz der Gemeinde Porrentruy in Betrieb stehenden Dieselbusse zu ersetzen. Folgende Technologien wurden berücksichtigt: Elektrobusse, Naturgasbusse und Wasserstoffbusse. Die ermittelten Kostenbilanzen (Fahrzeug-, Infrastruktur- und Energiekosten) zeigen, dass die alternativen Antriebsystemvarianten im Allgemeinen günstiger zu sein scheinen. Außerdem heben die berechneten Energiebilanzen hervor, dass die berücksichtigten Technologien dank dem reduzierten CO₂-Ausstoss im Vergleich zu den Dieselbussen zu einer geringeren Umweltbelastung führen. Beide Schlussfolgerungen dieser Analyse belegen und begründen also die Machbarkeit des Ersatzes der Dieselbusse in der Gemeinde Porrentruy. Die in dieser Arbeit durchgeföhrten Analysen zeigen auch, dass die den Bedürfnissen der Gemeinde am besten entsprechende Variante jene mit elektrischen Fahrzeugen von 12m zu sein scheint. Diese Schlussfolgerung ist jedoch durch vertieftere Analysen zu bestätigen, in denen die graue Energiebilanz sowie die Besteuerung zu berücksichtigen sind.

Kontext des Projektes und Problematik

Die neue Energiestrategie 2050 des Bundesrates ist am 1. Januar 2018 mit einem Energiegesetz in Kraft getreten. Seine Ziele sind unter anderem, die erneuerbaren Energiequellen zu entwickeln und die Energieeffizienz in Bereichen wie Industrie, Gebäude und Mobilität zu erhöhen. Derzeit verkehrt auf dem der Bevölkerung zur Verfügung gestellten öffentlichen Verkehrsnetz der Gemeinde Porrentruy, eine Flotte von verschiedenen 12 m und 18 m (Gelenk-)Dieselbussen. Der tägliche Betrieb dieser Fahrzeuge bewirkt eine bedeutende Umweltbelastung mit einem hohen Verbrauch nicht erneuerbarer Energie. Im Weiteren verursacht der Verkehr den Einwohnern im Zentrum eine nicht unbedeutende Lärmelästigung. Um die Energiestrategie des Bundes zu befolgen, möchte die Gemeinde Porrentruy deshalb die aktuellen Dieselbusse durch nicht umweltschädliche Fahrzeuge ersetzen.

Aus diesem Grund beauftragten die Gemeinde Porrentruy, der Kanton Jura und das Bundesamt für Verkehr (BAV) die Hochschule für Technik und Architektur in Freiburg (HTA-FR) mit einer Studie über das öffentliche Verkehrsnetz von Porrentruy. Die Analyse erfolgt mit numerischen und physischen Modellen. Die Arbeit soll objektive Elemente zu den Kosten und zum Energieverbrauch an der Gemeinde Argumente liefern, welche ihren Willen belegen, die Dieselbusse zu ersetzen. Der Schwerpunkt in diesem Projekt liegt auf der Analyse der Elektrobusse samt der notwendigen Infrastruktur (Ladestationen). Nebst den für die Elektrobusse ermittelten Ergebnissen wurden gleichwohl weitere Analysen und Vergleiche zu anderen Bustechnologien durchgeföhr: Biogas, Diesel (als Referenz) und Wasserstoff. Die Untersuchung der verschiedenen Bustechnologien soll ebenfalls dazu beitragen, zu entscheiden, welche Technologie für die Bedürfnisse der Gemeinde Porrentruy die geeignete ist.

Ziele der Arbeit

Die in diesem Projekt durchgeföhrte Arbeit hat vier Hauptziele:

1. Aufbau eines numerischen Modells, das den täglichen Energieverbrauch eines Busses im öffentlichen Verkehrsnetz der Porrentruy Gemeinde berechnen kann.
2. Entwicklung eines numerischen Optimierungsalgorithmus. Gestützt auf den Fahrplan 2022 muss dieser sowohl die Busflotte als auch die notwendige Infrastruktur optimieren.
3. Erstellung eines finanziellen und ökologischen Vergleichs zwischen den in Betracht gezogenen Technologien. Für die Erstellung dieser Bilanz wurden die Ergebnisse des numerischen Optimierungsalgorithmus verwendet.
4. Analyse verschiedener Lösungen zur Erzeugung der notwendigen Energie für den Betrieb der Flotte. In dieser Studie wurden zwei Aspekte berücksichtigt: für jede Variante der finanzielle Aspekt und der durch den CO₂-Ausstoss bedingte ökologische Aspekt.

Um die vier Ziele zu erreichen, wurde das Projekt in acht verschiedene Schritte aufgeteilt.

Erhaltene Resultate

- Dokumentation, Infrastruktur und Bus

Diese ersten drei Schritte bezweckten, die benötigten technischen Angaben der Fahrzeuge und der Infrastruktur zu finden. Die Erhebung dieser Daten war nötig, um sie anschliessend in die numerischen Modellen einzufügen. Die gefundenen Daten beziehen sich auf verschiedene Elektrobusse, welche derzeit in mehreren Städten eingesetzt sind (Tabelle 1).

Anzahl	Modell	Länge [m]	Speicherkapazität [kWh]
1	Mercedes eCitaro	12	Basis : 196 / Lange Reichweite : 396
2	Mercedes eCitaroG	18 (gelenkige)	396
3	Ebusco 2.2	12	Basis : 363 / Lange Reichweite : 423
4	Sileo S10	10	225

Tabelle 1 Elektrobusmodelle, zu denen die technischen Angaben gesucht wurden

Für jedes Fahrzeug wurden drei Datenarten gesucht:

1. Mechanische Daten: für die Berechnung der auf den Bus einwirkenden Widerstandskräfte.
2. Elektrische Daten: für die Modellierung des Elektromotors und der Batterie.
3. Hilfsdaten: für die Modellierung des Heizsystems des Busses.

Die Hauptquellen waren die im Internet verfügbaren Herstellerinformationen. Bezuglich Infrastruktur wurden die benötigten Daten für die Modellierung der Ladestationen gesucht (Ladeleistungen und Wirkungsgrade). Zwei Arten von Ladestationen wurden berücksichtigt: Pantographen (Schnellladung) und Ladestationen im Depot. Die Daten zu den Ladestationen wurden beim Hersteller ABB Schweiz entnommen.

- Linien:

Hier war das Ziel, die Beschreibungen der verschiedenen Fahrstrecken im Jahr 2022 zu erstellen, um diese ebenfalls im numerischen Modell zu integrieren. Insgesamt wurden 9 Linien untersucht, die den Bahnhof bedienen. Für jede Linie wurden 3 Charakteristiken erfasst: Geschwindigkeitsprofil des Buses, Höhenprofil und Anzahl Fahrgäste. Die letztere war wichtig, um den Einfluss der Traglast auf den Energieverbrauch berücksichtigen zu können. Die Geschwindigkeits- und Höhenprofile stammten aus den Messungen in den Fahrzeugen. Die Zahlen zu den Fahrgästen wurden aus den von PostAuto gelieferten Daten bearbeitet. Ein Beispiel der Ergebnisse für die Linie 71 (Bahnhof-Fahy) ist in der Tabelle 2 und auf dem Bild 1 ersichtlich.

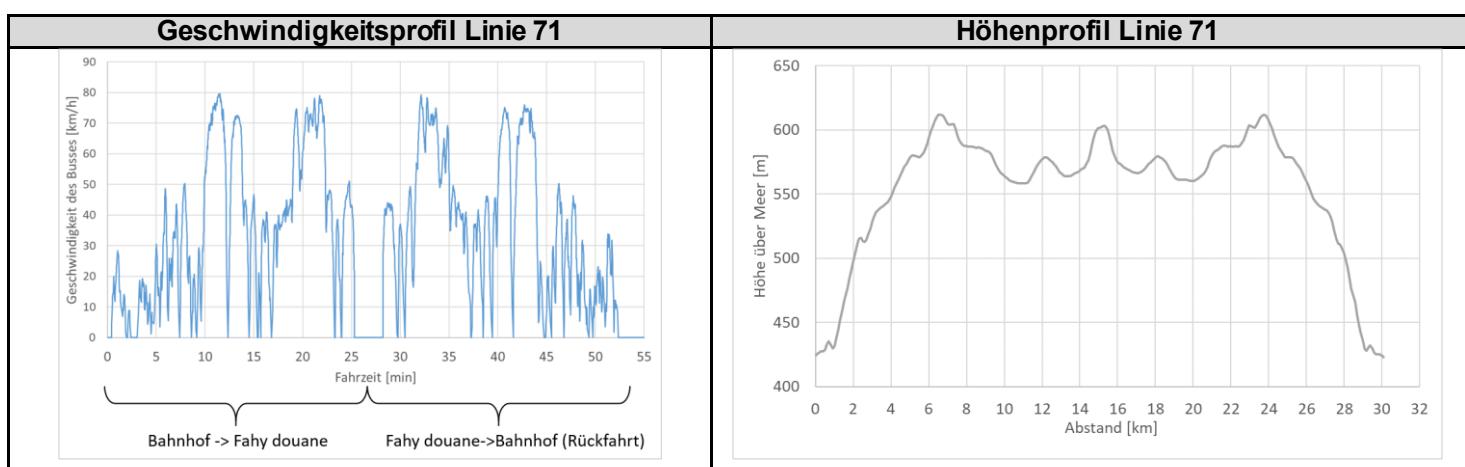


Tabelle 2 Graphische Darstellungen der Geschwindigkeits- und Höhenprofile Linie 71

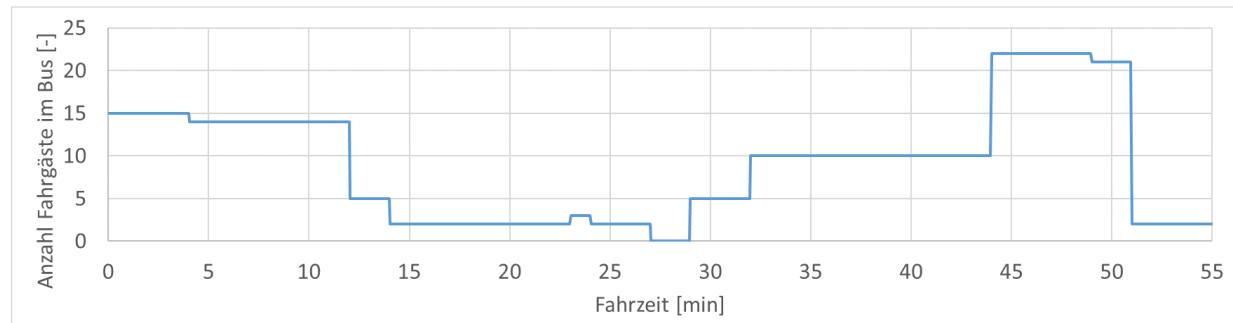


Bild 1 Linie 71 : Anzahl Fahrgäste im Bus nach Bearbeitung der Daten von PostAuto

- Numerisches Modell des Busses:

Das numerische Modell wurde mit dem Programm Matlab Simulink erstellt. Es stellt das Verhaltensmodell des Fahrzeugs während seines täglichen Betriebs dar: Entladung während der Fahrt und Ladung an der Ladestation. Als Ladestrategie wurde eine gemischte Strategie gewählt: Nachtladung im Depot und Gelegenheitsladung während der Fahrpausen am Bahnhof (Schnellladung). Ein Ergebnisbeispiel aus dem Modell ist in Abbildung 2 dargestellt. Die blaue Kurve zeigt das Verhalten des Batterieladezustands während des Tages und auf verschiedenen Linien. Diese sind durch vertikale rote und schwarze Abtrennungen unterteilt.

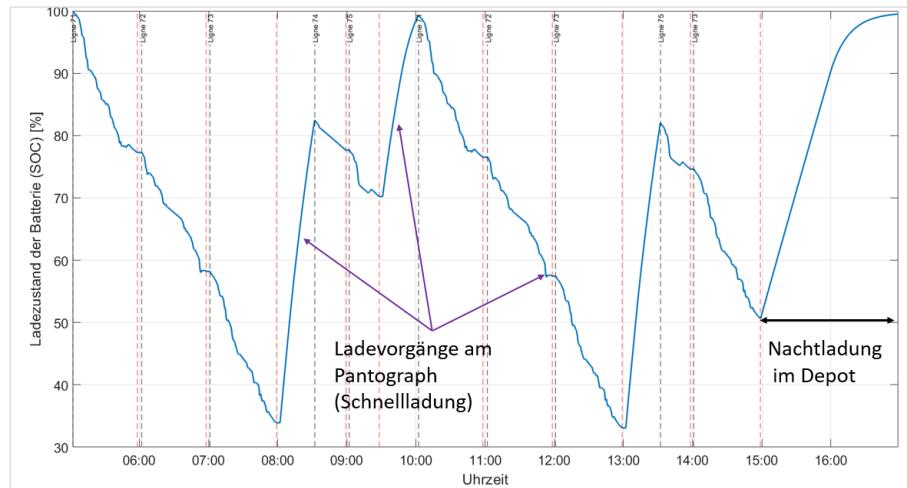


Bild 2 Ergebnis numerisches Modell: Lade- und Entladekurve während des täglichen Busbetriebs, Bus eCitaro 196 kWh

Zur Bestätigung der Ergebnisse aus dem Modell wurden die numerischen Resultate (Verbrauch der Busse) mit mehreren Werten aus der Literatur verglichen. Dieser Vergleich wurde unter verschiedenen Wetterbedingungen (Kälte und Raumtemperatur) durchgeführt, um so die Modelldarstellung des Heizsystems ebenfalls zu validieren. Um allerdings das „worst-case“-Szenario zu berücksichtigen, wurden die Simulationen mit einer Außentemperatur von -5°C durchgeführt.

- Berechnungen mit Optimierungsalgorithmen:

Der Optimierungsalgorithmus wurde mit dem Programm Python erstellt. Dieser verwendet die Resultate des numerischen Modells, um die gesamte Flotte samt Infrastruktur optimal zu dimensionieren. Er liefert die folgenden Informationen: minimale Anzahl der benötigten Fahrzeuge, minimale Anzahl der benötigten Pantographen und täglicher Energieverbrauch aufgrund der zurückgelegten Distanz. Für die Berechnungen wurden zwei Szenarien mit zwei Busmodellen simuliert: eCitaro 12 m, 396 kWh und Sileo S10 m, 225 kWh. Die 18m-Gelenkbusse wurden nicht untersucht, da die Fahrgastzahl zu gering ist, um den Einsatz solcher Fahrzeuge zu rechtfertigen. Abbildung 3 zeigt das graphische Ergebnis für das beste Szenario mit dem 12m-Bus. Darin wird der Batterieladestand in Bezug auf die Uhrzeit dargestellt. Die farbigen Kurven stellen die Lade- und Entladekurven der Fahrzeuge dar, die auf verschiedenen Linien verkehren. Die untere blaue Kurve zeigt den Busbedarf an. Mit anderen Worten handelt es sich um die Anzahl Busse, die im Verlauf des Tages gleichzeitig im Einsatz sind. Die untere violette Kurve schliesslich stellt die Verfügbarkeit der Pantographen am Bahnhof dar. Neben der Grafik sind die numerischen Resultate der Optimierung aufgelistet.

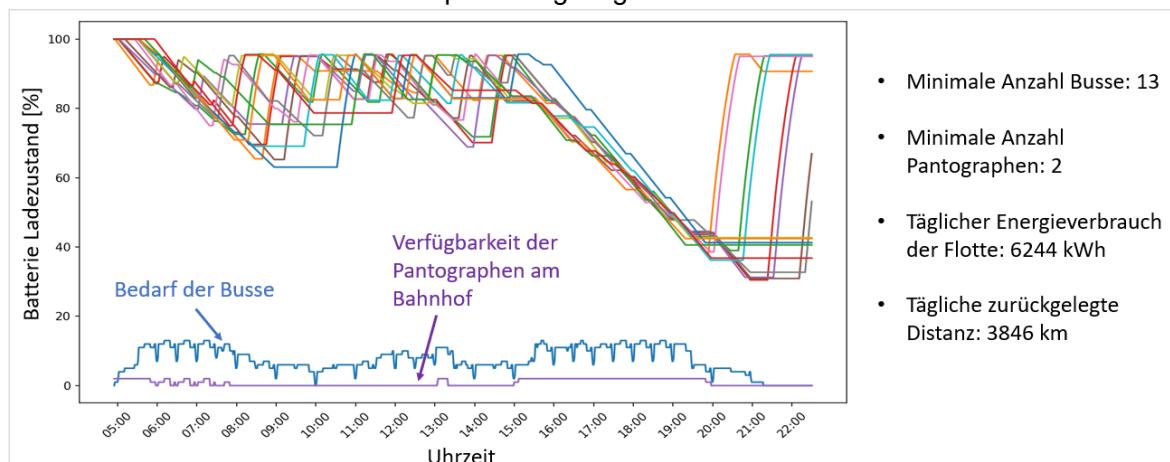


Bild 3 Graphische Darstellung des Results aus dem Optimierungsprogramm: Szenario mit 12m-Bus

- Kosten und Energiebilanz:

Nach erfolgter Optimierung der Flotte wurden Kosten- und Energiebilanzen erstellt. Dabei wurden mehrere Bustechnologien samt zugehöriger Infrastruktur berücksichtigt: Diesel, Elektrobusse, Naturgas, Naturgas mit 20% Biogas und Wasserstoffbusse. In jeder Variante wurde die optimierte Anzahl Fahrzeuge im 12m-Busse Szenario als Referenz eingesetzt. Für die Elektrobusse wurden jedoch die Resultate im Szenario mit 10m-Busse ebenfalls berücksichtigt. Tabelle 3 zeigt die ermittelten Ergebnisse. Für einen äquivalenten Vergleich wurde bei der derzeitigen Dieselvariante die Mineralölsteuer von den Energiekosten abgezogen (zweite Linie). Die Kostenbilanz enthält die jährlichen Fahrzeug- und Infrastrukturstarkosten, wobei die ersten aus Bus-, Instandhaltungs- und Energiekosten bestehen. Dabei wird angenommen, dass der notwendige Treibstoff (elektrische Energie, Wasserstoff oder Naturgas) bei Lieferanten eingekauft wird. Für die Analyse der Energiebilanz wurde in jeder Variante die jährliche CO₂-Belastung berechnet. Hervorzuheben ist, dass diese Belastung blos den Energieverbrauch, aber nicht die graue Energie des Lebenszyklus der Produkte (Herstellung, Transport, Lagerung, ...) berücksichtigt.

	Anzahl nötige Fahrzeuge	Fahrzeugkosten			Infrastrukturstarkosten		Kostenbilanz: gesamtpreis	Energiebilanz: CO₂ Belastung¹
		Kosten Fahrzeuge mit Abschreibung ²	Kosten Instandhaltung ³	Energiekosten ⁴	Kosten Ladestationen Depot mit Abschreibung (Füllungsstation für H ₂)	Kosten Pantographen mit Abschreibung		
	-	CHF/Jahr			CHF/Jahr		CHF/Jahr	Tonnen/Jahr
Diesel	13	570 000 (12 und 10)	858 721	919 581	-	-	2 348 302	1 428
Diesel (Referenz) Ohne Steuer 0.7957 CHF/l		570 000 (12 et 10)	858 721	489 163	-	-	1 917 884	1 428
Naturgas		647 833 (12)	842 274	640 998	-	-	2 131 106	1 118
Naturgas 20% Biogas		647 833 (12)	842 274	640 998	-	-	2 131 106	894
Elektrobus 12m		682 500 (12)	631 706	458 091	34 167 (15)	47 333 (15)	1 853 797	292
Elektrobus 10m		16	816 000 (10)	631 706	397 125	34 167 (15)	66 000 (15)	1 944 997
Wasserstoffbus	13	866 667 (12)	631 706	904 634	311 805 ⁵ (20)	-	2 714 811	Kein Wert

Tabelle 3 Jährliche Kosten- und Energiebilanz der verschiedenen Technologien. Treibstoff wird bei Lieferanten eingekauft

Die Werte in Tabelle 3 zeigen, dass, ausser der teuersten Variante mit Wasserstoff, alle andere Möglichkeiten in die gleiche Kosten-Grössenordnung fallen und umweltfreundlicher sind als die derzeitige Dieselvariante. Aufgrund der verwendeten Daten zeigt diese Bilanz, dass aus wirtschaftlicher und ökologischer Sicht die elektrische Variante (Konfiguration mit 13 12m-Bussen) die beste Lösung für die Gemeinde Porrentruy darstellt. Eine abschliessende Beschlussfassung muss jedoch durch weitere eingehendere Studien bestätigt werden. Die Kosten hängen nämlich sehr von den eingesetzten Preisen ab. Deshalb müssen sie in den Einzelheiten geprüft werden, um die aktuellen Unsicherheiten zu verringern und dann eine präzisere Einschätzung zu ermöglichen. Um die Energiebilanz auf den Lebenszyklus eines Produkts auszudehnen, muss die CO₂-Belastung auch die graue Energie mitberücksichtigen. Und schliesslich besteht ein weiterer Vorteil der elektrischen Lösung in der Verringerung der Lärmbelästigung.

¹ Diesel : 2.64 kg CO₂/l_{diesel}, Elektrobusse und Wasserstoff : 128 g CO₂/kWh, 2.79 kg CO₂/kg_{cng}

² Berücksichtigte Abschreibungsduer sind im Klammern neben den Kosten gegeben (in Jahren)

³ Elektrobusse und Wasserstoff: 0.45 CHF/km, Diesel und Naturgas: 0.60 CHF/km

⁴ Elektrobusse: 0.201 CHF/kWh, Diesel: 1.74 CHF/l mit Bedarf 1482 l Diesel pro Tag, Naturgas: 1.60 CHF/kg mit Bedarf 1098 kg Naturgas pro Tag, Wasserstoff: 9.30 CHF/kg_{H2} mit Bedarf 266.5 kg_{H2}/Tag (Verbrauch 7 kg_{H2}/100km)

⁵ Preis basiert sich auf den Angaben einer betriebenen Wasserstoffstation in Pau (4.5 Mio Eur, für 200 kg_{H2}/Tag)

- Lösungen für Energieerzeugung:

Die letzte Analyse betrifft die Studie zur Energieautonomie, die erlauben soll, die Fahrzeuge zu betreiben ohne Energie bei Lieferanten einzukaufen. Deshalb wurden in Porrentruy verschiedene Energieerzeugungsmöglichkeiten mit Sonnenkollektoren untersucht. Für diese Analyse wurden die jährliche Erzeugungsdaten eines bestehenden Solarkraftwerks in Neuchâtel als Referenz herangezogen. Insgesamt wurden drei Varianten untersucht:

- Gleichwertige Erzeugung: Erzeugung des Energieverbrauchs mit Sonnenkollektoren in Porrentruy
- Erzeugung der elektrischen Energie mit Sonnenkollektoren in Porrentruy und Speicherung in Batterien. Zwei Speicherzellentechnologien wurden untersucht: NMC und Li-Ti
- Wasserstofferzeugung mit Sonnenenergie (Wasserelektrolyse) und Speicherung in einem Wasserstoffbehälter

Die Ergebnisse dieser Energieanalyse sind in der Tabelle 4 dargestellt. Darin sind für jede Variante immer die jährlichen Kosten geteilt durch Fahrzeug- und Infrastrukturstarkosten sowie die Energiebilanz aus der CO₂-Belastung angegeben (wobei nur der Energieverbrauch berücksichtigt ist). In dieser Studie wurde nur das Szenario mit den 12m-Bussen berücksichtigt. Die negativen Werte entsprechen der erzeugten Energie, die verkauft werden kann.

	Fahrzeugkosten			Infrastrukturstarkosten					Kostenbilanz: gesamtpreis	Energiebilanz: CO₂ Belastung
	Kosten für die 12m Busse (13 Fahrzeuge)	Kosten Instandhaltung	Energiekosten	Kosten Solaraktivität (Abschreibung 20 Jahren)	Speicherungskosten mit Abschreibung ¹	Kosten Wasserstoffstation (Abschreibung 20 Jahren)	Kosten Ladestationen im Depot	Kosten Pantographen		
	CHF/Jahr			CHF/Jahr					CHF/Jahr	Tonnen/Jahr
Diesel	570 000	858 721	919 581	-	-	-	-	-	2 348 302	1 428
Diesel (Referenz) Ohne Steuer 0.7957 CHF/l	570 000	858 721	489 163	-	-	-	-	-	1 917 884	1 428
Naturgas 20% Biogas	647 833	842 274	640 998	-	-	-	-	-	2 131 106	894
Elektrobusse (eingekaufte Energie)	682 500	631 706	458 091	-	-	-	34 167	47 333	1 853 797	292
Elektrobusse (Gleichwertige Erzeugung)	682 500	631 706	191 222	65 702	-	-	34 167	47 333	1 652 630	203
Elektrobusse (Speicherung im NMC-Batterien)	682 500	631 706	-420 825	216 600	132 130	-	34 167	47 333	1 323 610	0
Elektrobusse (Speicherung im Li-Ti-Batterien)	682 500	631 706	-420 825	216 600	217 200	-	34 167	47 333	1 408 680	0
Wasserstoff: Verbrauch von Netzenergie	866 667	631 706	904 634	-	-	311 805	-	-	2 714 811	732
Wasserstoff: H ₂ -Erzeugung durch Sonnenkollektoren	866 667	631 706	-54 055	216 600	12 160	311 805	-	-	1 984 883	0

Tabelle 4 Ermittelte jährliche Kosten- und Energiebilanz unter Berücksichtigung verschiedener Energieerzeugungsmethoden

Aus den ermittelten Werten gemäss Tabelle 4 ergibt sich, dass - wenn nur der Betrieb berücksichtigt wird - jede Variante mit alternativem Antriebsystem umweltfreundlicher ist als die derzeitige Diesellosgung. In allen untersuchten verschiedenen Energieerzeugungskonfigurationen sind wirtschaftlich gesehen im Allgemeinen wiederum die Elektrobusse die billigsten. Ebenfalls eine vielversprechende Möglichkeit scheinen in diesem Anwendungsbeispiel Wasserstoffbusse mit Wasserstoffherstellung durch Sonnenkollektoren zu sein, mit Kosten, die sich der Referenzvariante Diesel sehr nähern. Hingegen ist die gleiche Treibstoffvariante mit Netzenergieverbrauch die teuerste Option. Folglich scheint es für die Gemeinde Porrentruy derzeit verfrüht, im öffentlichen Verkehrsnetz Wasserstoffbusse samt deren Infrastruktur einzusetzen.

¹ Abschreibungen: NMC: 16 Jahre, Li-Ti: 20 Jahre, H₂: 20 Jahre

Résumé dans une seconde langue nationale (FR)

Conclusion finale

Dans ce projet, plusieurs alternatives de propulsion avec un impact environnemental réduit ont été étudiées pour remplacer les bus diesel actuellement en service sur le réseau de transports publics de la commune de Porrentruy. Les technologies suivantes ont été considérées : Bus électriques, bus au gaz naturel et bus à hydrogène. Les bilans de coûts obtenus (coûts des véhicules, des infrastructures et de l'énergie) montrent que les variantes de systèmes de propulsion alternatifs semblent généralement plus avantageuses. De plus, les bilans énergétiques calculés soulignent que les technologies prises en compte ont moins d'impact sur l'environnement en réduisant les émissions de CO₂ par rapport aux bus diesel. Les deux conclusions de cette analyse montrent et justifient donc la faisabilité du remplacement des bus diesel dans la commune de Porrentruy. Les analyses effectuées dans ce travail montrent également que la variante qui s'adapte le mieux aux besoins de la commune semble être la variante électrique avec des véhicules de 12m. Cependant, cette conclusion doit être confirmée par des études plus approfondies en tenant compte du bilan d'énergie grise et de la fiscalité.

Contexte du projet et problématique

À partir du premier janvier 2018, la nouvelle stratégie énergétique 2050 du Conseil fédéral est mise en place par une loi sur l'énergie. Ces objectifs sont, entre autres, de développer les sources d'énergie renouvelable et d'augmenter l'efficacité énergétique dans des domaines tels que l'industrie, les bâtiments et la mobilité. Actuellement, dans la commune de Porrentruy, le réseau de transports publics mis à disposition de la population est constitué d'une flotte de différents bus diesel de 12 m et 18 m (articulés). L'exploitation quotidienne de ces véhicules a un impact environnemental important avec une consommation d'énergie non renouvelable importante. Par ailleurs, les déplacements dans le centre génèrent des nuisances sonores non négligeables pour les habitants. Afin de suivre la stratégie énergétique de la Confédération, la commune de Porrentruy souhaite donc remplacer les bus diesel actuels par des véhicules non polluants.

C'est pourquoi la commune de Porrentruy, le canton du Jura et l'Office fédéral des transports (OFT) ont mandaté l'Ecole d'ingénieurs et d'architectes de Fribourg (HEIA-FR) afin de réaliser une étude sur le réseau de transports publics de Porrentruy. L'analyse se base sur des modèles numériques et physiques. Le travail doit fournir objectivement des éléments en termes de coûts et de consommation d'énergie permettant d'argumenter la volonté de la commune de remplacer les bus diesel. Dans ce projet, l'accent des analyses numériques a été mis sur les bus électriques avec l'infrastructure nécessaire (bornes de recharge). Néanmoins, avec les résultats obtenus pour les bus électriques, d'autres analyses et comparaisons ont également été effectuées avec d'autres technologies de bus : Biogaz, Diesel (référence) et Hydrogène. L'examen des différentes technologies de bus doit également permettre de déterminer celle qui s'adapte le mieux aux besoins du réseau de transports publics de la commune de Porrentruy.

Buts du travail

Le travail réalisé dans le cadre de ce projet a quatre objectifs principaux :

1. Construction d'un modèle numérique capable de calculer la consommation énergétique journalière d'un bus sur le réseau de transports publics de la commune de Porrentruy.
2. Développement d'un algorithme d'optimisation numérique. Celui-ci doit optimiser aussi bien la flotte de bus que l'infrastructure nécessaire, selon l'horaire de l'année 2022.
3. Établir une comparaison financière et écologique entre les différentes technologies de bus envisagées. Pour réaliser ce bilan, les résultats de l'algorithme d'optimisation numérique ont été utilisés.
4. Analyse de différentes solutions pour produire l'énergie nécessaire à l'exploitation de la flotte. Dans cette étude, deux aspects ont été considérés : l'aspect financier et l'aspect écologique par l'impact CO₂ de chaque variante.

Afin d'atteindre les quatre objectifs, le projet a été divisé en huit étapes.

Résultats obtenus

- Documentation, infrastructure et bus:

Ces trois premières étapes avaient pour but de trouver les données techniques nécessaires sur les véhicules et l'infrastructure. La définition de ces données était nécessaire pour pouvoir ensuite alimenter les modèles numériques. Les données trouvées se rapportent à différents bus électriques qui sont actuellement en service dans plusieurs villes (Tableau 1).

Numéro	Modèle	Longueur [m]	Energie de la batterie [kWh]
1	Mercedes eCitaro	12	Base : 196 / Grande autonomie : 396
2	Mercedes eCitaroG	18 (articulé)	396
3	Ebusco 2.2	12	Base : 363 / Grande autonomie : 423
4	Sileo S10	10	225

Tableau 1 Modèles des véhicules pour lesquels les données ont été cherchées

Pour chaque véhicule, trois types de données ont été recherchés :

1. Données mécaniques : permettent de calculer les forces de résistance agissant sur le bus.
2. Données électriques : permettent de modéliser le moteur électrique et la batterie.
3. Données auxiliaires : permettent de modéliser le système de chauffage du bus.

Les sources principales étaient les informations des fabricants disponibles sur Internet. En ce qui concerne l'infrastructure, les données nécessaires à la modélisation des stations de recharge ont été recherchées (puissances de recharge et rendements). Deux types de stations de recharge ont été considérés : les pantographes (charge rapide) et les stations de recharge dans les dépôts. Ces dernières ont été prises chez le fabricant ABB Suisse.

- Lignes:

Ici le but était de caractériser les différentes lignes de transport selon l'année 2022 afin de les intégrer dans le modèle numérique. Au total, 9 lignes reliées à la gare ont été considérées. Chaque ligne a été caractérisée par 3 informations : le profil de vitesse du bus, le profil d'altitude et les données des passagers. Ces dernières étaient importantes pour pouvoir tenir compte de l'influence de la charge sur la consommation d'énergie. Les profils de vitesse et d'altitude ont été obtenus à partir de mesures effectuées dans les véhicules. Les informations des passagers ont été traitées à partir des données fournies par CarPostal. Un exemple des résultats obtenus pour la ligne 71 (gare-Fahy) est présenté dans le Tableau 2 sur la Figure 1.

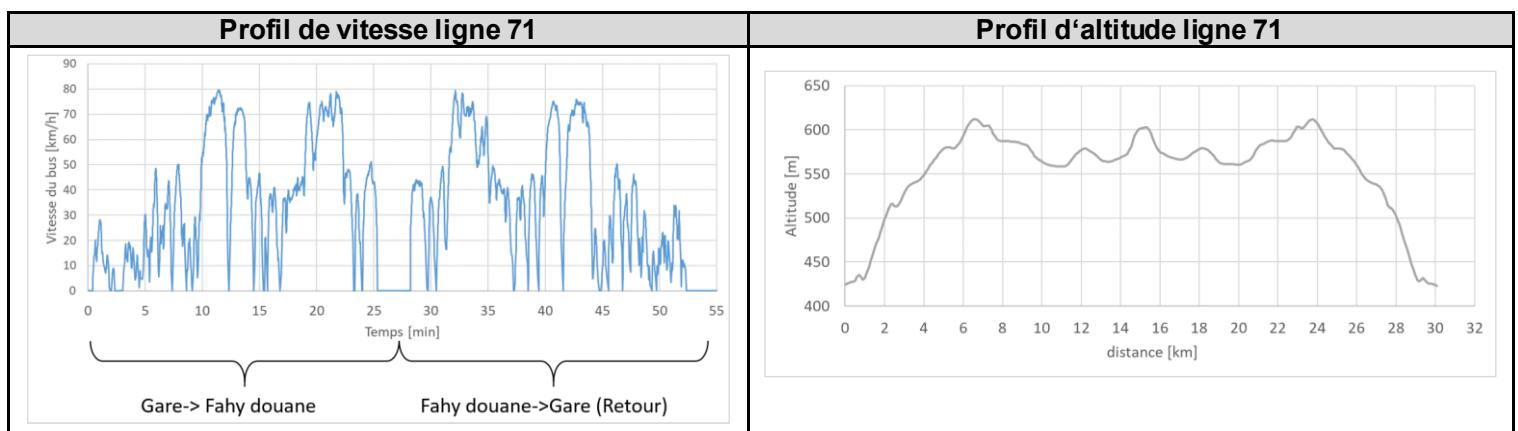


Tableau 2 Ligne 71 : représentation graphique des profils d'altitude et de vitesse mesurés

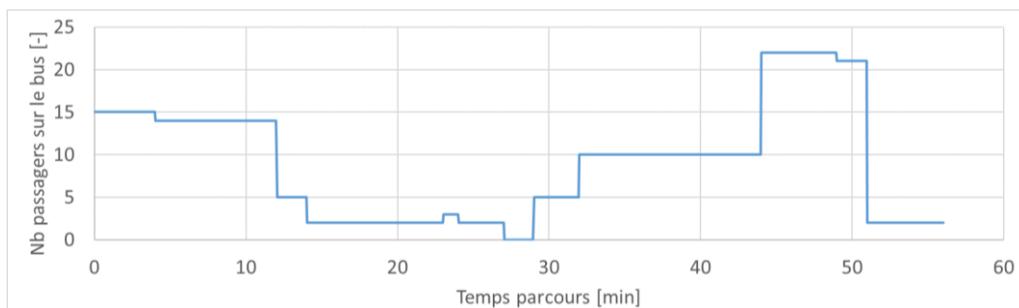


Figure 1 Ligne 71 : données passagers retenues après analyse des données fournies par CarPostal

- Modèle numérique du bus:

Le modèle numérique a été construit avec le programme Matlab Simulink. Il modélise le comportement du véhicule pendant son utilisation quotidienne : processus de déchargements sur les lignes et processus de chargement dans la station de charge. Pour la stratégie de chargement, une stratégie mixte avec chargement de nuit au dépôt et chargement occasionnel pendant les pauses de conduite à la gare (chargement rapide) a été choisie. Un exemple de résultat du modèle est présenté sur la Figure 2. La courbe bleue montre le comportement de la charge de la batterie pendant la journée et sur différentes lignes. Celles-ci sont divisées par les segments verticaux rouges et noirs.

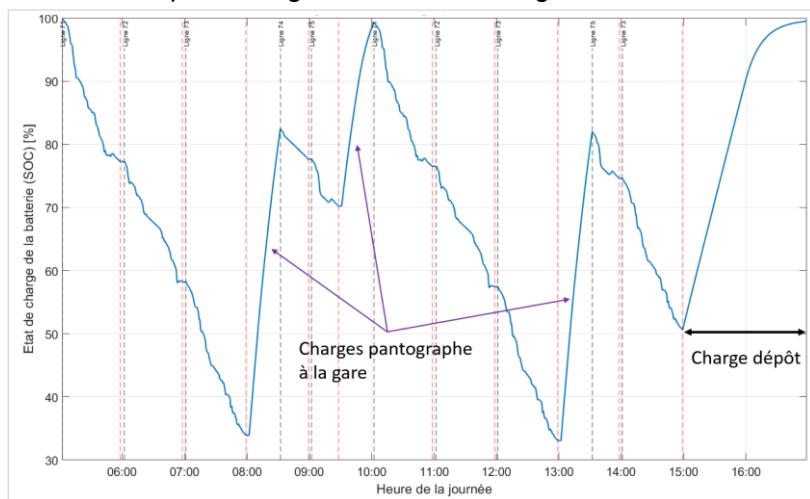


Figure 2 Résultat modèle numérique : courbe charge et décharge pendant utilisation du bus, eCitaro 196 kWh

Afin de confirmer les résultats du modèle, les résultats numériques (consommation des bus) ont été comparés à plusieurs valeurs de la littérature. Cette comparaison a été effectuée dans différentes conditions météorologiques (froid et température ambiante) afin de valider également la modélisation du système de chauffage. Cependant, pour considérer le "pire des cas", les simulations avec l'algorithme d'optimisation ont été faites avec une température extérieure de -5°C.

- Calcul avec algorithme d'optimisation:

L'algorithme d'optimisation a été réalisé avec le programme Python. Celui-ci utilise les résultats du modèle numérique pour dimensionner de manière optimale l'ensemble de la flotte avec l'infrastructure. Il fournit les informations suivantes : nombre minimal de véhicules nécessaires, nombre minimal de pantographes nécessaires et consommation d'énergie quotidienne avec la distance parcourue. Pour les calculs, deux scénarios ont été simulés avec deux modèles de bus : eCitaro 12 m, 396 kWh et Sileo S10 m, 225 kWh. Les bus articulés (18 m) n'ont pas été considérés, car le nombre de passagers n'était pas assez élevé pour justifier ces véhicules. La Figure 3 montre le résultat graphique pour le meilleur scénario avec le bus de 12m. Il s'agit d'une représentation de l'état de charge de la batterie en fonction de l'heure. Les courbes colorées représentent les courbes de charge et de décharge des véhicules qui circulent sur différentes lignes. La courbe bleue inférieure montre le besoin en bus. En d'autres termes, le nombre de bus qui sont en service de manière équilatérale au cours de la journée. Enfin, la courbe violette inférieure représente la disponibilité des pantographes à la gare. À côté de l'image, les résultats numériques de l'optimisation sont listés.

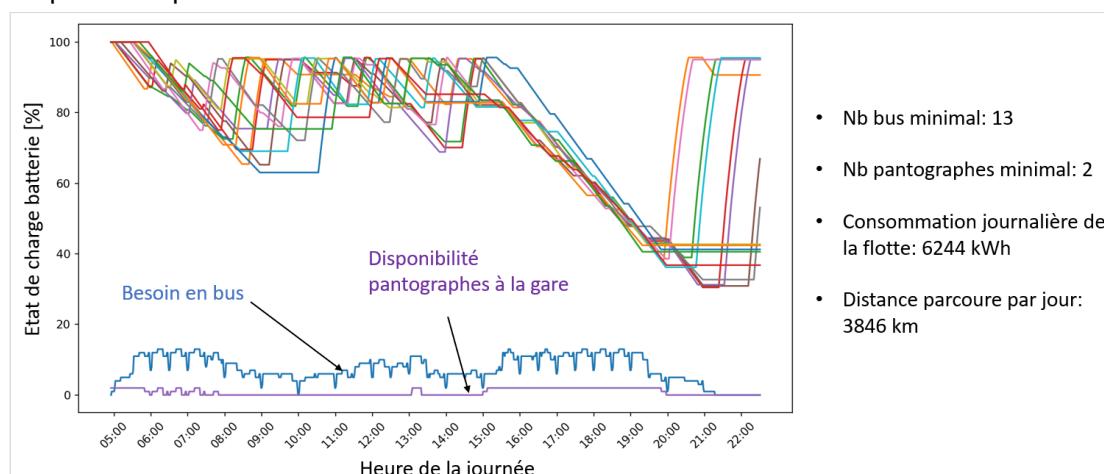


Figure 3 Représentation graphique du résultat du programme d'optimisation: scénario avec bus 12m

- Bilan de coûts et énergétique :

Une fois la flotte optimisée, des bilans sur les coûts et l'énergie ont été réalisés. Ceux-ci tiennent compte de plusieurs technologies de bus avec l'infrastructure correspondante : diesel, bus électriques, gaz naturel, gaz naturel avec 20% de biogaz et bus à hydrogène. Pour chaque variante, le nombre optimisé de véhicules avec le scénario de bus de 12m a été utilisé. Par contre, pour les bus électriques, les résultats pour le scénario avec les bus de 10m ont également été pris en compte. Le Tableau 3 montre les résultats obtenus. Afin de comparer les solutions de manière équivalente, l'impôt sur les huiles minérales a été enlevé de la variante de référence Diesel (deuxième ligne du tableau). Le bilan des coûts comprend les coûts annuels des véhicules et de l'infrastructure, les premiers étant constitués des bus, de la maintenance et des coûts énergétiques, en supposant que le carburant nécessaire (énergie électrique, hydrogène et gaz naturel) est acheté auprès de fournisseurs. Afin d'analyser le bilan énergétique, l'impact CO₂ annuel a été calculé pour l'utilisation de chaque variante. Il est important de souligner que cet impact ne prend en compte que l'utilisation de l'énergie et non l'énergie grise pour le cycle de vie (fabrication, transport, stockage, ...).

Nb véhicules nécessaires	Coûts liés aux véhicules			Coûts infrastructure			Bilan des coûts : Prix total	Bilan énergétique : Émissions CO ₂ ¹
	Prix véhicules avec amortissement ²	Coûts de maintenance ³	Coûts énergétiques ⁴	prix station de charge au dépôt avec amortissement (ou station remplissage H ₂)	Prix pantographes avec amortissement			
	CHF/an	CHF/an	CHF/an	CHF/an	CHF/an			
Diesel	13	570 000 (12 et 10)	858 721	919 581	-	-	2 348 302	1 428
Diesel (Référence) Sans taxe 0.7957 CHF/l		570 000 (12 et 10)	858 721	489 163	-	-	1 917 884	1 428
Gaz naturel		647 833 (12)	842 274	640 998	-	-	2 131 106	1 118
Gaz naturel 20% Biogaz		647 833 (12)	842 274	640 998	-	-	2 131 106	894
Bus électriques 12m		682 500 (12)	631 706	458 091	34 167 (15)	47 333 (15)	1 853 797	292
Bus électriques 10m		816 000 (10)	631 706	397 125	34 167 (15)	66 000 (15)	1 944 997	253
Bus à hydrogène	13	866 667 (12)	631 706	904 634	311 805 ⁵ (20)	-	2 714 811	Pas de valeur

Tableau 3 Bilan annuel coûts et énergie pour différentes technologies. Carburant est acheté aux fournisseurs

Les valeurs obtenues montrent qu'à l'exception de la variante hydrogène, qui est la plus chère, toutes les autres possibilités ont le même ordre de grandeur de prix et elles sont plus écologiques que la variante diesel. Avec les données utilisées, ce bilan montre que la meilleure solution d'un point de vue économique et écologique pour la commune de Porrentruy est la variante électrique (configuration avec 13 bus de 12m). Néanmoins, une prise de décision finale doit être confirmée par d'autres études plus approfondies. En effet, les coûts dépendent beaucoup des tarifs utilisés. Par conséquent, ceux-ci doivent être étudiés plus en détail pour réduire les incertitudes actuelles permettant une estimation plus précise. L'impact CO₂ doit également considérer l'énergie grise afin d'étendre le bilan sur le cycle de vie global du produit et pas à la seule exploitation. Finalement, un autre avantage de la solution électrique est lié aux émissions sonores.

¹ Diesel: 2.64 kg CO₂/l_{diesel}, électrique et hydrogène : 128 g CO₂/kWh, 2.79 kg CO₂/kg_{cng}

² Les temps d'amortissement considérés sont donnés entre parenthèses (en années)

³ Electrique et hydrogène : 0.45 CHF/km, Diesel et gaz naturel : 0.60 CHF/km

⁴ Electrique : 0.201 CHF/kWh, Diesel : 1.74 CHF/l avec consommation de 1482 l/jour, Gas naturel: 1.60 CHF/kg avec consommation de 1098 kg/jour, H₂: 9.30 CHF/kg_{H2} avec 266.5 kg_{H2}/jour (Consommation 7 kg_{H2}/100km)

⁵ Prix se base sur le coût d'une station hydrogène actuellement en service à Pau (4.5 Mio Eur, pour 200 kg_{H2}/jour)

- Solution pour production d'énergie :

La dernière analyse porte sur l'étude d'une autonomie énergétique permettant de faire fonctionner les véhicules sans acheter l'énergie aux fournisseurs. Pour cette raison, différentes possibilités de production d'énergie par des panneaux solaires ont été étudiées à Porrentruy. Pour réaliser cette analyse, les données de production annuelle d'une centrale solaire existante à Neuchâtel ont été prises comme référence. Au total, trois variantes ont été étudiées :

- Production équivalente : production énergie consommée par des cellules solaires à Porrentruy.
- Production d'énergie électrique par des cellules solaires à Porrentruy et stockage dans des batteries. Deux technologies de cellules pour le stockage ont été étudiées : NMC et Li-Ti
- Production d'hydrogène par énergie solaire (électrolyse de l'eau) et stockage dans un réservoir d'hydrogène.

Les résultats de cette analyse énergétique sont présentés dans le Tableau 4. Celui-ci donne toujours les coûts annuels divisés par les coûts des véhicules et de l'infrastructure et le bilan énergétique par l'impact CO₂ pour chaque variante (en considérant uniquement l'utilisation de l'énergie). Pour cette étude, seul le scénario avec les bus de 12m a été pris en compte. Les valeurs négatives correspondent à l'énergie produite qui peut être vendue.

	Coûts liés aux véhicules			Coûts infrastructure					Bilan des coûts: Prix total	Bilan énergétique : Émissions CO ₂
	Prix pour les bus 12m (13 véhicules)	Coûts de maintenance	Coûts liés à l'énergie	Prix centrale solaire (Amortissement 20 ans)	Prix de stockage avec amortissement ¹	Prix station H ₂ (Amortissement sur 20 ans)	Prix stations de charge dépôt	Prix pantographes		
	CHF/an			CHF/an						
Diesel	570 000	858 721	919 581	-	-	-	-	-	2 348 302	1 428
Diesel (Référence) Sans taxe 0.7957 CHF/l	570 000	858 721	489 163	-	-	-	-	-	1 917 884	1 428
Gaz naturel 20% Biogaz	647 833	842 274	640 998	-	-	-	-	-	2 131 106	894
Bus électriques (Énergie achetée)	682 500	631 706	458 091	-	-	-	34 167	47 333	1 853 797	292
Bus électriques (Production équivalente)	682 500	631 706	191 222	65 702	-	-	34 167	47 333	1 652 630	203
Bus électriques (Stockage batteries NMC)	682 500	631 706	-420 825	216 600	132 130	-	34 167	47 333	1 323 610	0
Bus électriques (Stockage batteries Li-Ti)	682 500	631 706	-420 825	216 600	217 200	-	34 167	47 333	1 408 680	0
Hydrogène : utilisation de l'énergie du réseau	866 667	631 706	904 634	-	-	311 805	-	-	2 714 811	732
Hydrogène : H ₂ produit à partir des cellules solaires	866 667	631 706	-54 055	216 600	12 160	311 805	-	-	1 984 883	0

Tableau 4 Coûts obtenus et bilan énergétique annuel en considérant de différentes méthodes de production d'énergie

D'après les valeurs obtenues, on constate que chaque variante avec un système de propulsion alternatif est plus écologique que la solution diesel actuelle si seule l'exploitation est considérée. En ce qui concerne la partie économique, les bus électriques sont généralement encore une fois les moins chers dans toutes les différentes configurations de production d'énergie considérées. Les bus à hydrogène avec production d'hydrogène par cellule solaire semblent également être une option prometteuse pour ce cas d'application avec un prix très proche de la variante Diesel de référence. D'un autre côté, le même carburant, mais dans sa version avec l'utilisation de l'énergie du réseau est la possibilité la plus chère. Actuellement, pour la commune de Porrentruy, il semble par conséquent qu'il soit un peu tôt pour se lancer dans la variante hydrogène avec son infrastructure.

¹ Amortissements considérés : NMC: 16 ans, Li-Ti: 20 ans, H₂ : 20 ans

1 Situation de départ

À partir du 1^{er} janvier 2018 la nouvelle stratégie énergétique 2050 de la confédération est entrée en vigueur au niveau législatif¹. Cette nouvelle loi vise, entre autres, à développer les sources d'énergie renouvelable et accroître l'efficacité énergétique dans l'industrie, les bâtiments et la mobilité. Actuellement, dans la ville de Porrentruy, le réseau des transports publics mis à disposition de la population est équipé d'une flotte des bus diesel ayant un impact important au niveau environnement et énergétique. Afin de suivre la nouvelle stratégie énergétique de la confédération, la municipalité de Porrentruy souhaite donc remplacer sa flotte des bus diesel avec des véhicules équipés d'un système de propulsion avec émissions CO₂ réduites.

Pour cette raison, le district de Porrentruy, la Municipalité de Porrentruy, le canton du Jura et l'office fédéral des transports (OFT) ont mandaté la haute école d'ingénieur de Fribourg (HEIA-FR) pour effectuer une préétude, basée sur des modèles numériques, sur les lignes des transports publics liées à la gare routière de Porrentruy. Cette analyse vise à fournir à la municipalité des éléments objectifs permettant d'argumenter le choix et la volonté de remplacer les véhicules diesel. Dans le cadre de ce travail, l'accent a été mis sur des bus à propulsion 100% électrique en considérant l'infrastructure nécessaire à l'utilisation de ce type de véhicules (station de charge). Néanmoins, sur la base des résultats obtenus pour les bus électriques, une comparaison avec d'autres technologies telles que l'hydrogène, le biogaz et le diesel (technologie de référence) ont été réalisés afin de définir au niveau financier et énergétique la technologie potentiellement plus convenable aux besoins de la gare routière de Porrentruy.

Afin d'obtenir les informations concernant les lignes, les véhicules et l'infrastructure à considérer dans l'étude et nécessaires à la construction des modèles numériques, une collaboration avec CarPostal a été réalisée dans le cadre de ce travail.

2 Objectifs du travail

Les objectifs du travail réalisé dans le cadre de ce projet étaient les suivants :

- Le premier objectif s'est porté sur la construction d'un modèle numérique permettant de prédire le besoin énergétique d'un bus pour une utilisation journalière sur le réseau des transports publics à Porrentruy.
- Le deuxième but s'est concentré sur la création d'un algorithme numérique d'optimisation permettant, par rapport au plan horaire de l'année 2022 et sur la base des résultats fournis par le premier modèle, d'optimiser le nombre des bus et l'infrastructure nécessaire à remplir les besoins journaliers de la commune.
- Le troisième objectif visait, sur la base des résultats livrés par l'algorithme d'optimisation, à comparer au niveau financier et écologique différentes technologies de bus (100% électrique, hydrogène, gaz naturel et Diesel) pour fournir à la commune des résultats permettant d'argumenter et justifier le choix d'une technologie de bus pour le remplacement du bus diesel utilisés actuellement.
- Le quatrième but portait sur une étude liée à différentes solutions de production d'énergie sur site pour avoir l'autonomie énergétique nécessaire à faire fonctionner les véhicules (bus). Dans cette analyse deux aspects ont été considérés afin d'évaluer les différentes variantes ; l'aspect financier et celui écologique avec l'impact CO₂.

¹ [Was ist die Energiestrategie 2050? \(admin.ch\)](#) (24.08.22)

3 Approche adoptée et état des connaissances actuelles

3.1 Approche de résolution

Afin d'atteindre les quatre objectifs mentionnés dans le point précédent, comme approche de résolution le projet a été structuré en huit work-packages (WP) différents. Ceux-ci sont listés dans l'ordre chronologique dans le tableau suivant avec la liste des délivrables et les ressources qui ont été nécessaires afin de les atteindre.

Numéro	Nom	Délivrables	Ressource(s) utilisée(s)
WP1	Documentation	Informations techniques liées à différents types des véhicules	Données fournies par CarPostal et données fabricants
WP2	Infrastructure	Informations liées à l'infrastructure nécessaire au fonctionnement des nouveaux systèmes de propulsion	Données fournies par CarPostal et données fabricants
WP3	Véhicules	Création d'une base de données des véhicules existants	Données récoltées en WP1
WP4	Routes	Création des profils de parcours des lignes	Données passagers, plan horaire 2022
WP5	Modèle numérique	Modèle numérique simulant le service d'un bus sur le réseau des transports publics de la ville de Porrentruy : phases de charge et décharge	Programme Matlab/Simulink
WP6	Calculs	Algorithme d'optimisation permettant de dimensionner la flotte de bus nécessaire à remplir les besoins de la commune	Programme Python
WP7	Évaluation des coûts	Calcul des coûts d'infrastructures, des véhicules et d'exploitation pour chaque technologie considérée (Diesel, 100% électrique, Hydrogène et CNG)	Données et tarif fournis par CarPostal et informations trouvées sur internet
WP8	Production d'énergie et bilan énergétique	Évaluation de différentes méthodes de production d'énergie avec un bilan économique et écologique	Données disponibles pour des installations existantes

Tableau 5 Approche de résolution adaptée dans le cadre du projet : huit work-packages ont été établis afin d'atteindre les objectifs du travail

3.2 État des connaissances actuelles

Ces dernières années, avec le changement climatique que nous vivons, le problème énergétique lié à la mobilité est devenu une thématique importante de recherche dans différents pays Européennes. En effet, depuis environ 12 ans, plusieurs villes ont montré la volonté de changer le système de propulsion des véhicules de transports publics en privilégiant des solutions avec émissions CO₂ réduites par rapport aux véhicules diesel classiques. Ceci est motivé par la volonté commune de plusieurs pays de réduire drastiquement dans les prochaines années les émissions CO₂. En général, les technologies alternatives les plus exploitées dans ces analyses sont l'hybride, l'électrique, les systèmes avec des biocarburants gazeux (biogaz et gaz naturel) et, pour terminer, l'hydrogène [1]. Dans la littérature différents exemples peuvent être trouvés montrant le potentiel de ces technologies dans différentes régions.

La solution électrique consiste à utiliser des véhicules entraînés par un moteur électrique qui est alimenté par une batterie généralement au lithium. Selon la capacité des batteries et la typologie des parcours (lignes), ces véhicules peuvent être chargés de manière classique à un dépôt en dehors des heures de service, ou, pendant la journée, sur des installations de charge rapide à haute puissance (pantographes) qui peuvent être installées comme station de recharge sur les lignes. Cette variante est une des premières qui a été développée dans le cadre de la mobilité durable et, aujourd'hui, beaucoup de fabricants proposent des bus électriques sur le marché (Man, Mercedes, Ebusco, Sileo, Volvo

etc). En ce qui concerne l'exploitation de ces véhicules, différentes études ont été réalisées. Dans le cadre du projet ZeEUS, documenté en [1], entre 2013 et 2017 plusieurs essais ont été réalisés dans différentes villes Européennes en proposant plusieurs modèles de véhicules. Une autre étude similaire a été conduite en [2] dans lequel plusieurs types d'infrastructures ont été installées dans différentes régions d'Allemagne avec différentes stratégies de charge. En Suisse cette technologie est également très exploitée avec plusieurs types de véhicules à propulsion électrique en service dans différentes régions (Zürich, Brugg, Bern, Luzern, Genève, Jura, Sarnen et Saas Fee pour en citer quelques-unes). En ce qui concerne la partie économique, des études de marchés avec des analyses de coûts liés à l'exploitation de ces types de véhicules et de l'infrastructure nécessaire sont proposées en [3] et [4]. En générale, aujourd'hui, la plus grande limitation liée aux bus électriques en service reste leur faible autonomie due à la batterie qui, souvent, nécessite une infrastructure importante (bornes de charge rapide) et donc des coûts importants.

La variante à hydrogène permet deux différentes possibilités pour utiliser ce gaz comme carburant. Soit il est employé directement dans un moteur thermique classique, ou il est utilisé pour alimenter un moteur électrique via le processus électrochimique qui permet de transformer le gaz en électricité (pile à combustible) [5]. La recharge des véhicules est faite dans des stations de recharge d'hydrogène. Même si par rapport à l'électrique, il y a actuellement moins de fabricants proposant des bus à hydrogène [4], il s'agit d'une variante qui est en train d'être développée très rapidement ces dernières années. En Allemagne, par exemple, dans le cadre du projet [2], des véhicules à hydrogène de 12m et 18m (articulés) ont été installés dans les régions de Frankfurt, Cologne, Wuppertal et Mainz, alors que l'étude documentée en [6] analyse la faisabilité d'installer ces types de véhicules dans les lignes de la région du Steinburg–Dithmarschen Sud. Pour les transports publics en Suisse, le potentiel de cette technologie comme carburant alternatif renouvelable est étudié en [5] et [7]. En [5] son potentiel est mise en évidence pour de longues distances journalières (>250 km) ou des dénivélés importants. L'étude en [7] montre en revanche la faisabilité technique et économique d'utiliser des bus équipés d'un moteur thermique à combustion alimenté à hydrogène à la place du diesel. Les principales raisons qui aujourd'hui limitent l'application de ces véhicules à la place des bus diesel sont liées à la sécurité (inflammabilité du gaz) et à l'efficacité énergétique globale. En effet, le rendement de la production d'hydrogène vert est faible [5].

Dans les solutions avec des biocarburants (gaz naturel compressé et biogaz) le gaz, un mélange de méthane et d'autres gaz inertes, est stocké sous pression dans le véhicule, il est utilisé dans un moteur thermique à la place du carburant Diesel. La recharge se fait dans des stations à gaz. Aujourd'hui différents fabricants proposent des bus à propulsion CNG (Iveco, Man, Mercedes, Solaris, Volvo ... etc) [8] et plusieurs pays ont décidé d'utiliser ce type de technologie dans leurs transports publics ; en Allemagne, dans la région de Berlin, 110 Bus au biogaz vont être installés alors qu'en Italie un total de 800 bus CNG vont entrer en service¹. En France et en Espagne, des investissements similaires ont été réalisés dans les villes de Lille et Barcelone². En Suisse, approximativement 20% du gaz naturel compressé est basé sur de l'énergie renouvelable (biogaz) ce qui réduit d'environ 30%-35% les émissions CO₂ par rapport au diesel [9]. Les désavantages principaux de la technologie CNG sont liés à l'approvisionnement de gaz dans le contexte géopolitique actuel. En effet, en Suisse, la grande partie du CNG est importée. D'autre part, les nuisances sonores sont semblables à celles des moteurs Diesel.

¹ [Des bus au biogaz pour des TP propres | CNG-Mobility](#) (22.08.22)

² [3 Villes où Circulent des Autobus au Gaz Naturel Comprimé | EBI \(ebigaznaturel.com\)](#) (22.08.22)

4 Résultats obtenus pour les différentes étapes et discussions

Dans cette section, les résultats principaux obtenus pour chaque étape du projet sont exposés. Il est important de mentionner que des compléments liés aux démarches et aux méthodologies adaptées peuvent être trouvés dans le rapport technique qui a été rédigé dans le cadre de ce projet pour la commune de Porrentruy, le canton du Jura et CarPostal. Il est mis en référence en [10].

4.1 Recherche des données techniques

Dans ce premier sous-chapitre, les résultats des recherches effectuées afin de caractériser techniquement les véhicules (bus) et l'infrastructure nécessaire seront présentés. La définition de ces données a été fondamentale afin de pouvoir alimenter les modèles numériques utilisés par la suite pour faire les calculs. Les données récoltées concernent des véhicules à propulsion purement électrique et considèrent différents modèles et tailles de bus. En effet, les calculs des coûts et énergétiques pour les autres technologies à émissions réduites (CNG et hydrogène) se sont basés sur des équivalences effectuées à partir des résultats obtenus pour la solution électrique.

4.1.1 Données des véhicules

Pour chaque bus, les paramètres cherchés ont été divisés en trois familles : données mécaniques, électriques et auxiliaires. Ces informations ont été trouvées principalement grâce aux informations des fabricants mises à disposition sur internet à travers des fiches techniques et des études disponibles dans la littérature. Il est important de préciser qu'il est impossible de caractériser de manière précise chaque modèle de bus, car différentes données souhaitées ne sont pas disponibles. Pour cette raison pour certains paramètres, des hypothèses simplificatrices ont été établies. Celles-ci seront également mentionnées et motivées dans la suite du chapitre. Au total, quatre bus ont été caractérisés. Ceux-ci sont listés dans le tableau suivant.

Nombre	Modèle bus	Taille (longueur) [m]	Energie stockée dans batterie [kWh]
1	Mercedes eCitaro	12	Base : 196 / longue autonomie : 396
2	Mercedes eCitaro	18 (articulé)	396
3	Ebusco 2.2	12	Base : 363 / longue autonomie : 423
4	Sileo S10	10	225

Tableau 6 Bus considérés dans la recherche des données

Les quatre modèles mentionnés dans le Tableau 6 ont été choisis pour des raisons différentes. Les modèles Mercedes eCitaro ont été considérés puisqu'ils sont du même fabricant de bus employés actuellement par CarPostal à Porrentruy (bus diesel). Les deux versions Ebusco ont été sélectionnées, car déjà utilisées en Suisse par CarPostal à Saas-Fee¹. Finalement, le modèle Sileo, a été choisi afin de considérer dans l'étude un bus de taille plus petite (10 m). En effet, les deux autres modèles proposent seulement des bus de 12m et 18m. Comme le centre de la commune est caractérisé par des routes étroites, des bus plus petits étaient donc pertinents pour cette étude.

Données mécaniques

Ces paramètres sont nécessaires afin de définir dans le modèle numérique les forces de résistance agissant sur le bus pendant son mouvement : force de résistance aérodynamique, force de résistance au roulement et force de résistance due à la pente de la route. Le Tableau 7 mentionne les différents paramètres faisant partie des données mécaniques. Pour chaque paramètre, les hypothèses simplificatrices qui ont été définies sont aussi listées dans la dernière colonne.

Nb	Paramètre	Unité	Hypothèses simplificatrices établies
1	Masse à vide du bus	kg	-
2	Surface projetée du bus	m ²	-
3	Inertie des éléments tournants	kg · m ²	Seulement roues et arbre moteur considérés
4	Coefficient de résistance au roulement des pneus	-	Valeur constante de 0.01
5	Coefficient de résistance aérodynamique	-	Valeur constante de 0.5
6	Rendement transmission (réducteur)	-	Valeur constante de 0.97
7	Rapport de réduction total moteur – roue	-	-
8	Diamètre des roues	m	-

Tableau 7 Données mécaniques recherchées pour chaque bus considéré dans l'étude

¹ PostAuto-Busse in Saas-Fee, Schweiz - Ebusco® (16.03.22)

Comme mentionné dans l'étude [11], le coefficient de résistance au roulement varie avec la vitesse du véhicule, la pression des pneus, la température et l'état de surface de la route. Ces facteurs nécessitent des analyses (mesures) supplémentaires pas faisables dans le cadre de cette étude pour les répliquer correctement dans le modèle. Donc une hypothèse a été faite de prendre une valeur constante de 0.01 [-]. Selon [12], cette valeur est représentative pour une roue de camion sur de l'asphalte. Le coefficient de résistance aérodynamique a été défini sur la base des valeurs fournies en [13] et a été gardé constant pour chaque modèle de bus considéré. Finalement, pour le rendement de la transmission, une valeur constante pour chaque bus a été utilisée. En effet, ce paramètre n'est pas fourni par les fabricants. En s'agissant d'un entraînement électrique sans boîte à vitesse, la transmission est généralement composée par un réducteur et un différentiel. C'est la raison pour laquelle une seule valeur de rendement élevée de 0.97 [-] a été considérée dans cette étude.

Données électriques

Les données électriques comprennent toutes les caractéristiques nécessaires à caractériser le moteur d'entraînement, la batterie et l'électronique de puissance d'un bus à propulsion électrique. Ces paramètres sont listés dans le Tableau 8 avec toujours les respectives hypothèses.

Nb	Paramètre	Unité	Hypothèses simplificatrices établies
1	Énergie nominale stockée dans la batterie	kWh	-
2	Tension nominale de la batterie	V	-
3	Rendement onduleur AC/DC	-	Valeur constante de 0.95 identique pour chaque bus
4	Rendement convertisseur DC/DC	-	Valeur constante de 0.96 identique pour chaque bus
5	Nombre de modules de la batterie	-	-
6	Nombre de cellules dans un module	-	-
7	Couple maximal du moteur	Nm	-
8	Régime maximal du moteur	min ⁻¹	-
9	Puissance maximale du moteur	W	-
10	Rendement du moteur	-	Donnée sous forme de cartographie de rendement, identique pour chaque bus
11	Tension en circuit ouvert de la batterie	V	<ul style="list-style-type: none"> • Données différencierées selon la technologie de batterie utilisée • Effets vieillissement et température pas considérés
12	Résistance interne de la batterie	Ω	

Tableau 8 Données électriques recherchées pour chaque bus considéré dans l'étude

Les rendements de l'onduleur et le convertisseur permettent de définir l'efficacité de l'électronique de puissance faisant le pont entre la batterie et les différents agrégats (moteurs, système de chauffage et composants à baisse tension). Les valeurs mentionnées dans le Tableau 8 ont été prises depuis [14] et elles ont été gardées constantes pour chaque bus caractérisé. À différence de l'électronique de puissance, le rendement du moteur n'a pas été considéré constant et il a été donné sous forme de cartographie de rendement. En revanche, la cartographie du rendement du moteur pour chaque bus est une information qui n'est pas disponible sur internet. Pour ce faire, la cartographie a été construite par itérations sur la base de certaines valeurs trouvées pour des voitures électriques. Les résultats de ces études ont permis d'obtenir la cartographie illustrée sur la Figure 4.

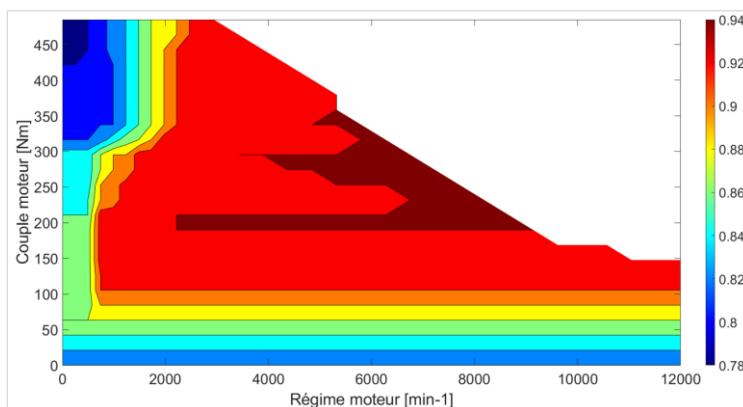


Figure 4 Cartographie de rendement du moteur créé dans le cadre de ce travail, exemple pour bus eCitaro

Pour compléter les données électriques, les paramètres 11 et 12 servent à caractériser les propriétés d'une cellule de la batterie. Les caractéristiques considérées sont la tension en circuit ouvert (OCV) et sa résistance interne. Elles permettent de décrire le comportement de la batterie selon son état de charge. Les recherches effectuées sur les différents bus ont permis d'identifier qu'il y a principalement 2 types de batteries au lithium employées par les différents fabricants. Celles-ci se différencient par le matériau utilisé pour la cathode :

- Batterie au Lithium avec cathode en Nickel Manganèse Cobalt (NMC)
- Batterie au Lithium avec cathode en Lithium Fer et Phosphate (LFP)

Une différence importante entre ces deux types de batteries consiste dans l'allure de la courbe de décharge de la tension en circuit ouvert (OCV). En effet, les batteries au NMC présentent une tension nominale plus élevée et une grande variation de la tension à circuit ouvert selon l'état de charge. Au contraire, celles au LFP, sont caractérisées par une tension nominale plus faible et une courbe de décharge très plate sur une grande plage d'état de charge¹. Sur la base de ces informations, une différence a été donc faite selon le type de batterie utilisée pour chaque type de bus. Le Tableau 9, image du haut, montre, pour les deux technologies considérées, le comportement de la tension en circuit ouvert en fonction de l'état de charge de la cellule. Ces courbes ne concernent pas une batterie d'un bus en particulier. En effet ces informations n'ont pas été trouvées pour les bus caractérisés. Les valeurs ont été donc prises à partir des mesures disponibles dans des publications. La courbe pour une cellule LFP a été extrapolée depuis l'étude [15]. La courbe pour une cellule NMC a été prise depuis l'étude réalisée en [16]. Ces courbes ont été gardées identiques pour chacun des bus.

Pour la résistance interne, la même approche a été utilisée. Le comportement de la résistance interne selon l'état de charge de la batterie a été donc établi sur la base des mesures effectuées sur des cellules ayant la même technologie. Le Tableau 9, figure en bas, montre les courbes qui ont été employées pour la base des données. Ces valeurs ont été prises depuis l'étude disponible en [16].

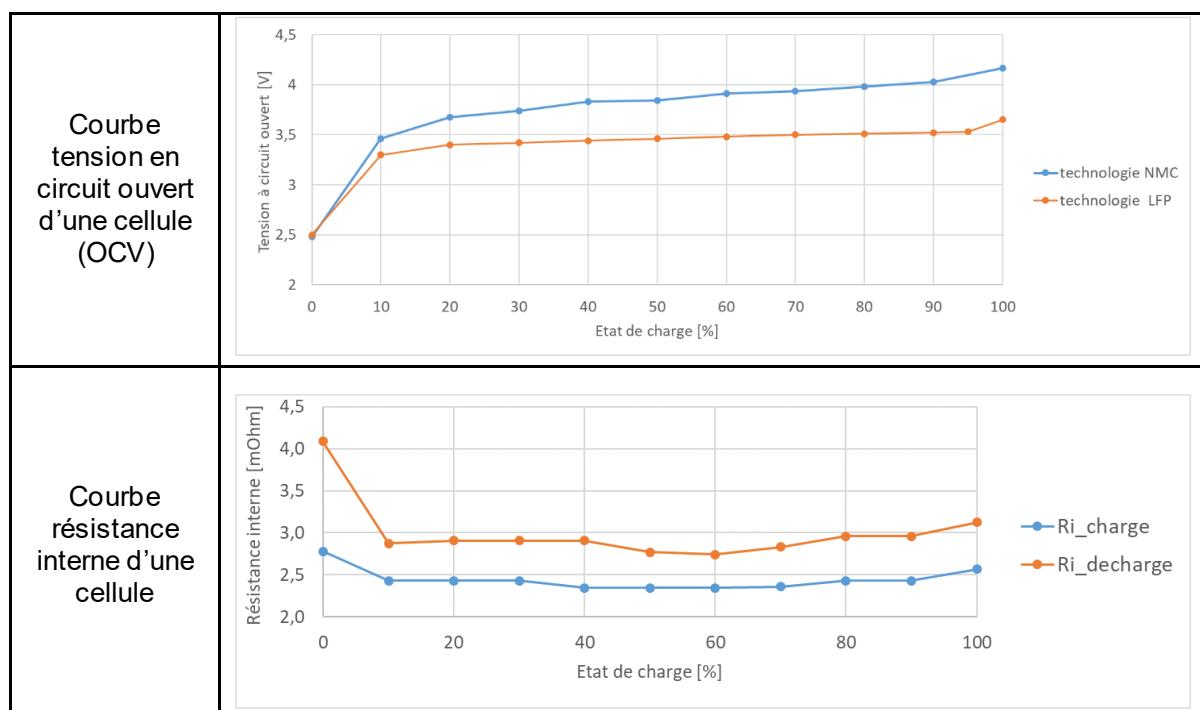


Tableau 9 Représentation des courbes permettant dans le modèle de modéliser le comportement d'une cellule de la batterie en fonction de son état de charge

Les courbes caractéristiques de la cellule présentées ci-dessus varient aussi en fonction de la température, du taux de décharge et du vieillissement. En revanche ces effets n'ont pas été considérés dans cette étude.

¹ [BU-205: Types of Lithium-ion - Battery University](#) (16.03.22)

Données auxiliaires

Le troisième type de donnée concerne les informations liées à la consommation du système de chauffage. En effet, celle-ci affecte beaucoup la consommation totale du bus. Une modélisation réaliste du comportement thermique du bus pendant le tracé nécessite cependant des mesures et un modèle thermique qui n'était pas réalisable dans le cadre du projet. Il a donc été décidé d'utiliser une approche simplifiée avec une consommation constante. L'objectif était de caractériser la consommation du système de climatisation/chauffage en fonction de la température extérieure. Ces informations ont été étudiées en détail pour des voitures électriques dans le cadre d'un autre projet lié à la modélisation des véhicules à propulsion électrique documenté en [17].

Afin d'obtenir ces informations pour les différents bus, la démarche suivante a été utilisée. Comme la consommation du système de climatisation est directement liée à la taille de l'espace à chauffer, ou refroidir, les valeurs trouvées pour les voitures électriques ont été utilisées et elles ont été transposées pour des bus en fonction de la taille (volume) de l'habitacle. Cette valeur est en effet définie facilement à partir des caractéristiques techniques du bus données par les fabricants. Cette démarche a donc permis d'estimer la consommation du système de climatisation selon la taille du bus caractérisé et la température extérieure. La Figure 5 montre les valeurs qui ont été retenues pour la base des données. Ces valeurs sont le résultat de différentes itérations réalisées afin d'obtenir une consommation du système de chauffage cohérent avec la documentation de référence trouvée. Elles ont été validées sur la base de l'influence de la consommation du système de climatisation par rapport à la consommation totale du bus. Cette partie sera présentée en détail dans le 4.3.1.

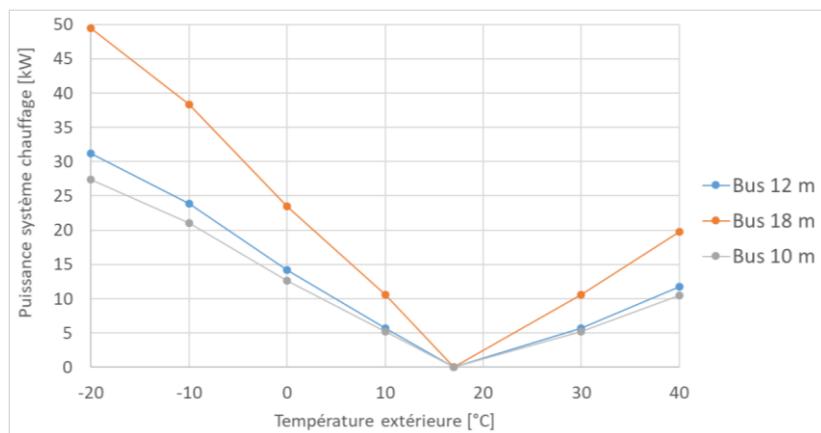


Figure 5 Consommation du système de chauffage en fonction de la température extérieure pour 3 tailles de bus

4.1.2 Données infrastructure

Pour les bus à propulsion électrique des stations de charge sont nécessaires pour recharger les véhicules. En général, deux types différents de stations de charge peuvent être utilisés (Tableau 10).

Type	Station de charge au dépôt	Station de charge au pantographe
Illustrations		
Caractéristiques	Charge « lente » à faible puissance ¹	Charge « rapide » à haute puissance ²

Tableau 10 Chargement d'un bus électrique au dépôt ou au pantographe

La charge au dépôt est faite généralement en dehors du service des bus, donc par exemple pendant la nuit. Comme dans ce cas le temps à disposition pour la charge est élevé, elle est faite à une faible

¹ Source image : [ABB's Smart Charging solution for bus depots - YouTube](#)

² Source image: [BVG erweitert E-Bus Flotte - 6 weitere Linien werden umgestellt - Urban Transport Magazine \(urban-transport-magazine.com\)](#)

puissance. Au contraire, la charge au pantographe est faite pendant le service du bus, donc pendant les pauses aux arrêts terminaux. Pour cette raison, le temps à disposition est beaucoup plus court, par conséquent la charge est effectuée à haute puissance. Ces deux manières de charger les véhicules introduisent le concept de stratégie de charge. Il y a principalement trois stratégies pour charger les bus électriques [3] :

- Seulement charge au dépôt
- Charge mixte : dépôt et arrêts terminaux avec pantographes
- Charge mixte : dépôt et plusieurs arrêts intermédiaires avec pantographes

Afin de prédire le besoin énergétique global et calculer donc les coûts liés à l'énergie, les phases de charge doivent être modélisées également, quelle que soit la stratégie choisie. Pour ce faire, il était donc nécessaire de caractériser les données techniques des stations permettant de calculer l'énergie fournie pour recharger les bus. Ces paramètres sont listés dans le Tableau 11. Le rendement de la station considère les pertes liées au processus de charge. La valeur de 0.93 [-] a été prise depuis l'étude [18]. Les valeurs de puissance ont été fournies par CarPostal et proviennent du fournisseur ABB.

Nb	Paramètre	Valeur utilisée	Unité	Hypothèses simplificatrices établies
1	Rendement station de charge	0.93	-	Valeur constante
2	Puissance station de charge rapide	300 ¹	kW	Valeurs constantes
3	Puissance station de charge au dépôt	100 ²	kW	

Tableau 11 Données techniques stations de charge utilisées dans les modèles

4.2 Caractérisation des parcours (lignes)

Ce sous-chapitre documente la stratégie utilisée afin de caractériser les lignes du réseau des transports publics de la commune de Porrentruy. En accord avec CarPostal, les lignes qui ont été retenues pour l'étude passent toutes par la gare et elles sont listées dans le Tableau 12. Elles font référence au plan des lignes de l'année 2022 utilisé pour cette étude.

Numéro ligne	Tracé selon plan de ligne 2022	Remarques
71	Porrentruy, gare -> Fahy, douane -> Porrentruy, gare	
72	Porrentruy, gare -> Beurnevésin, Couronne -> Porrentruy, gare	
73	Porrentruy, gare -> Grandfontaine, bas du village -> Porrentruy, gare	
74	Porrentruy, gare -> Bressaucourt, Les Brussattes -> Porrentruy, gare	
75	Porrentruy, gare -> Villars-sur-Fontenais -> Porrentruy, gare	
76	Porrentruy, gare -> Asuel -> Charmoille, douane	Exploitation combinée avec ligne 77 (boucle)
77	Porrentruy, gare -> Alle -> Charmoille, douane	Exploitation combinée avec ligne 76 (boucle)
70	Sous-Bellevue -> Porrentruy, gare -> Oiselier	Transports urbain

Tableau 12 Liste des lignes considérées dans l'étude

La caractérisation de ces tracés se résume à trois informations :

- Profil d'altitude et de vitesse du tracé
- Nombre des passagers dans le bus à chaque arrêt
- Horaire

Profil d'altitude et de vitesse

Les profils d'altitude et de vitesse ont été obtenus à l'aide des mesures GPS. Le principal avantage de cette méthode de mesure consiste dans le profil de vitesse qui est obtenu. En effet l'outil GPS utilisé³ permet de mesurer la vitesse instantanée du véhicule. De cette manière, le profil obtenu représente mieux la réalité routière quotidienne du bus. Par conséquent, l'estimation de la consommation du bus, qui dépend fortement du profil de vitesse, sera plus précise.

Pour effectuer ces mesures, les différentes lignes ont été parcourues en bus selon les parcours du plan de l'année 2022. Les bus étaient conduits par des chauffeurs de CarPostal qui connaissaient les

¹ Source ABB : [Pantograph Charging | Pantograph Down | ABB](#) (22.08.22)

² Source ABB : [Electric Bus Charging Station | Electric Truck Charging | ABB](#) (22.08.22)

³ Application pour smartphone (Android) *HUD Speedometer Plus*, version 3.41

parcours. La manière de conduire, et donc les profils de vitesse résultants, sont très représentatifs de la réalité routière quotidienne. Le Tableau 13 montre les profils de vitesses obtenus pour les lignes 71 et 74. Pour les mêmes lignes, les profils d'altitude se trouvent dans le Tableau 14. Comme mis en évidence dans les graphiques, les tracés mesurés tiennent compte du parcours à l'aller (Gare -> arrêt terminal) et au retour (arrêt terminal -> Gare).

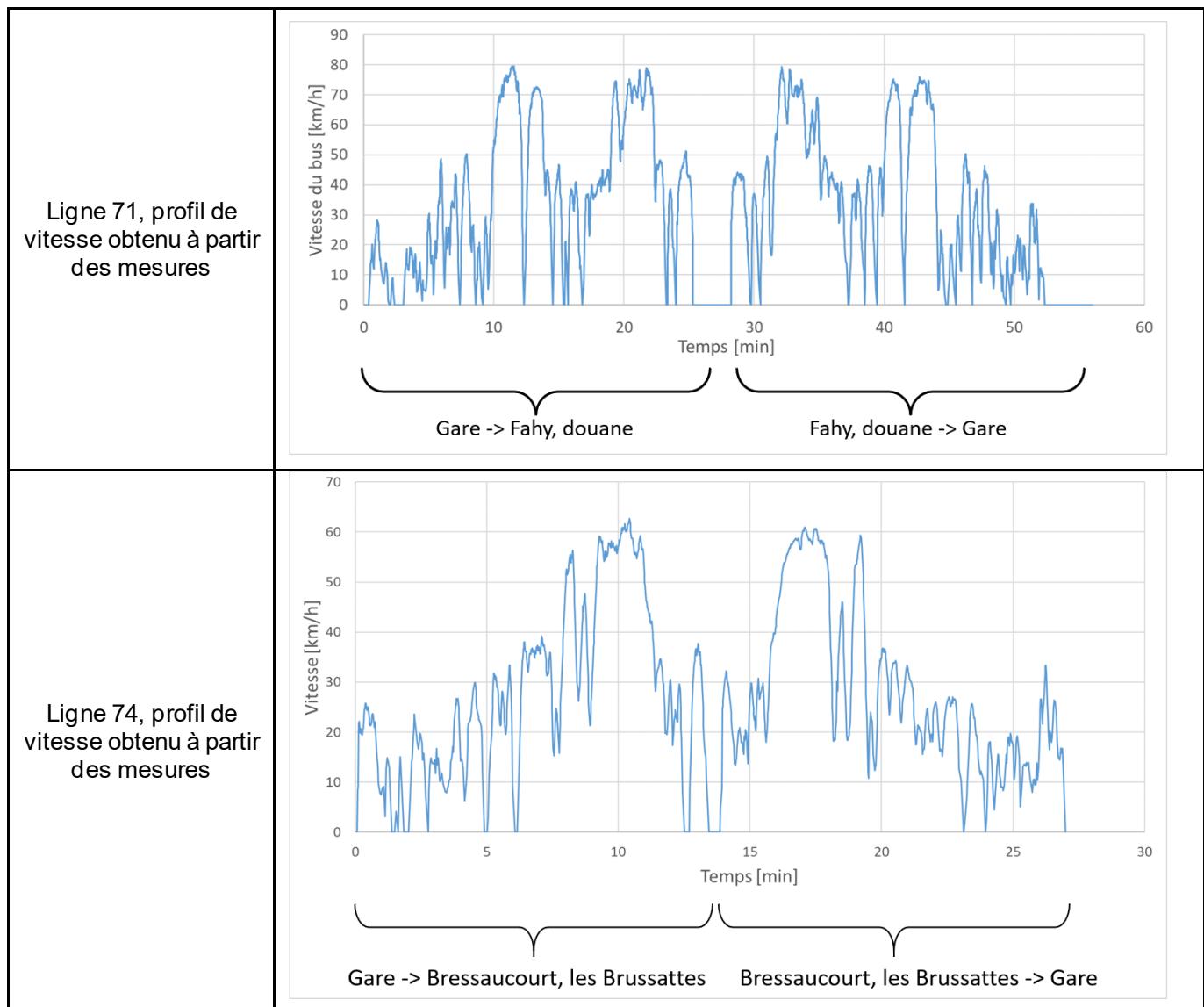


Tableau 13 Exemple de deux profils de vitesse obtenus suite aux mesures effectuées en collaboration avec CarPostal. Ligne 71 et 74 selon le plan horaire de l'année 2022

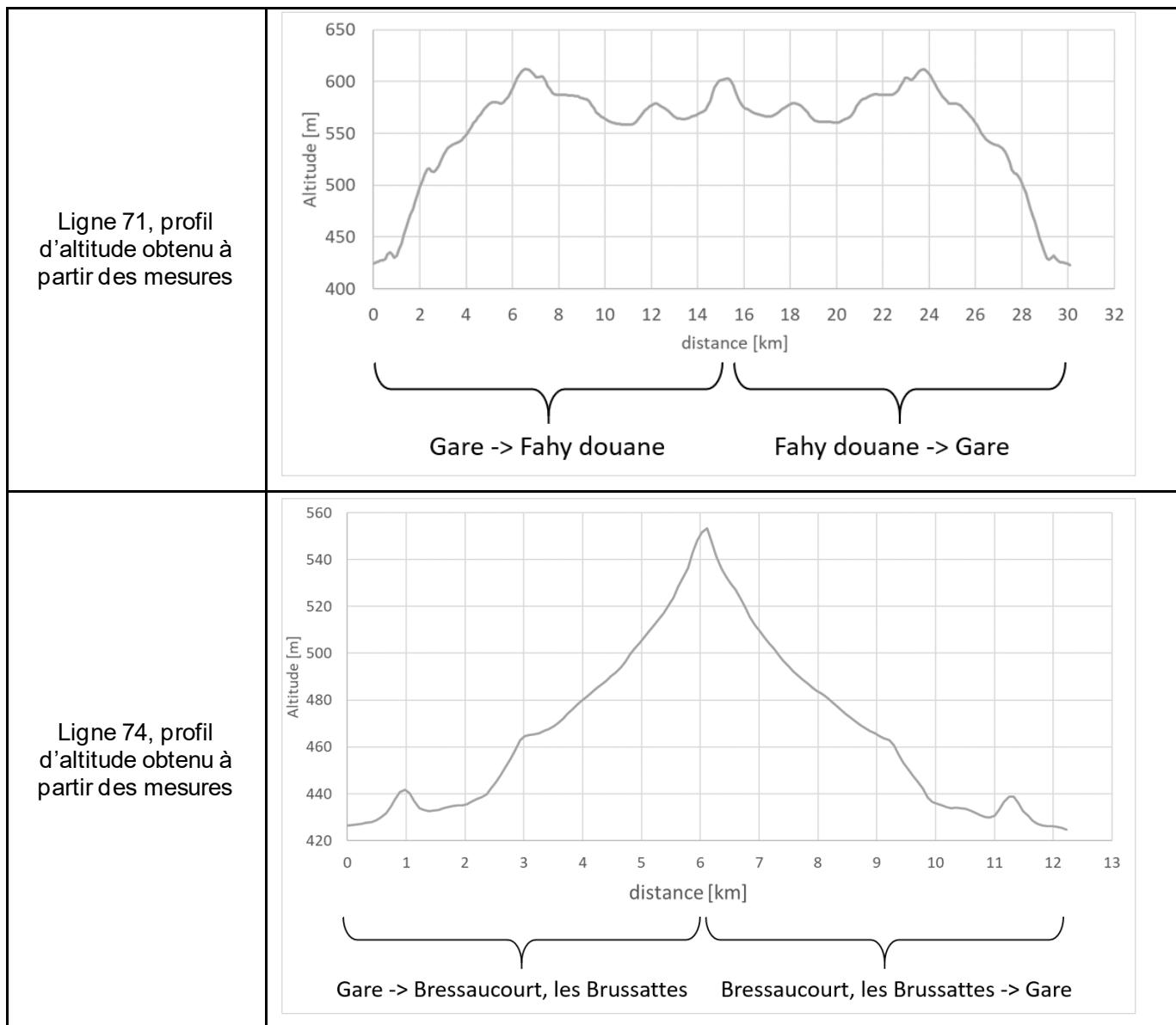


Tableau 14 Exemple de deux profils d'altitude obtenus suite aux mesures effectuées en collaboration avec CarPostal. Ligne 71 et 74 selon le plan horaire de l'année 2022

Données des passagers

L'information du nombre des passagers était fondamentale afin de considérer la charge du bus dans le modèle numérique et être sûr que les bus choisis ont assez de places. Dans un cas d'utilisation réel, à chaque arrêt, il y a des passagers qui montent dans le bus et certains autres qui descendent. Ceci a comme conséquence que la masse totale du bus varie à chaque arrêt. En plus, le nombre des passagers varie beaucoup selon l'heure de la journée et le jour de la semaine. Par exemple en début de matinée à 08h ou le soir vers 17-18h il y aura plus des passagers qu'en milieu d'après-midi.

Comme l'état de chargement (masse totale) du bus a un fort impact sur sa consommation, il était donc important de connaître ces informations et les intégrer dans le modèle numérique. Pour ce faire, CarPostal a fourni les données passagers du réseau des transports publics de Porrentruy de l'année 2019. En raison de la grande quantité des données fournies, il a fallu les traiter avec des hypothèses simplificatrices :

1. Le nombre des passagers est différencié seulement par arrêt et par ligne. Il ne dépend donc pas du jour et l'heure.
2. Pour chaque arrêt, seul le cas avec un nombre de passagers élevé est considéré (pas maximal).

Selon la première hypothèse, seules des variations du nombre de passagers par ligne et arrêt ont été faites. Ceci se traduit par le fait que, pendant la durée des simulations, pour la même ligne et le même arrêt il y aura toujours le même nombre des passagers dans le bus.

Ceci a permis donc d'obtenir le nombre de passagers pour chaque arrêt de chaque parcours. Un exemple du résultat est représenté sur la Figure 6 pour les premiers arrêts de la ligne 74 parcourue à l'aller. Les résultats sont représentés sous forme d'histogramme. Les axes horizontaux indiquent le nombre des passagers présents dans le bus pour chaque mesure prise par CarPostal. Les axes verticaux renseignent sur la fréquence de mesure. Ces valeurs, données sous forme normalisée entre 0 et 1, montrent combien de fois un certain nombre des passagers a été présent dans le bus. Plus cette valeur est élevée, colonnes vers la gauche dans les graphiques, plus souvent un certain nombre des passagers était présent dans le bus.

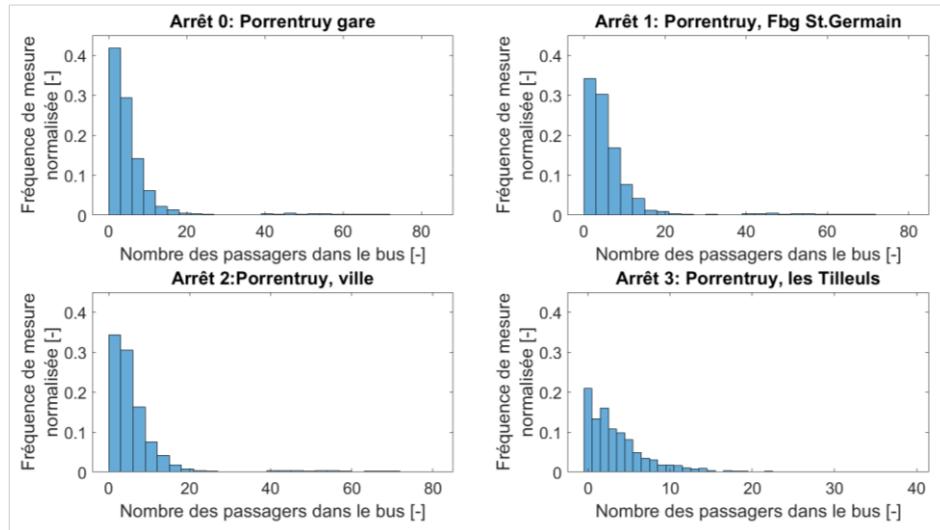


Figure 6 Résultat du traitement des données pour 4 arrêts de la ligne 74. Pour chaque arrêt, les valeurs du nombre des passagers dans le bus ont été classées par la fréquence de mesure

Ensuite, selon la deuxième hypothèse, pour définir le nombre des passagers à considérer dans les simulations, un nombre des passagers élevé a été retenu. En revanche, comme bien visible sur la Figure 6, prendre simplement la valeur maximale aurait signifié utiliser une valeur très peu représentative puisqu'elle a été mesurée très peu de fois. Il a été donc décidé d'utiliser une approche statistique et de calculer un nombre de passagers moyen à utiliser avec une moyenne pondérée (Équation 1).

$$\overline{Nb_{pass}} = \frac{\sum_{i=1}^N w_i \cdot Nb_{pass,i}}{\sum_{i=1}^N w_i}$$

Équation 1 Calcul de la moyenne pondérée pour obtenir le nombre des passagers à considérer

Chaque mesure du nombre de passagers ($Nb_{pass,i}$) a été pondérée avec un coefficient de poids (w_i) qui considère combien de fois chaque mesure a été prise, donc la fréquence de mesure. De cette manière, plus souvent une valeur a été mesurée, plus elle devient importante dans la valeur moyenne finale. Ces coefficients de poids ont été choisis par itérations afin d'obtenir une valeur pondérée qui reste élevée, cependant représentative. Un exemple de résultat obtenu avec cette approche est visible sur la Figure 7. Ceci montre, pour les mesures d'un arrêt de la ligne 74 initialement présentées sur la Figure 6, la valeur moyenne résultante retenue dans le modèle numérique du bus.

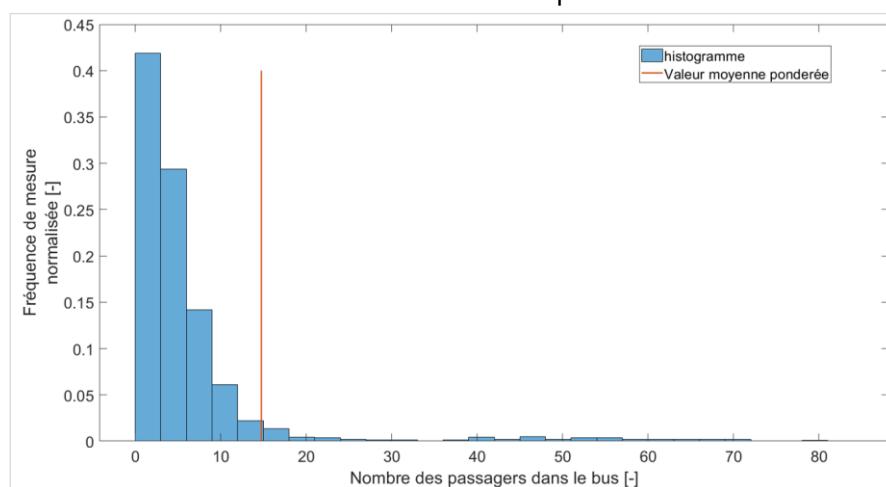


Figure 7 Calcul du nombre des passagers par moyenne pondérée, exemple sur un arrêt de la ligne 74

En appliquant cette démarche pour chaque arrêt de chaque ligne, il a été possible de construire un « profil des passagers » pour chaque parcours. Ceci indique comment le nombre des passagers varie pendant un tracé. Des exemples de profils passagers obtenus pour les lignes 71 et 74 se trouvent dans le Tableau 15. Les images mettent en évidence que, pour chaque ligne, le bus part de la gare avec beaucoup de passagers pour arriver à l'arrêt terminal avec toujours moins de passagers. Pour le trajet du retour, le comportement est contraire. Ceci est bien cohérent avec ce qu'on observe généralement dans un bus.

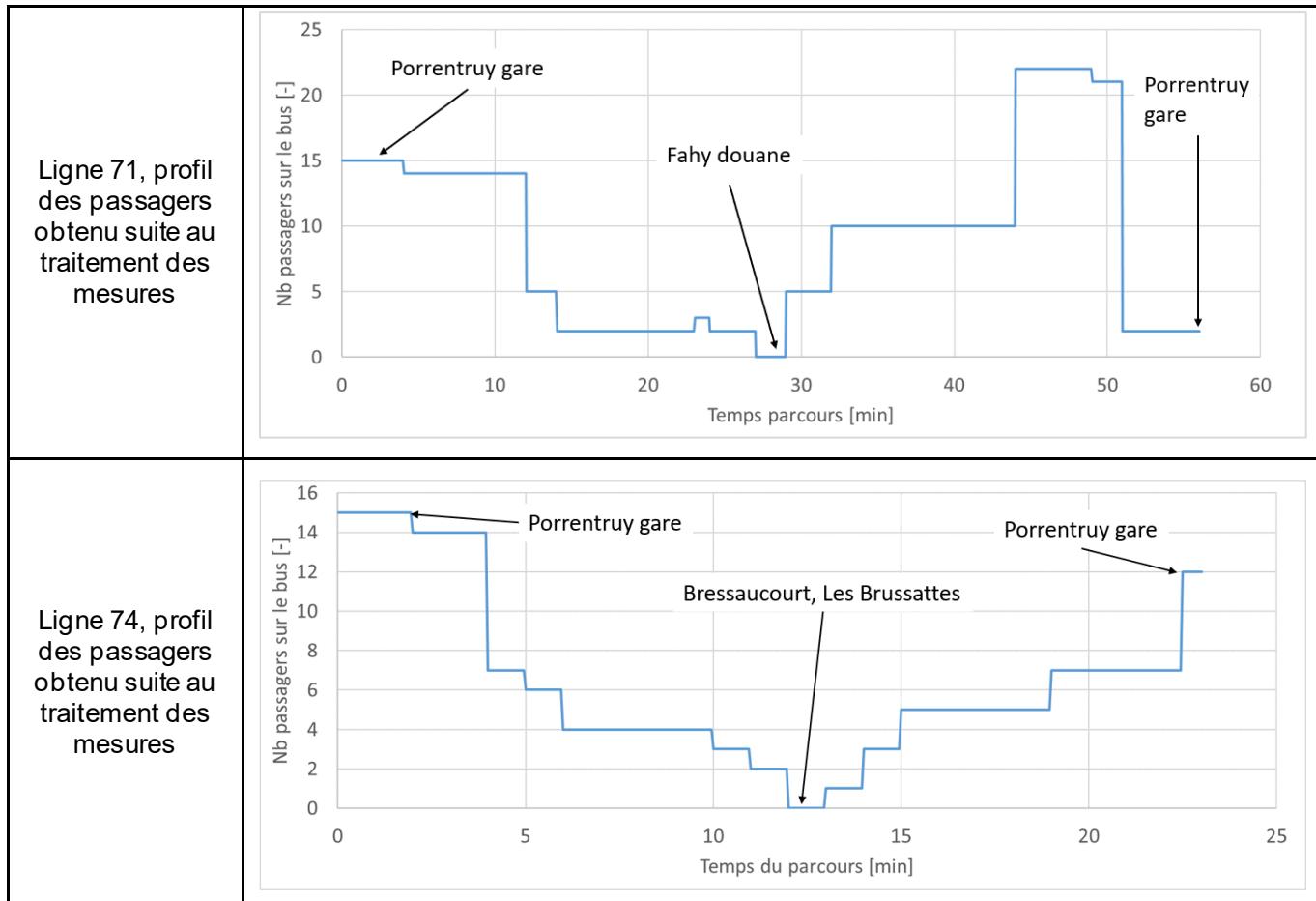


Tableau 15 Représentation graphique de 21 profils de passagers obtenus suite au traitement des données fournies par CarPostal : ligne 71 et 74

Finalement, à partir des profils passagers obtenus pour chaque ligne, le chargement du bus a pu être défini en convertissant le nombre des personnes dans le véhicule en masse. Ceci en considérant une masse moyenne des passagers de 68 [kg] comme réglementés par l'ordonnance sur les exigences techniques des véhicules routiers (VTS, Verordnung über die technische Anforderungen an Strassenfahrzeuge) [19].

Horaire

Le dernier élément nécessaire à la caractérisation des lignes était l'horaire des courses. L'intégration de ce dernier dans les outils numériques était nécessaire afin de modéliser correctement le réseau de transports public de la commune. En effet, le plan horaire est déterminant pour la définition du nombre de bus à employer et son infrastructure selon la stratégie de charge définie. L'horaire qui a été considéré pour cette étude correspond à celui du plan de l'année 2022 fourni par CarPostal pour la définition des parcours des lignes.

L'horaire donné se divise, pour chaque ligne, en un horaire par semaine (lundi-vendredi, jours ouvrables) et un deuxième horaire réduit, avec moins de courses, pour le week-end (samedi-dimanche). Dans le cadre de l'étude réalisée, il a été décidé de se concentrer seulement sur l'horaire de la semaine. En effet, c'est ce dernier qui nécessite le plus de bus et permettra de dimensionner la flotte et l'infrastructure.

4.3 Modèles numériques

Cette section va documenter le travail effectué pour la réalisation des outils numériques créés pour effectuer les calculs. Il est important de mettre en évidence que le but de ce chapitre n'est pas de fournir les détails techniques de comment ces outils ont été construits dans les respectifs logiciels. Il sera plutôt focalisé sur les principes permettant de comprendre comment ces outils numériques fonctionnent et les liens entre eux. Comme mentionné, deux différents modèles ont été créés. Ceux-ci sont liés entre eux selon le diagramme entrées-sorties illustré sur la Figure 8. Dans cette figure, le modèle numérique global identifie le modèle créé pour la modélisation physique du bus, tandis que l'algorithme d'optimisation est lié au programme développé pour dimensionner la flotte et l'infrastructure nécessaire. Les entrées (inputs des modèles) sont spécifiées avec un rectangle tandis que les sorties avec les flèches. Les éléments mis dans les hexagones correspondent à des hypothèses ou à des conditions qui ont été établies.

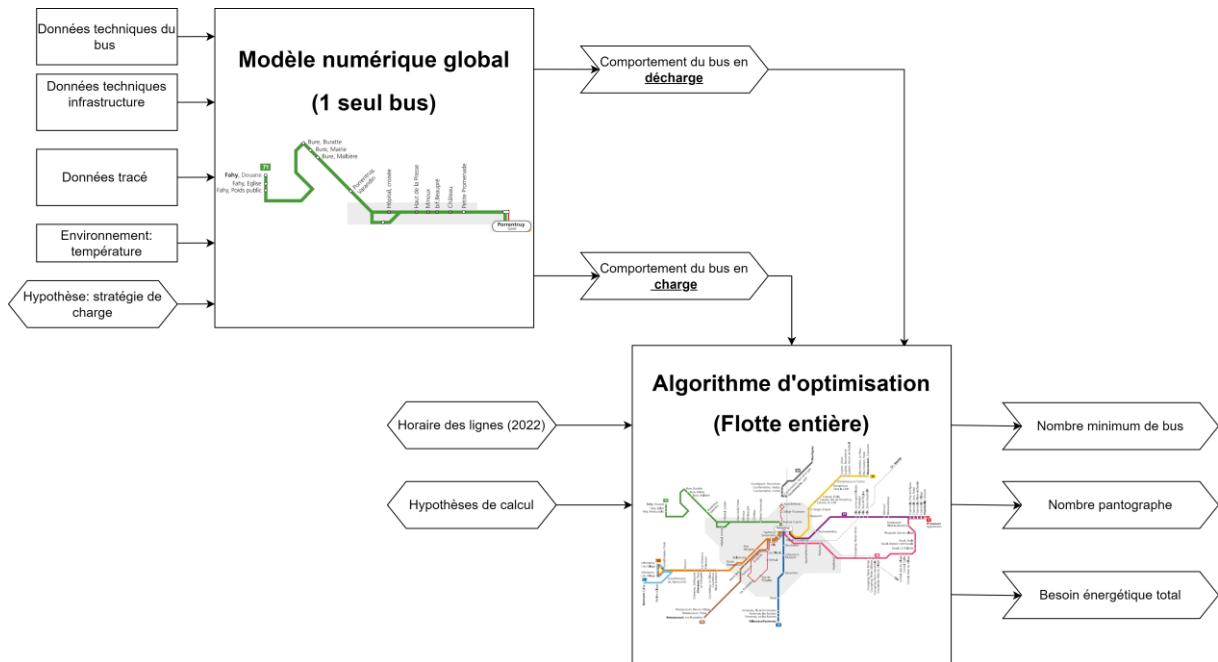


Figure 8 Diagramme entrées-sorties représentant les liens entre les 2 modèles numériques créés : modèle numérique global (modélisation physique du bus) et algorithme d'optimisation

4.3.1 Modèle pour la modélisation physique du bus

L'objectif principal de ce premier modèle est de pouvoir modéliser le comportement d'un bus, donc les phases de décharge et de charge, sur le réseau de transports publics de Porrentruy pendant une journée de service. Ceci est nécessaire pour estimer les besoins énergétiques et donc calculer les coûts. Pour la création de ce modèle, les logiciels Matlab et Simulink ont été employés. Comme illustré sur la Figure 8, les entrées du modèle numérique du bus sont les données techniques du véhicule, de l'infrastructure et les informations liées aux tracés (profil altitude, vitesse, passagers et plan horaire) qui ont été présentés. Un autre élément nécessaire qui sera défini par la suite est lié à l'environnement ; il contient la température extérieure à considérer pour l'étude. En effet, elle est importante pour définir l'impact de la climatisation dans la consommation du bus.

Le dernier élément concernant les inputs est une hypothèse liée à la stratégie de charge à adapter selon les différentes possibilités mentionnées précédemment. Suite à différents tests, il a été remarqué que même en utilisant les bus avec de plus grandes capacités, il était impossible d'effectuer tous les tracés prévus selon l'horaire pendant toute une journée avec un seul chargement fait au dépôt. Cette solution aurait donc nécessité un nombre de bus très élevé pour couvrir les besoins de l'horaire. Pour cette raison, une stratégie de charge mixte a été employée dans le modèle.

Le principe de la stratégie adaptée est illustré sur la Figure 9 ci-dessous. Elle consiste à charger les bus pendant la nuit, donc hors service, au dépôt avec des stations de charge « lente » pour commencer la journée avec la batterie pleine. Pendant le service, afin de garantir l'autonomie du bus sur l'entier de la journée, des charges rapides au pantographe sont prévues pendant les pauses à la gare de Porrentruy entre certaines différentes courses. La gare est en effet le point de départ et d'arrivée pour chaque ligne considérée, donc chaque bus passe à cet endroit. Pendant les trajets, donc entre la gare et les arrêts terminaux, aucune phase de charge n'est prévue puisque, selon l'horaire mis à disposition, le temps de pause prévu aux arrêts est très court (seulement quelques minutes en générale).



Figure 9 Illustration stratégie de charge retenue pour le modèle numérique

Afin de modéliser la stratégie établie, 3 différents modèles numériques ont été donc créés dans le logiciel Simulink :

1. **Modèle du bus** : simulation du comportement dynamique du bus sur les différentes lignes pour reproduire son déchargement
2. **Modèle pantographe** : simulation du comportement de la batterie du bus en phase de charge rapide à la gare
3. **Modèle station dépôt** : simulation du comportement de la batterie du bus en phase de charge lente au dépôt

Pendant le service journalier du bus, donc durant la simulation, ces 3 modèles interagissent entre eux selon le schéma illustré sur la Figure 10. L'élément qui définit les interactions entre les modèles est le plan horaire. En effet c'est celui qui précise combien de temps le bus reste à la gare entre deux courses et donc combien de temps il a potentiellement pour recharger sa batterie.

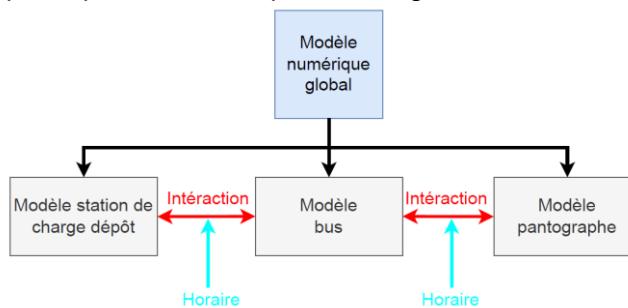


Figure 10 Illustration des interactions entre les 3 modèles créés pour reproduire le service journalier du bus

Suite à des discussions avec CarPostal, il a été défini qu'un bus dans la journée de service parcourt différentes lignes. Donc, par exemple, il peut commencer sur la ligne 71 pour ensuite repartir sur la 75. Pour cette raison, les temps d'arrêt à la gare qui peuvent être utilisés pour la recharge ne sont pas constants et n'était pas possible de connaître à l'avance. Afin de reproduire cette même malléabilité dans la simulation, une interface avec un programme Matlab a été créée pour « piloter » le bus.

Tous les détails techniques sur comment les modèles et le programme Matlab ont été construits peuvent être trouvés dans les rapports techniques suivants. Le document [20] a été réalisé dans le cadre de ce projet pour présenter la modélisation des stations de charge et le programme Matlab. Celui référencé en [21] a été rédigé dans le cadre d'un autre projet lié à la mobilité électrique et documente le modèle physique du bus.

Après avoir créé les trois modèles, une étape de validation a été effectuée avant de procéder aux calculs. Le modèle du bus et celui des stations de charge ont été validés de deux manières différentes.

Validation modèle du bus électrique

Le modèle numérique du bus a été validé en comparant la consommation donnée par le modèle numérique avec des valeurs de référence trouvées dans la littérature. Ceci en considérant 2 différents scénarios ; sans et avec chauffage (en hiver). Le scénario sans chauffage a permis de valider les données techniques utilisées. Grâce au scénario en hiver les données auxiliaires présentées dans le chapitre 4.1.1 ont également pu être confirmées. Pour chaque étape de validation, le bus a été considéré à vide puisqu'aucune information liée au chargement du véhicule n'était mentionnée dans les références bibliographiques. La première source (étude [3]) fournie des valeurs de référence de consommation en hiver (avec chauffage) et sans pour des bus 18m et 12m (Tableau 16).

Type de bus	Condition météo	Consommation du bus [kWh/km]
Bus 12 m	Sans chauffage, 15°C	1.10 – 1.30
	Avec chauffage, température pas spécifiée	1.90 – 2.40
Bus articulé 18 m	Sans chauffage, 15°C	1.50 – 1.80
	Avec chauffage, température pas spécifiée	2.70 – 3.20

Tableau 16 Valeurs de référence pour la consommation des bus 12 et 18m données en [3]

La deuxième source utilisée¹ donne les valeurs de consommation données dans le Tableau 17.

Type de bus	Condition météo	Consommation du bus [kWh/km]
Bus 12 m	Sans chauffage, 20°C	0.80
	Avec chauffage, hiver -10°C	2.30 – 2.50
Bus articulé 18 m	Sans chauffage, 20°C	1.65 – 1.84
	Avec chauffage	Pas disponible

Tableau 17 Valeurs de référence pour la consommation des bus 12 et 18m selon deuxième source²³

Dans une première phase, le modèle et les données techniques ont été validés sans considérer le chauffage. La consommation du bus sur chaque ligne a été comparée avec les valeurs de référence données sous forme d'intervalle. Les résultats obtenus avec un bus de 12m (eCitaro, 198 kWh) et un de 18m articulé (eCitaroG, 396 kWh) se trouvent dans le Tableau 18.

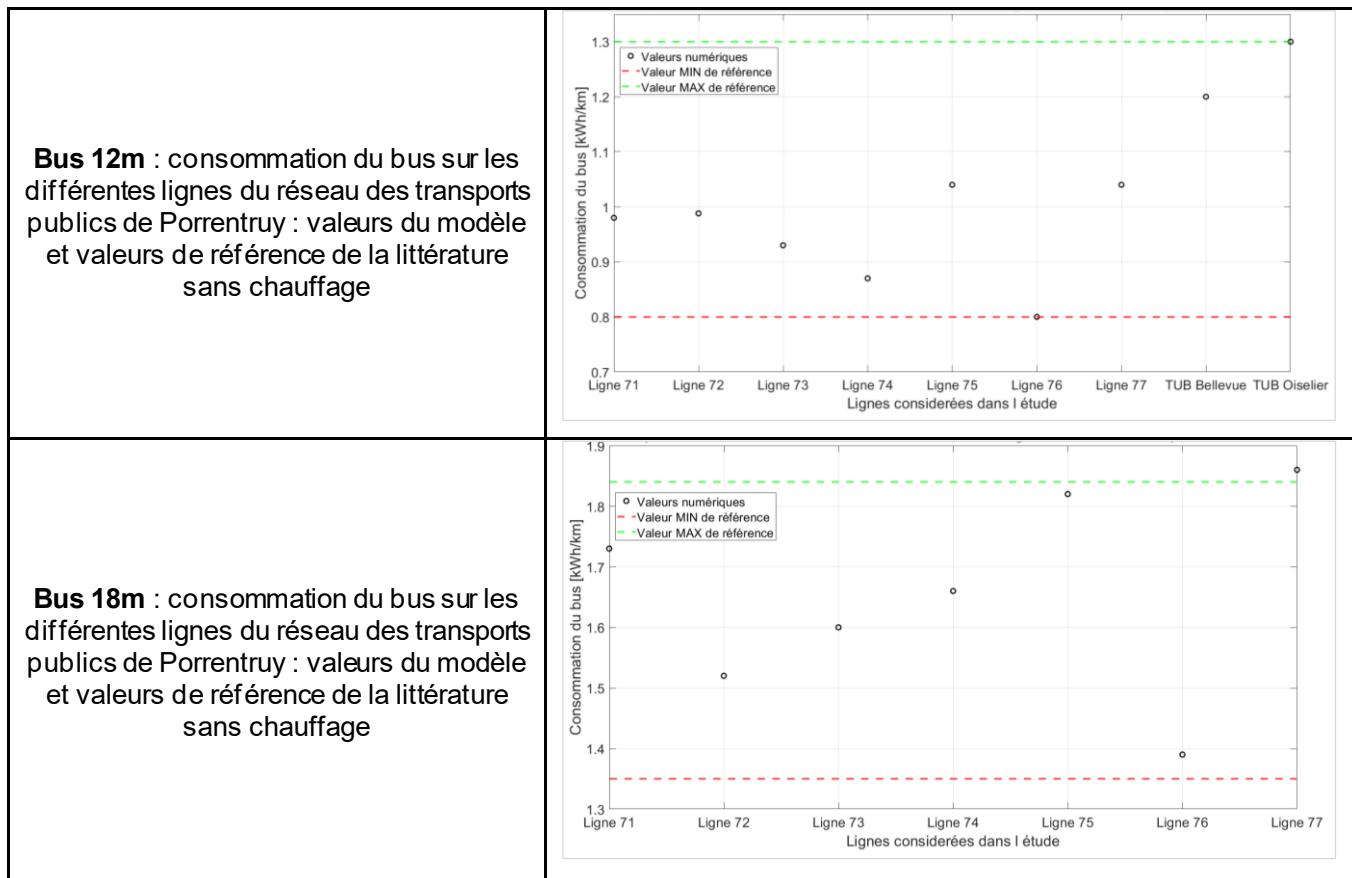


Tableau 18 Comparaison consommation des bus sans considérer l'influence du chauffage

¹ [Electric bus range, focus on electricity consumption. A sum-up - \(sustainable-bus.com\)](#) (23.08.22)

Pour le bus 18m (articulés) la ligne de transports urbains (ligne 70) n'a pas été considérée, car elle ne peut pas être réalisée avec un bus articulé. Les valeurs obtenues montrent que, pour les 2 types de bus, le modèle numérique correspond bien aux valeurs de référence. En effet, les résultats numériques se trouvent pour chaque ligne systématiquement dans les intervalles de référence. La seule exception est remarquée avec le bus 18 pour la ligne 77 qui dépasse légèrement la valeur maximale de référence. Pour le bus 10m, aucune valeur de référence n'a été trouvée pour faire la comparaison comme pour les autres modèles. Les données du bus 10m ont donc été contrôlées par comparaison avec les valeurs de consommation calculées et validées avec le bus 12m. Ces contrôles ont permis de vérifier que les modèles paramétrés, avec les données du bus de 10m, donnaient une consommation légèrement inférieure par rapport aux résultats obtenus avec les bus 12m (masse du bus inférieure).

Ensuite, le chauffage a été considéré. La première chose à fixer pour définir la consommation du système de chauffage était la température extérieure. Afin de réaliser une étude représentative, les températures mesurées par la station de Porrentruy entre 2005 et 2018 ont été analysées¹. Ces données montrent que la température moyenne plus faible qui a été mesurée dans cette période est de -2.8°C. Dans le modèle une température extérieure de -5°C a donc été admise dans l'étude pour définir la consommation du chauffage. Ceci avec l'objectif de considérer un « *worst case* » qui reste encore représentatif. Les résultats de la comparaison pour les mêmes bus analysés sont illustrés dans le Tableau 19.

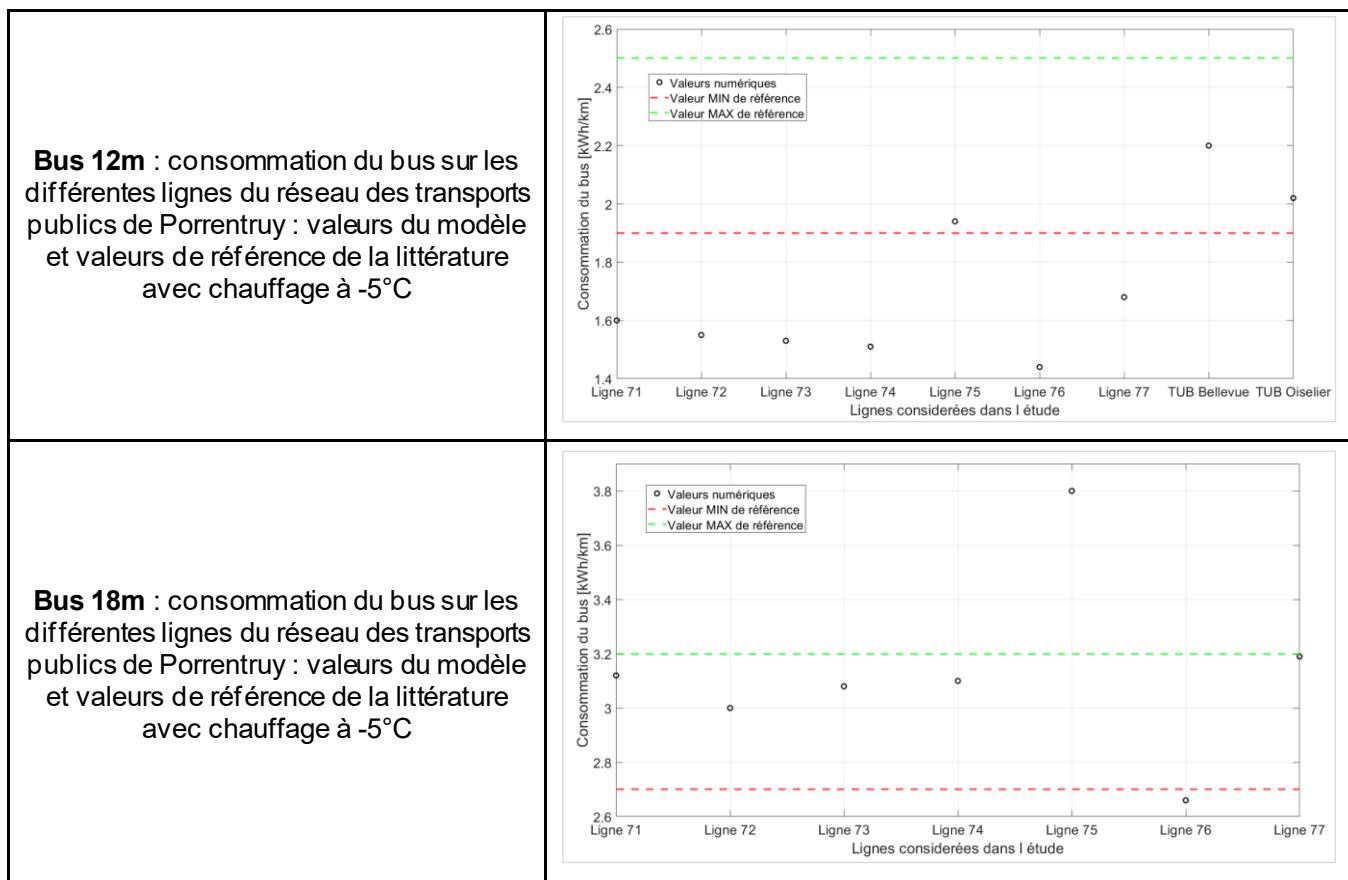


Tableau 19 Comparaison consommation des bus avec l'influence du chauffage à -5°C

Sur les graphiques du Tableau 19, il est possible de voir que pour le bus 12m la consommation avec le chauffage reste en général légèrement plus faible par rapport à la plage donnée par les valeurs de référence. En revanche, la borne inférieure de l'intervalle de référence (1.9 kWh/km) est donnée pour une température qui n'est pas spécifiée par l'étude [3]. Il est donc difficile de dire si c'est la consommation du chauffage qui est légèrement sous-estimée ou la température considérée qui est trop élevée. Pour le bus 18m, le modèle numérique donne des résultats qui se rapprochent bien de l'intervalle de référence. Pour la ligne 75, la valeur numérique est plus élevée. La cause est due à la longue pause prévue par l'horaire à l'arrêt terminal (Villars sur Fontenais). Pendant cette pause, dans le modèle, il est en effet admis que le système de chauffage reste en fonction avec toujours la même consommation. Ce qui ne correspond pas forcément à la réalité si pendant cette pause le chauffage est coupé.

¹ Source: [Degrés-jours de températures - République et Canton du Jura](#) (23.08.22)

De manière générale, en comparant les consommations obtenues sans le chauffage et avec, on constate que la consommation de ce dernier est environ du même ordre de grandeur que l'énergie consommée pour déplacer le bus (consommation sans chauffage). L'histogramme présenté sur la Figure 11, donne pour chaque ligne l'influence du chauffage sur la consommation totale, montre bien ceci pour les deux tailles des bus considérées. Cette constatation trouve confirmation avec ce qui est mentionné dans les études [3] et [22] en permettant d'affirmer que le chauffage a un très grand impact sur la consommation d'un véhicule électrique et que les résultats numériques obtenus sont bien cohérents.

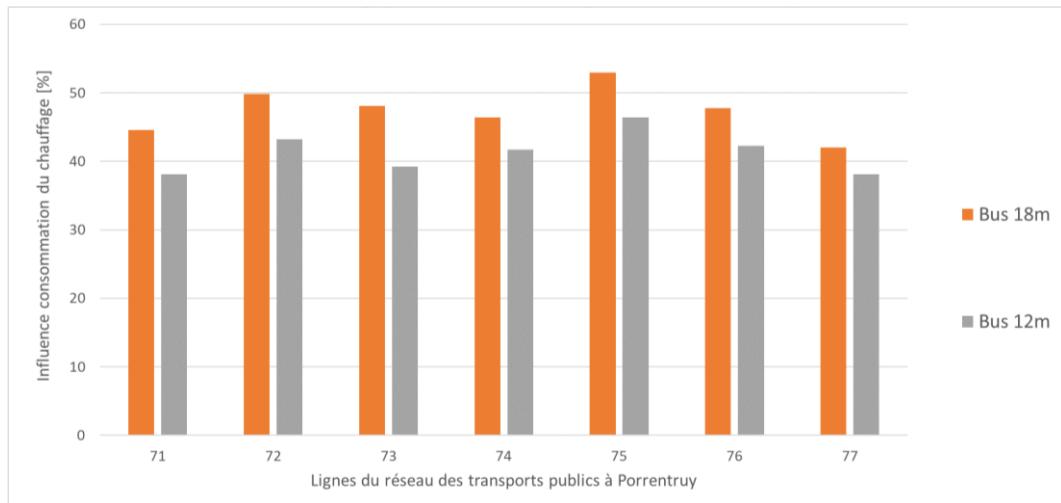


Figure 11 Résultat du modèle numérique du bus : analyse de l'influence du chauffage sur la consommation totale pour les différentes lignes

Validation modèle station de charge

Les modèles des stations de charge ont été validés en analysant le comportement de charge de la batterie. Une batterie au lithium, comme celles qui sont utilisées pour les bus électriques, est caractérisée par une charge divisée en 2 phases. Une première phase à courant constant pendant laquelle la batterie se charge de manière pratiquement linéaire. Ensuite, quand l'état de charge (SOC) a atteint approximativement 80 %, la tension des cellules, et donc la tension totale de la batterie, arrive à sa valeur maximale donc il y a toujours moins de courant qui peut charger la batterie¹. Ce qui a comme conséquence que pour charger la dernière partie il faut plus de temps (Figure 12).

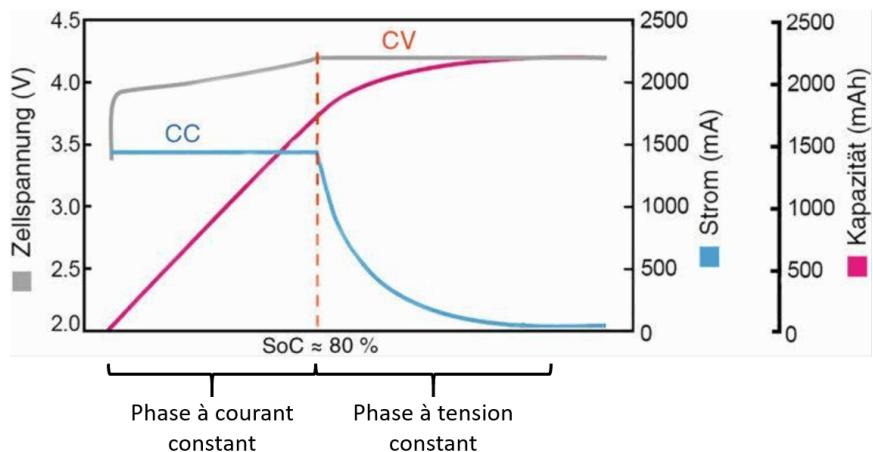


Figure 12 Illustration comportement de charge d'une batterie au lithium²

Le comportement de charge de la batterie donné par le modèle numérique a été donc comparé avec les indications provenant des références. En imposant un état de charge du bus initial de 30 %, les modèles ont été simulés avec les caractéristiques techniques de la batterie présentées dans le chapitre 4.1.1.

¹ "Hoverboards": Gefährlicher Spaß auf zwei Rädern | c't Magazin (heise.de) (23.08.22)

² Worauf es beim Battery Balancing von Lithium-Ionen-Akkus ankommt (vogel.de) (23.08.22)

Le résultat est présenté sur la Figure 13 pour la station de charge au dépôt, avec donc une puissance de charge de 100 kW. La batterie utilisée dans ce cas était celle du bus eCitaro avec une capacité nominale de 198 kWh. La charge du bus reste linéaire jusqu'à environ 87 % pendant les premières 90 min. Dans cette phase le courant de charge est pratiquement constant à la même valeur. Ensuite, le courant chute et la charge devient de plus en plus lente. Ce comportement correspond bien aux références trouvées.

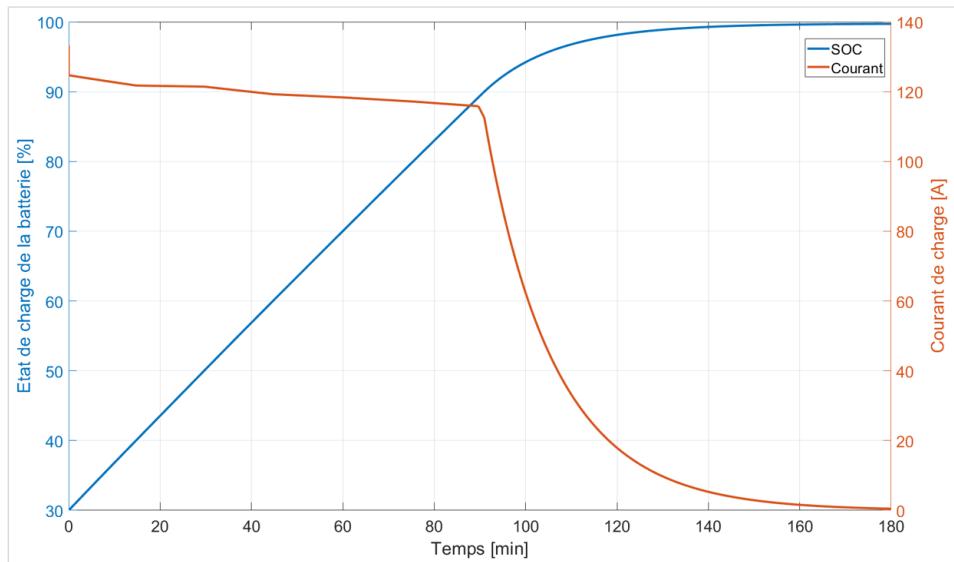


Figure 13 Représentation du comportement en phase de charge de la batterie donné par le modèle numérique station au dépôt (puissance de charge 100kW) sur une batterie à 198 kWh. État de charge (SOC) et courant de charge sont illustrés en fonction du temps

Résultat du modèle numérique global

Après les étapes de validation, le résultat final donné par le modèle est présenté. Il s'agit donc des éléments de sorties illustrés dans le diagramme utilisé pour introduire le chapitre dans la Figure 8. Ces éléments représentent le comportement de charge et de décharge du bus pendant le service journalier sur le réseau des transports publics à Porrentruy. Un exemple de ce résultat est disponible sur la Figure 14. Ce graphique montre, toujours pour le bus eCitaro 12m 198 kWh le déchargement de la batterie, donné par l'état de charge (SOC), sur différentes lignes pendant un bout de journée (du matin à 05.00 jusqu'à l'après-midi à 15.00). Les traits verticaux noir et rouges définissent respectivement le début et la fin de chaque ligne. On distingue bien les 3 phases de charge rapide au pantographe effectuées pendant le service du bus entre deux parcours et la charge finale réalisée au dépôt à la fin de l'utilisation admise dans le cas présenté à partir de 15h.

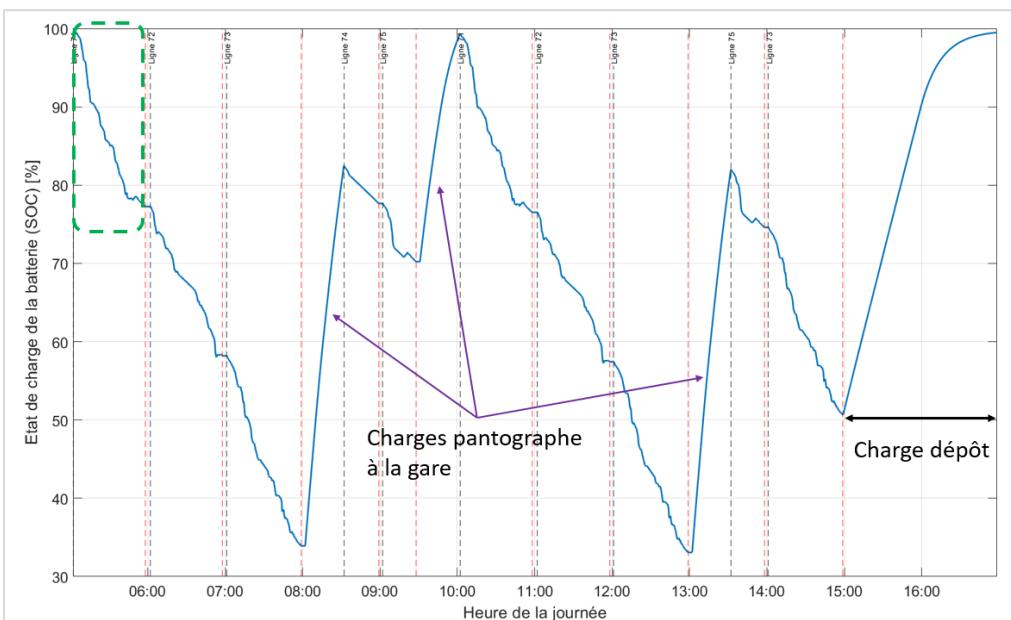


Figure 14 Exemple de résultat du modèle numérique : courbes de charge et de décharge pour le bus eCitaro 198 kWh pendant son service sur différentes lignes

Un détail de la courbe de décharge pour la première ligne parcourue par le bus (rectangle vert sur la Figure 14) est visible sur la Figure 15. Cette courbe a été représentée avec les profils d'altitude (courbe noire) et de vitesse (courbe rouge) de la lignée considérée. D'après cette figure on remarque comment la courbe de décharge varie pendant le tracé entre le parcours à l'aller et celui au retour. Effectivement, le taux de décharge du bus au retour est beaucoup plus faible, principalement entre 40 et 50 min (cercle violet). Ceci s'explique par l'effet du freinage régénératif considéré dans le modèle permettant de récupérer de l'énergie pendant la descente observées sur le profil d'altitude toujours avec le cercle violet. De cette manière, la consommation du bus au retour est moindre par rapport au parcours à l'aller.

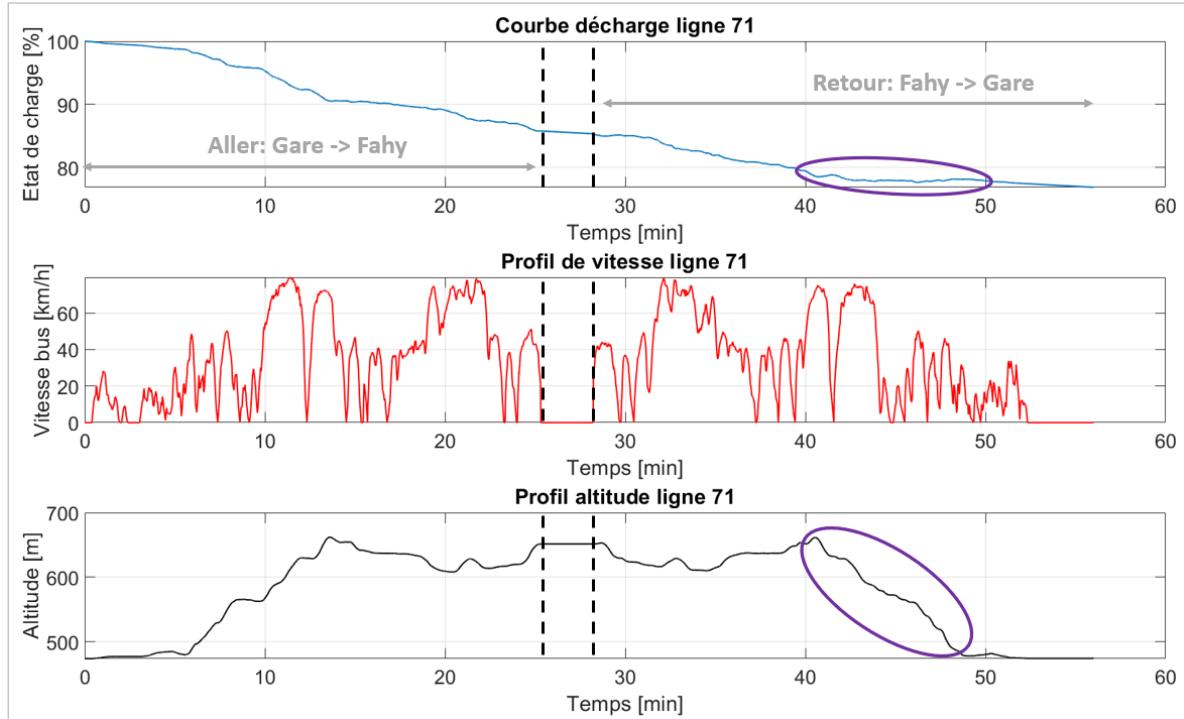


Figure 15 Exemple résultat du modèle numérique : détail de la courbe de décharge du bus pendant la première ligne (71) parcourue sur la Figure 14

4.3.2 Algorithme d'optimisation

Une fois que la consommation des bus est connue sur chaque ligne, il est possible de passer au calcul du réseau complet. Ce calcul devient vite assez complexe, car il faut faire des choix multiples (envoyer un bus pour chaque ligne de l'horaire, déterminer quels bus sont disponibles, choisir quels bus sont mis à la recharge, ...) à chaque instant de la journée. Afin de sonder rapidement un grand nombre de stratégies, une simulation de la gestion du réseau a été conçue dans le langage de programmation Python. La Figure 16 montre les informations données au modèle de calcul python et les valeurs qui sont calculées par le programme. Pour les grandeurs d'entrée, les courbes de chargement et de déchargement des bus proviennent des calculs réalisés avec le modèle numérique du bus et des stations de charge. Les conditions que le programme doit respecter concernent les horaires des lignes et des hypothèses de calcul qui seront mentionnées par la suite.

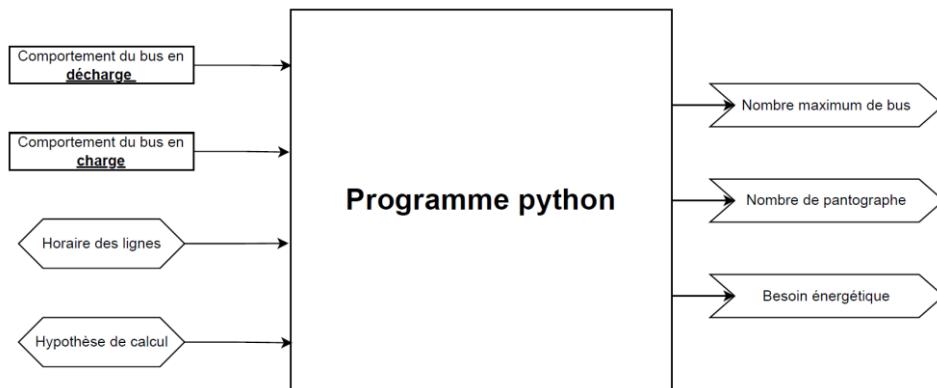


Figure 16 Diagramme entrée-sortie de la simulation du réseau des transports publics de Porrentruy

Les sorties de la simulation sont les informations chiffrées qui vont permettre de calculer les coûts des véhicules, de l'infrastructure ainsi que les coûts et le bilan énergétique. Ces éléments sont les suivants:

- Nombre de bus minimum qu'il est possible d'utiliser pour effectuer tous les horaires (courses) de la journée
- Énergie totale utilisée par les bus dans la journée
- Énergie nécessaire pour le rechargement

Ensuite, dans la simulation il y a des éléments clés qu'il est possible de paramétrier et qui auront une grande influence sur les résultats. Certaines sont des valeurs modifiables et d'autres sont des hypothèses de simplification. Les hypothèses de calcul établies sont les suivantes :

- ❖ Les bus ne doivent pas descendre en dessous de 20% de leur état de charge
- ❖ Tous les bus de la simulation sont du même type (même modèle)
- ❖ Le besoin énergétique du trajet de chaque ligne reste inchangé durant la journée. Ce qui presuppose que l'énergie nécessaire reste la même pour chaque course sur une même ligne
- ❖ Le temps pour aller-retour de l'emplacement de la gare, aux stations de charges pantographes est de 4 minutes
- ❖ Pour cette partie d'optimisation, les modèles de bus qui ont été choisis sont les bus eCitaro 396 kWh (bus 12m) et le Sileo 225 kWh (bus 10m). En effet, en analysant le nombre des passagers sur les différentes lignes, des bus articulés n'étaient pas justifiés.

Le choix de ces deux types de bus permet de mettre en évidence deux cas extrêmes. Ces deux cas sont donc des bus avec une grande capacité électrique, représenté avec le eCitaro 396 kWh et le cas avec peu de capacité représentée par le bus Sileo 225 kWh. Avec leur capacité énergétique différente, on a mis en évidence deux extrêmes de cette simulation d'optimisation. Les capacités de transport de personne sont pratiquement les mêmes, elles varient de 5 places en faveur du bus 12m qui peut accueillir 93 personnes debout. Finalement, le principe de fonctionnement du programme d'optimisation créé peut être illustré sur le schéma de la Figure 17. La simulation évalue l'état du réseau chaque minute en vérifiant les horaires à respecter, les niveaux de charge des bus en course ou en charge. L'algorithme choisit par défaut le bus ayant le niveau de charge maximal pour aller sur une ligne (priorité 1). Si il ne le trouve pas, il va regarder s'il peut prendre un bus en recharge, si son niveau de charge est suffisant (priorité 2). Si aucun des bus n'a un niveau de charge suffisant alors il ajoute un nouveau bus (priorité 3). Le nombre de bus va ainsi augmenter si la flotte au départ est trop petite. Les conditions qui permettent d'ajouter le moins de bus peuvent être cherchées.

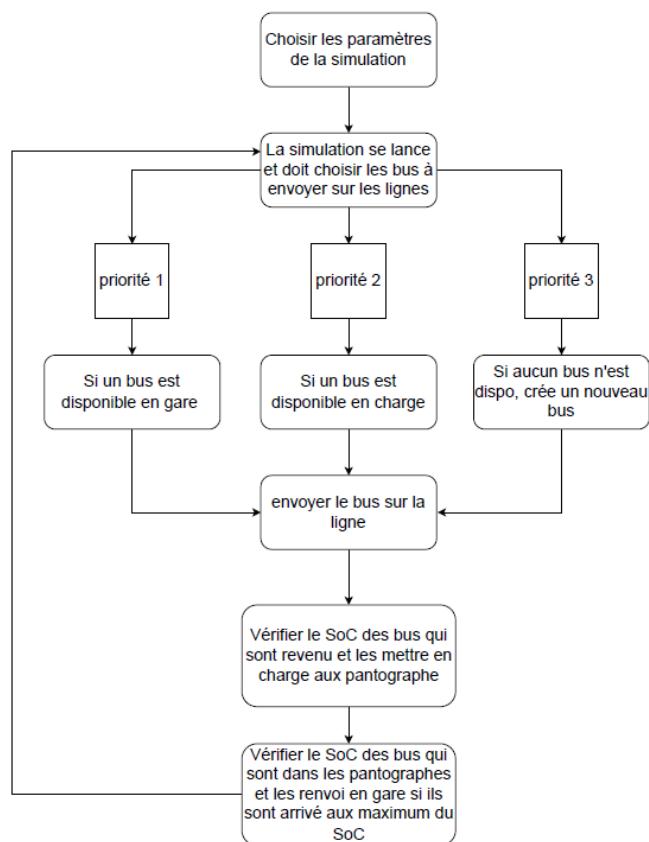


Figure 17 Schéma illustrant le principe de fonctionnement du programme

Le choix fait par le programme du bus qui part sur une ligne doit être explicité plus en détail dans la Figure 18 qui montre la suite chronologique dans la boucle pour un pas de temps. Quand il faut remplir un horaire, le programme passe en revue les bus de la flotte. Les bus peuvent avoir trois états. Ils peuvent être soit “en gare” soit “en charge” et soit “en route”. Ils possèdent également un état de charge qui varie évidemment en fonction des courses effectuées ou des recharges. Les bus sont donc classés par ordre décroissant de charge et par état “en gare”. Il choisit donc le plus chargé et l’envoi sur la ligne correspondante.

Si aucun bus n'est dans cette liste, la suite est de regarder dans les stations de charge. Si un bus est assez chargé pour pouvoir partir sur une ligne, il le sortira de la charge et l'enverra remplir cet horaire. Si aucune de ces possibilités n'est validée, un nouveau bus sera créé avec une charge maximum et sera envoyé pour cet horaire. De cette façon, l'algorithme pourra remplir tous les horaires et donnera le nombre minimum de bus nécessaires.

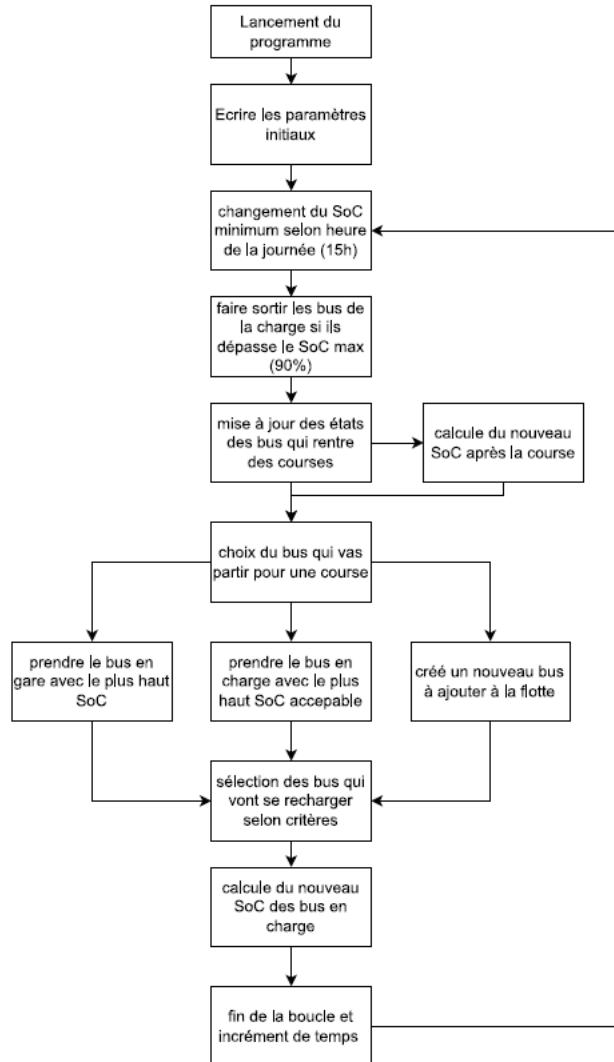


Figure 18 Diagramme illustrant les étapes chronologiques faites par le programme dans un pas de temps pour choisir les bus à envoyer sur les lignes

Résultats des simulations avec l'algorithme d'optimisation

Dans cette section, les résultats des simulations avec les bus eCitaro 396 kWh (12m) et avec les bus Sileo 225 kWh (10m) vont être présentés. Parmi toutes les simulations faites, il ne sera présenté que les meilleures solutions.

- **Optimisation avec bus 12m**

Avant de lancer une simulation, il est utile de regarder la courbe de demande en bus pendant une journée typique de semaine. Cette courbe est construite à partir des horaires et est montrée sur la Figure 19. Elle désigne le nombre de bus en course à un moment donné. Ce qu'il est déjà possible de distinguer est la façon dont la répartition de la demande se fait. Il est visible qu'entre 5h30 à 9h00 et entre 15h00 à 20h00, les demandes sont plus importantes et au minimum 13 bus sont utilisés simultanément. Ceci permet d'établir une zone temporelle critique entre le matin et en deuxième partie de journée, entre 15h et 20h. La stratégie choisie pour la recharge des bus est donc la suivante. Les bus se chargent dès le début de journée pour avoir le niveau de charge important pour pouvoir surmonter ces zones critiques. Durant ces phases les bus ne peuvent évidemment plus aller se recharger aux pantographes.

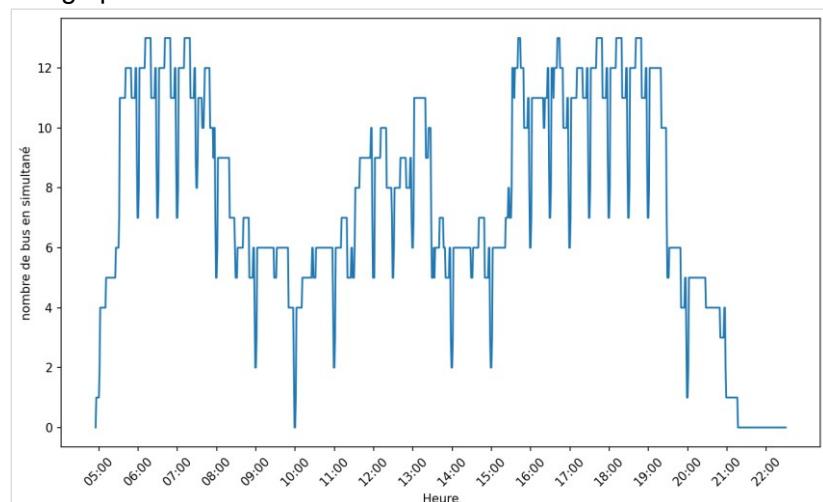


Figure 19 Courbe représentant la demande des bus (nombre de véhicules sur les lignes en simultané) sur une journée de service pendant l'horaire Lu-Ve

En fonction des conditions initiales données au programme, les solutions sont très variables. Par exemple, dans la simulation présentée dans la Figure 20 qui montre l'évolution de l'état de charge des différents véhicules de la flotte, il n'y a qu'un seul pantographe disponible à la gare. Par conséquent, la flotte de bus n'arrive pas à couvrir la demande entre 15h et 17h et des bus additionnels doivent être ajoutés pour satisfaire les horaires. Il faut ajouter 3 bus et obtenir un total de 16 bus nécessaires. Comme il n'y a pas assez de pantographes, l'état de charge de deux bus baisse aussi en dessous des 25%. Cela est dû au fait que les bus avaient tous juste le niveau minimal requis pour pouvoir repartir sur une ligne.

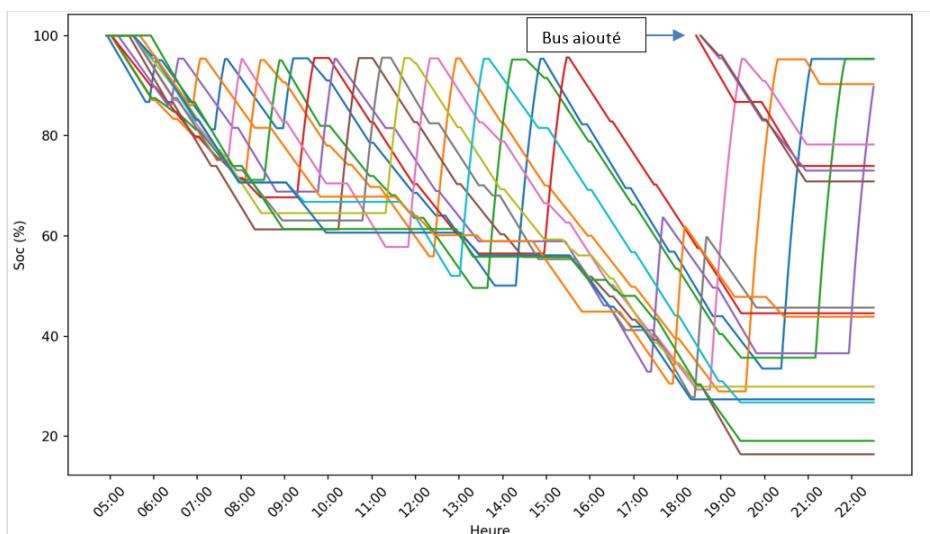


Figure 20 Résultat optimisation : bus 12m avec 1 seul pantographe disponible à la gare

Dans la Figure 21, montrant le résultat de la simulation avec cette fois 2 pantographes à la gare, aucun bus n'a été ajouté aux 13 bus de départ durant la journée. Les bus sont rechargés très souvent durant le début de journée pour pouvoir être suffisamment chargé dans la période 15h à 20h qui est la période pendant laquelle la demande est la plus importante de la journée.

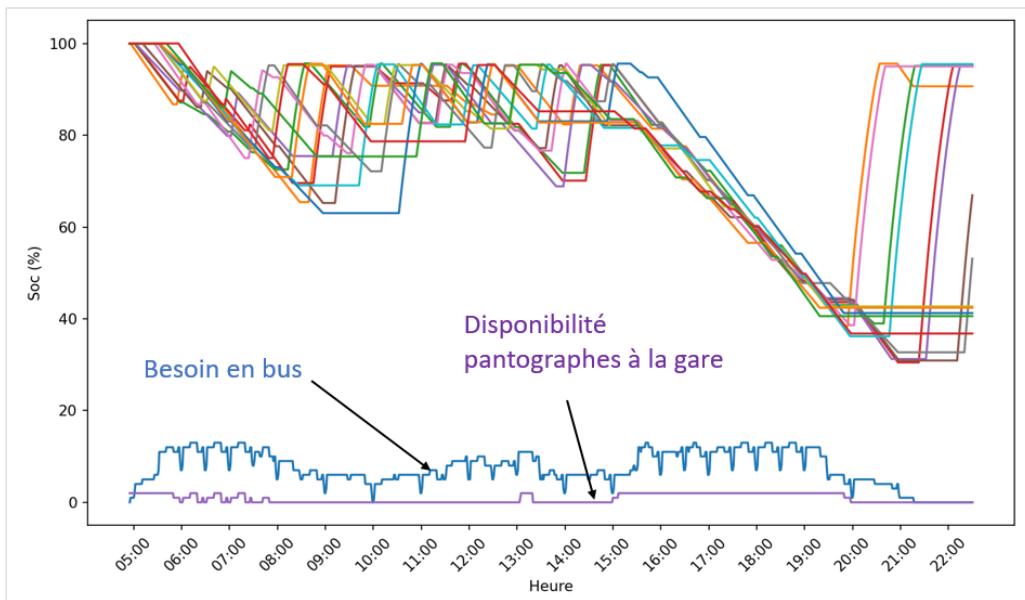


Figure 21 Résultat optimisation : bus 12m avec 2 seuls pantographes disponibles à la gare

Un dernier scénario a été simulé en ne mettant aucun pantographe à la gare. Le résultat de cette simulation est visible sur la Figure 22. Un total de 26 bus 12m est nécessaire.

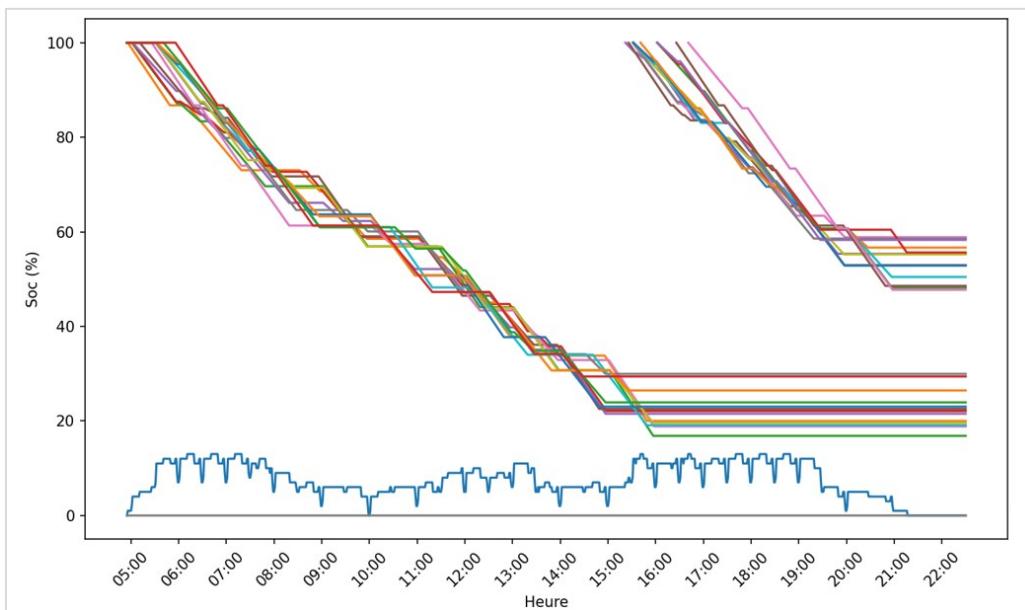


Figure 22 Résultat optimisation : bus 12m avec aucun pantographe disponible à la gare

Pour résumer les résultats obtenus dans ces simulations avec les bus 12m, le Tableau 20 est proposé.

Pantographe(s) à la gare	0	1	2	3 (pas représenté ici)
Nombre de bus	26	16	13	13 (pas représenté ici)
Besoin énergétique journalier				6244 kWh

Tableau 20 Résultat optimisation variante bus 12m : nombre minimal des bus et pantographes pour différents scénarios avec le besoin énergétique journalier

- Optimisation avec bus 10m

En utilisant la même approche que pour les véhicules 12m, les mêmes simulations ont été réalisées en considérant cette fois les véhicules de 10m. Dans la simulation présentée dans la Figure 23 il n'y a qu'un seul pantographe, en conséquence la flotte de bus n'arrive pas à couvrir la demande entre 15h et 17h et des bus additionnels doivent être ajoutés pour satisfaire les horaires. Un nombre de 13 bus doit être ajouté dans ce cas pour un total de 26 bus.

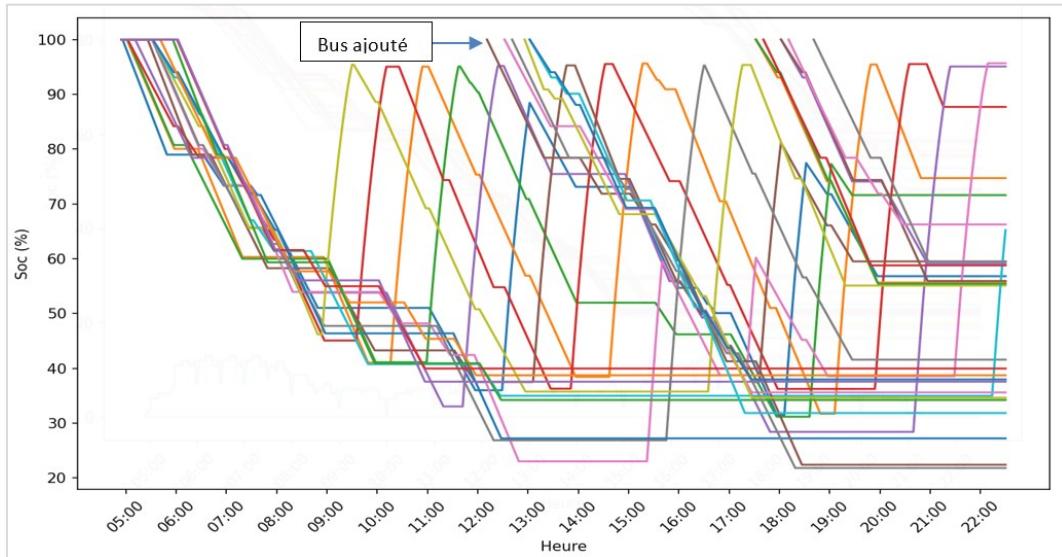


Figure 23 Résultat optimisation : bus 10m avec 1 pantographe disponible à la gare

En utilisant 3 pantographes, un seul bus a été ajouté aux 15 bus de départ durant la journée. Le bus est ajouté dans la période de 15h à 20h (Figure 24).

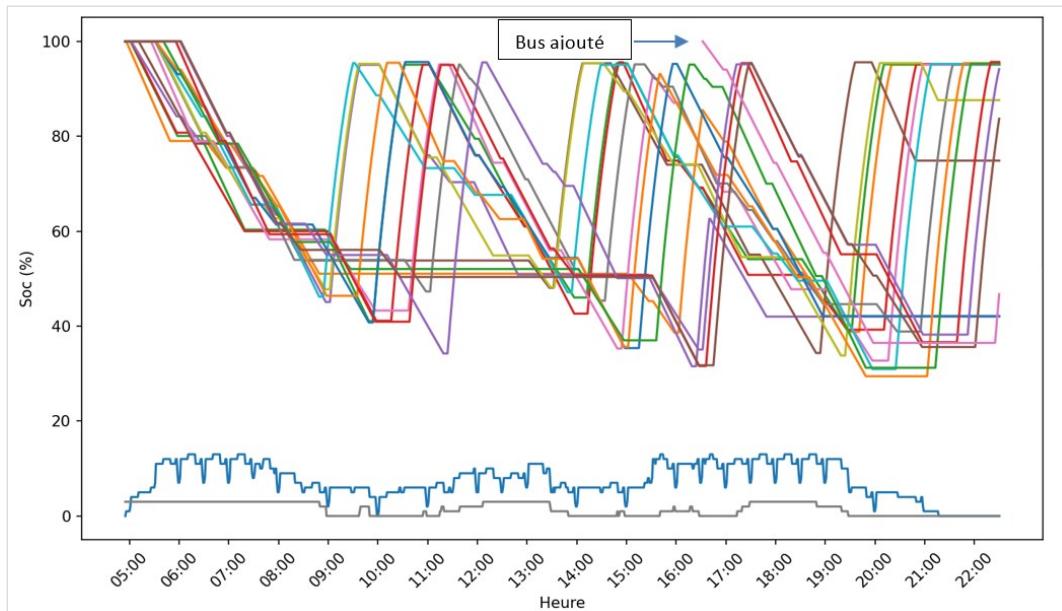


Figure 24 Résultat optimisation : bus 10m avec 3 pantographes disponibles à la gare

Aussi pour les véhicules 10m, un dernier scénario a été simulé en ne mettant aucun pantographe à la gare. Le résultat de cette simulation est visible sur la Figure 25. Un total de 39 bus est nécessaire.

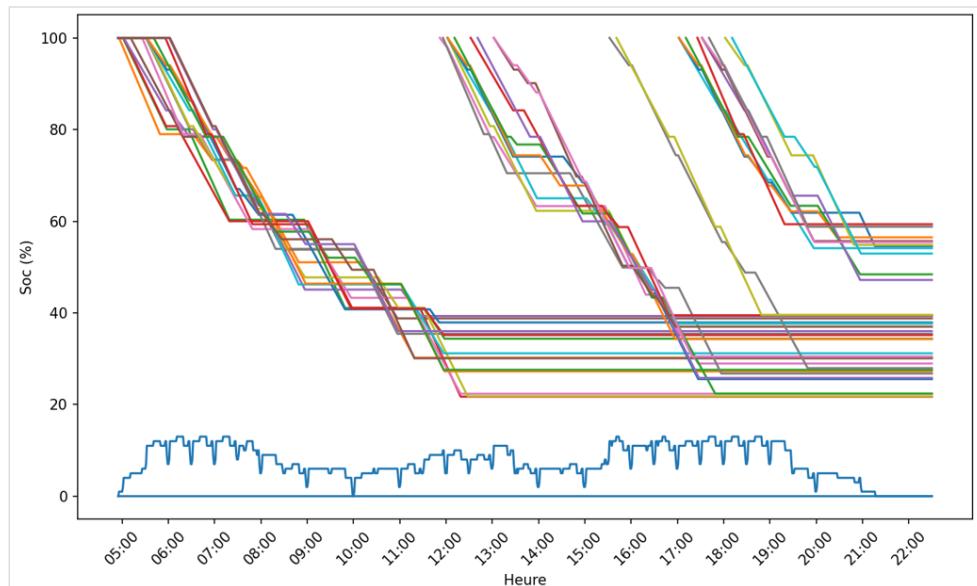


Figure 25 Résultat optimisation : bus 10m avec aucun pantographe disponible à la gare

Pour résumer les résultats obtenus dans ces simulations avec les bus 10m, le Tableau 21 est proposé.

Pantographe(s) à la gare	0	1	2 (pas présenté ici)	3
Nombre de bus	39	26	20 (pas présenté ici)	16
Besoin énergétique journalier	5413 kWh			

Tableau 21 Résultat optimisation avec bus 10m : nombre minimal de bus et pantographes pour différents scénarios avec besoin énergétique journalier

4.4 Calcul des coûts

Les résultats issus des outils numériques créés et présentés dans le chapitre 4.3 ont permis de réaliser le calcul des coûts pour les bus à propulsion électrique. Ces valeurs ont été comparées avec les frais estimés pour d'autres technologies de bus : diesel (bus actuels, valeurs de référence), gaz naturel et hydrogène.

Les calculs pour les variantes hydrogène et gaz naturel ont été réalisés sur la base des résultats obtenus pour l'électrique grâce à des valeurs de conversion. Les coûts qui ont été calculés considèrent l'infrastructure, l'achat des véhicules avec le temps d'amortissement, leurs entretiens, et aussi les coûts énergétiques. Ces derniers avec l'hypothèse que toute l'énergie nécessaire à l'exploitation des véhicules est achetée auprès des fournisseurs et aucune partie n'est produite. La production d'énergie sera analysée ensuite dans le chapitre 4.5.

En supplément à l'aspect économique (bilan des coûts), pour chaque variante l'aspect écologique a été également considéré en estimant l'impact environnemental avec les émissions CO₂. Ceci permet en effet d'argumenter une variante en lien avec les objectifs énergétiques de la confédération. Pour le bilan CO₂, il est important de souligner que les chiffres qui vont être donnés considèrent seulement l'utilisation des différentes énergies et pas l'énergie grise qui est nécessaire au cycle de vie des véhicules (fabrication, transport, stockage, ...etc).

4.4.1 Véhicules diesel (Référence actuelle)

Actuellement (août 2022), les transports publics en service à Porrentruy sont équipés de plusieurs véhicules diesel différents. Grâce aux informations fournies par CarPostal par rapport à ces véhicules, une référence avec la situation actuelle a pu être établie. Celle-ci sera ensuite comparée avec les autres systèmes de propulsion considérés dans l'étude.

Coûts des véhicules : achat et entretien

Les coûts des véhicules considèrent l'achat avec l'amortissement et l'entretien. Ils sont donnés sous forme de coûts annuels dans le Tableau 22. Les informations concernant les frais d'entretien, les distances parcourues et les durées d'amortissement nécessaire proviennent de CarPostal. Dans les chiffres proposés, les coûts annexes comme les assurances et les coûts des chauffeurs n'ont pas été considérés. En effet, ils ont été admis similaires pour toutes les technologies considérées, donc pas nécessaires pour la comparaison.

	Prix d'achat	Amortissement	Prix d'entretien	Nbr de bus	Distance par jour	Prix amort. pour l'ensemble des véhicules	Coûts d'entretien	
	CHF	an	CHF/km		km	CHF/an	CHF/an	
Bus MINI	450 000	10	0.60	1	270	45 000	59 218	
Bus MIDI	450 000	10		3	925	135 000	202 509	
Bus MAXI	520 000	12		9	2726	390 000	596 994	
				km/jour	CHF/an	CHF/an		
				3 921	570 000	858 721		

Tableau 22 Coûts de référence annuels pour les bus diesel utilisés actuellement dans le réseau des transports publics à Porrentruy : coûts véhicules, entretien et amortissement

Coûts liés au besoin énergétique

Pour une journée considérée comme jour ouvrable (lu-ve), la consommation en carburant diesel s'élève à 1482 [l] pour satisfaire l'ensemble des lignes. L'impact CO₂ lié à l'utilisation de ce carburant est de 2.64 [kg CO₂/l diesel]¹. Les calculs des coûts énergétiques sont proposés dans le Tableau 23 et ils ont été effectués avec un prix du carburant à 1.74 [CHF/l]². Comme mentionné dans cette référence, ce tarif considère le prix moyen du diesel pour l'année 2021. La valeur liée à la production de CO₂ pour l'exploitation des véhicules diesel est disponible dans la dernière colonne du Tableau 23.

Mois	Nb. Jours	Conso Diesel par mois	Prix Diesel par mois	CO ₂ Diesel
		l/mois	CHF/mois	tonnes/mois
Janv	31	45 942	79 939	121
Févr	28	41 496	72 203	110
Mars	31	45 942	79 939	121
Avr	30	44 460	77 360	117
Mai	31	45 942	79 939	121
Juin	30	44 460	77 360	117
Juill	31	45 942	79 939	121
Août	31	45 942	79 939	121
Sept	30	44 460	77 360	117
Oct	31	45 942	79 939	121
Nov	30	44 460	77 360	117
Déc	31	45 942	79 939	121
		I/an	CHF/an	tonnes/an
		540 930	941 218	1 428

Tableau 23 Coûts énergétiques annuels et impact CO₂ de référence pour une flotte avec des bus diesel

¹ 1 litre de diesel pèse 835 grammes. Le diesel est composé à 86.2% de carbone (C), ce qui correspond à 720 g de C par litre de diesel. Pour brûler ce C en CO₂, 1920 g d'oxygène sont nécessaires. La somme nous donne donc 720 + 1920 = 2640 g de CO₂ par litre de diesel.

² Diesel: moyenne mensuelle et annuelle (avenergy.ch) (07.04.22)

4.4.2 Véhicules à propulsion électrique

Les résultats liés aux véhicules électriques présentés dans ce sous-chapitre ont été calculés sur la base des modèles numériques. Selon les 2 variantes simulées, le calcul des coûts a été fait une fois pour la variante avec les bus 12 m et une fois pour celle avec les bus 10 m.

Coûts des véhicules : achat et entretien

Selon les informations fournies par CarPostal concernant les frais d'entretien, le temps d'amortissement et le prix des véhicules électriques, le Tableau 24 présente les coûts des véhicules pour en considérant des bus à 12m. Le même résultat obtenu en revanche pour les bus 10m est visible dans le Tableau 25 juste en dessous.

	Prix véhicule	Amortissement	Prix d'entretien	Nbr de bus	Distance par jour	Prix amort. par an pour l'ensemble des véhicules	Coûts d'entretien
	CHF	ans	CHF/km		km/jour	CHF/an	CHF/an
Bus électrique 12m	630 000	12	0.45	13	3846	682 500	631 706

Tableau 24 Coûts annuels pour une flotte avec bus 100% électriques 12m : coûts véhicules et entretien

	Prix véhicule	Amortissement	Prix d'entretien	Nbr de bus	Distance par jour	Prix amort. pour l'ensemble des véhicules	Coûts d'entretien
	CHF	ans	CHF/km		km/jour	CHF/an	CHF/an
Bus Electrique 10m	510 000	10	0.45	16	3846	816 000	631 706

Tableau 25 Coûts annuels pour une flotte avec bus 100% électriques 10m : coûts véhicules et entretien

Coûts liés au besoin énergétique

Grâce aux besoins énergétiques calculés pour les 2 configurations, les coûts énergétiques annuels ont été définis en considérant un prix d'achat de l'électricité, selon les informations de CarPostal, de 0.201 [CHF/kWh]. L'impact CO₂ a été défini en considérant le mix énergétique de production en Suisse qui s'élève à 128 [g/kWh]¹. Les résultats obtenus pour les 2 types de véhicules sont donnés dans le Tableau 26 pour les bus 12m et le Tableau 27 pour ceux à 10m.

Mois	Nb. Jours	Besoin énergétique journalier	Conso él. par mois	Prix él. par mois	CO ₂ réseau électrique	
		kWh/jour		kWh/mois		
Janv	31	6244	193 564	38 906	24.8	
Févr	28		174 832	35 141	22.4	
Mars	31		193 564	38 906	24.8	
Avr	30		187 320	37 651	24.0	
Mai	31		193 564	38 906	24.8	
Juin	30		187 320	37 651	24.0	
Juill	31		193 564	38 906	24.8	
Août	31		193 564	38 906	24.8	
Sept	30		187 320	37 651	24.0	
Oct	31		193 564	38 906	24.8	
Nov	30		187 320	37 651	24.0	
Déc	31		193 564	38 906	24.8	
			kWh/an	CHF/an	tonnes/an	
			2 279 060	458 091	292	

Tableau 26 Coûts énergétiques annuels et impact CO₂ pour une flotte avec 13 bus 100% électriques 12m

¹ [Le mix énergétique Suisse propice aux véhicules électriques - TCS Suisse \(07.04.22\)](#)

Mois	Nb. Jours	Besoin énergétique journalier	Conso élect. par mois	Prix élect. par mois	CO₂ réseau électrique	
		kWh/jour	kWh/mois	CHF/mois	tonnes/mois	
Janv	31	5413	167803	33 728	21.5	
Févr	28		151564	30 464	19.4	
Mars	31		167803	33 728	21.5	
Avr	30		162390	32 640	20.8	
Mai	31		167803	33 728	21.5	
Juin	30		162390	32 640	20.8	
Juill	31		167803	33 728	21.5	
Août	31		167803	33 728	21.5	
Sept	30		162390	32 640	20.8	
Oct	31		167803	33 728	21.5	
Nov	30		162390	32 640	20.8	
Déc	31		167803	33 728	21.5	
			kWh/an	CHF/an	tonnes/an	
			1 975 745	397 125	253	

Tableau 27 Coûts énergétiques annuels et impact CO₂ pour une flotte avec 16 bus 100% électriques 10m

Coûts liés à l'infrastructure

Selon la stratégie de charge définie (charge mixte), afin de définir les coûts totaux liés à l'infrastructure, le nombre des stations de charge au dépôt ainsi que les coûts des pantographes avec les frais d'installation étaient nécessaires. Le nombre des pantographes a été fourni par l'optimisation, tandis que le nombre des stations de charge au dépôt a été défini sur la base du nombre des bus. En effet, selon le fournisseur ABB pris comme référence, 1 station de charge au dépôt permet de charger 3 bus¹. Le prix d'installation a été défini sur la base des prix fournis par CarPostal provenant également du fournisseur ABB.

Les coûts liés à l'infrastructure pour la configuration 12 m se trouvent dans le Tableau 28, alors que ceux pour la variante 10m dans le Tableau 29. Il faut noter que pour les bus 10m, un total de 5 stations au dépôt pour 16 bus a été compté. Ceci est justifié en considérant ce qui a été observé dans la simulation (Figure 24). En effet le bus numéro 16 est ajouté seulement vers 16:00 h, ce qui permettrait donc de le charger pendant la journée quand il y a des places libres au dépôt.

À noter toutefois que les coûts d'adaptation du réseau électrique en gare de Porrentruy et au dépôt n'ont pas été pris en compte. Ces informations devront être investiguées dans une seconde étape avec le gestionnaire de réseau de distribution local BKW.

Type installation de charge	Prix d'installation	Prix station de charge	Nbr stations nécessaires	Prix total	Temps d'amortissement	Prix total annuel
	CHF	CHF	-	CHF	Ans	CHF/an
Pantographe	150 000	280 000	2	710 000	15	47 333
Station de charge dépôt	100 000	82 500	5 (pour 13 bus)	512 500	15	34 167

Tableau 28 Coûts infrastructure annuels liés aux stations de charge, configuration bus 12m

Type installation de charge	Prix d'installation	Prix station de charge	Nbr stations nécessaires	Prix total	Temps d'amortissement	Prix total annuel
	CHF	CHF	-	CHF	Ans	CHF/an
Pantographe	150 000	280 000	3	990 000	15	66 000
Station de charge dépôt	100 000	82 500	5 (pour 16 bus)	512 500	15	34 167

Tableau 29 Coûts infrastructure annuels liés aux stations de charge, configuration bus 10m

¹ [Electric Bus Charging Station | Electric Truck Charging | ABB](#) (16.03.22)

4.4.3 Véhicules à gaz naturel compressé (CNG)

Selon les besoins énergétiques des bus diesel (chapitre 4.4.1), une évaluation a été réalisée en utilisant la même quantité d'énergie nécessaire pour le même nombre des bus fonctionnant au gaz naturel. Ces valeurs ont été adaptées à l'horaire de l'année 2022 qui a été utilisé dans les simulations.

Coûts des véhicules : achat et entretien

Pour des raisons de manque d'informations détaillées concernant la masse et le prix notamment, un seul type de véhicule à gaz générique a été considéré et intégré pour l'ensemble des 13 véhicules nécessaires pour garantir les besoins de l'horaire selon la simulation effectuée au chapitre 4.3.2 pour les bus électriques 12 m. Le prix d'un véhicule à gaz a été fixé au prix d'un véhicule diesel majoré de 15%¹. Les frais d'entretien et le temps d'amortissement utilisé ont été en revanche gardés identiques par rapport aux bus diesel. Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 30.

	Prix véhicule	Amortissement	Prix d'entretien	Nbr de bus	Distance par jour	Prix amort. par an pour l'ensemble des véhicules	Coûts d'entretien
	CHF	an	CHF/km			CHF/an	CHF/an
Bus CNG	598 000	12	0.6	13	3846	647 833	842 274

Tableau 30 Coûts annuels pour la variante avec bus CNG : coûts véhicules, entretien et amortissement

Coûts liés au besoin énergétique

Sur la base du besoin journalier de diesel, la consommation équivalente en gaz naturel (CNG) s'élève à 1098 [kg] par jour pour satisfaire l'ensemble des lignes. Ceci a été calculé en considérant l'équivalent de 1.35 [l] de diesel pour 1 [kg] CNG². Selon la même référence, il a été également possible de définir l'impact CO₂ lié à l'utilisation de ce carburant à 2.79 [kg CO₂/kg_{cng}]. Pour l'impact CO₂ une variante a été également établie en considérant la présence de biogaz³, ce qui réduit donc les émissions. Les résultats liés aux coûts énergétiques qui considèrent une flotte avec bus au gaz naturel se trouvent dans le Tableau 31.

Mois	Nb. Jours	Conso CNG par mois	Prix CNG par mois	CO ₂ CNG	CO ₂ CNG avec 20% de Biogaz
		tonnes/mois	CHF/mois	tonnes/mois	tonnes/mois
Janv	31	34.0	54 441	94.9	75.9
Févr	28	30.7	49 172	85.7	68.6
Mars	31	34.0	54 441	94.9	75.9
Avr	30	32.9	52 685	91.9	73.5
Mai	31	34.0	54 441	94.9	75.9
Juin	30	32.9	52 685	91.9	73.5
Juill	31	34.0	54 441	94.9	75.9
Août	31	34.0	54 441	94.9	75.9
Sept	30	32.9	52 685	91.9	73.5
Oct	31	34.0	54 441	94.9	75.9
Nov	30	32.9	52 685	91.9	73.5
Déc	31	34.0	54 441	94.9	75.9
		tonnes/an	CHF/an	tonnes/an	tonnes/an
		401	640 998	1118	894

Tableau 31 Coûts énergétiques et impact CO₂ annuels pour une flotte avec des bus CNG

Porrentruy ne disposant pas de réseau de gaz naturel, le transport du gaz est un défi. Une réflexion prenant en compte la production locale de biogaz doit être menée en parallèle afin de résoudre les questions de transport et améliorer significativement le bilan énergétique lié à cette source d'énergie.

¹ transbus.org - Dossier : Autobus GNV / bioGNV : gaz naturel pour véhicules (07.04.22)

² [Comparez les émissions de l'essence, du diesel et du GNC \(cng-mobility.ch\)](http://cng-mobility.ch) (07.04.22)

³ Le GNC disponible aux pompes des stations-service helvétiques contenait 27,3 % de biogaz en moyenne en 2020. Le Conseil fédéral reconnaît une part de biogaz de 20 % dans l'ordonnance sur les exigences relatives à l'efficacité énergétique. Les émissions CO₂ affectant le climat ne s'élèvent donc qu'à 80 % de celles du gaz fossile

4.4.4 Véhicules à hydrogène

Coûts des véhicules : achat et entretien

Afin de définir les coûts liés aux véhicules pour la variante hydrogène, les prix d'achat de ces véhicules utilisés par CarPostal dans leurs études a été employé. En revanche, le nombre des véhicules ainsi que la distance journalière parcourue ont été définis sur la base des résultats de la simulation avec les véhicules électriques 12 m. Le tarif d'entretien utilisé pour le calcul des coûts de maintenance a été également admis identique à celui utilisé pour les bus électriques 12 m. Le Tableau 32 liste les coûts des véhicules avec la variante hydrogène sous les hypothèses mentionnées.

	Prix véhicule	Amortissement	Prix d'entretien	Nbr de bus	Distance par jour	Prix amort. par an pour l'ensemble des véhicules	Coûts d'entretien
	CHF	ans	CHF/km		km/jour	CHF/an	CHF/an
Bus Hydrogène	800 000	12	0.45	13	3846	866 667	631 706

Tableau 32 Coûts annuels pour la variante avec bus H₂ : coûts véhicules, entretien et amortissement

Coûts liés au besoin énergétique

Le besoin énergétique pour des bus à hydrogène a été défini sur la base d'une consommation moyenne d'hydrogène par kilomètre fournie par CarPostal. En moyenne, un bus hydrogène 12 m consomme entre 6 et 8 [kg] d'hydrogène pour parcourir 100 [km]. Une consommation de 7 [kg H₂/100km] a donc été admise pour cette étude. Avec la distance journalière parcourue par les bus, il a été donc possible d'estimer la masse d'hydrogène consommée quotidiennement pour obtenir une énergie équivalente à un bus électrique (hypothèse de quantité énergétique équivalente). Cette-ci s'élève à 266.5 [kg H₂/jour] de gaz mis en forme à 350 [bars] pour l'ensemble de la flotte (13 bus). Cette quantité peut être soit achetée depuis une station externe, soit produite en interne à partir de l'électrolyse de l'eau.

Dans le premier cas, l'estimation des coûts énergétiques a été faite sur la base d'un prix de référence de l'hydrogène qui est distribué en Suisse par la station Coop. Ce prix s'élève à 9.30 [CHF/kg H₂]¹. Pour cette solution, aucune information sur l'impact CO₂ de la production d'hydrogène a été trouvé. Il semble néanmoins qu'ils le produisent à partir d'une installation hydroélectrique donc avec un impact CO₂ faible. Le Tableau 33 donne les coûts énergétiques lorsque l'hydrogène est acheté depuis une station.

Mois	Nb. Jours	Conso H ₂ par mois	Prix H ₂ à la station (Source COOP)
		kg/mois	CHF/mois
Janv	31	8 262	76 832
Févr	28	7 462	69 397
Mars	31	8 262	76 832
Avr	30	7 995	74 354
Mai	31	8 262	76 832
Juin	30	7 995	74 354
Juill	31	8 262	76 832
Août	31	8 262	76 832
Sept	30	7 995	74 354
Oct	31	8 262	76 832
Nov	30	7 995	74 354
Déc	31	8 262	76 832
		kg/an	CHF/an
		97 273	904 634

Tableau 33 Coûts énergétique annuel pour la variante H₂ avec l'hypothèse d'achat de l'hydrogène depuis une station

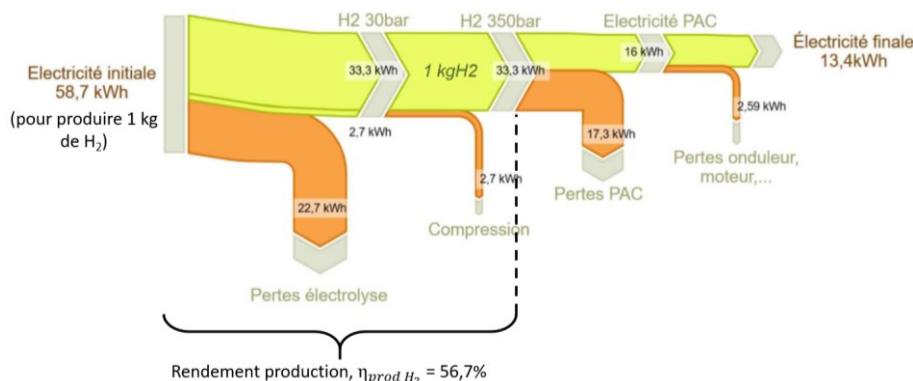
¹ [Coop et Hyundai : Première station service publique d'hydrogène en suisse | UPSA | AGVS - Section Vaud \(upsa-vd.ch\)](#) (22.08.22)

Dans le deuxième cas, pour définir les coûts énergétiques, le prix de l'énergie électrique nécessaire provenant du réseau pour l'électrolyse de l'eau et pour la mise en forme de l'hydrogène à 350 [bars] a été estimé. Pour ce faire, initialement, la masse d'hydrogène nécessaire journalier pour les 13 bus (266.5 kg_{H2}/jour) a été convertie en une consommation journalière électrique à travers le pouvoir calorifique inférieur (PCI) de l'hydrogène admis à 120·10⁶ [J/kg], soit 33.3 [kWh/kg] en utilisant l'Équation 2.

$$E_{H_2,\text{consommée}} = m_{H_2,\text{jour}} \cdot PCI_{H_2}$$

Équation 2 Relations utilisées pour calcul de la consommation journalière électrique avec la variante hydrogène

Ensuite, pour définir la quantité d'énergie nécessaire à fournir depuis le réseau pour la production d'hydrogène (Équation 3), les pertes liées à sa production ont été considérées à travers le schéma proposé sur la Figure 26. Ceci a permis d'estimer un rendement de production d'hydrogène de 56.7% (passage de 58.7 [kWh] à 33.3 [kWh]).



$$E_{H_2,\text{produite}} = \frac{E_{H_2,\text{consommée}}}{\eta_{\text{prod } H_2}}$$

Équation 3 Calcul de l'énergie électrique sur le réseau à fournir pour produire l'H₂ par électrolyse

Figure 26 Illustration des pertes liées à la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau¹

Le résultat donne un total de 15659 [kWh] à fournir journalier au réseau pour la production de l'hydrogène nécessaire. Grâce au prix d'achat de l'électricité de 0.201 [CHF/kWh], il a été donc possible de calculer les coûts énergétiques annuels pour produire l'hydrogène. Dans ce cas l'impact CO₂ a pu être également calculé en prenant la valeur du mix énergétique de production en Suisse de 128 [g/kWh] utilisée précédemment. Le bilan final des coûts énergétiques pour cette variante se trouve dans le Tableau 34. Le coût énergétique est supérieur à celui de la station présentée dans le Tableau 33.

Mois	Nb. Jours	Énergie à fournir pour production H ₂	Prix production électrique H ₂	CO ₂ réseau électrique
		kWh/jour	CHF/mois	tonnes/mois
Janv	31	15 659	97 567	62
Févr	28		88 125	56
Mars	31		97 567	62
Avr	30		94 420	60
Mai	31		97 567	62
Juin	30		94 420	60
Juill	31		97 567	62
Août	31		97 567	62
Sept	30		94 420	60
Oct	31		97 567	62
Nov	30		94 420	60
Déc	31		97 567	62
			CHF/an	tonnes/an
			1 148 777	732

Tableau 34 Coûts énergétiques annuels pour la variante H₂ avec l'hypothèse de production de l'hydrogène avec l'énergie électrique du réseau

Des projets de productions d'hydrogène vert dans la région sont en cours. Le transport de l'hydrogène est un défi majeur et n'est pas prévu dans ces projets orientés production.

¹ Source: [L'hydrogène, élément-clé de la transition énergétique ? \(romande-energie.ch\)](http://romande-energie.ch) (22.08.22)

Coûts liés à l'infrastructure

Les stations à hydrogène sont une nouvelle infrastructure et sont en nombre réduit en Suisse et en Europe. Afin d'effectuer une estimation pour les coûts liés à l'infrastructure pour la variante hydrogène, des informations ont été trouvées pour une station à hydrogène situé à Pau mise en service en 2019. Cette station produit de l'hydrogène à partir de l'électrolyse de l'eau avec de l'énergie provenant des panneaux solaires. Selon les informations récoltées, elle a une production journalière de 200 [kg_{H2}/jour] et elle a coûté 4,5 millions d'euros (Figure 27) [24].

200 kgH₂/jour production sur site

Prix : 4,5M€, Pau



Figure 27 Schéma de principe station hydrogène de Pau (Source [24])

Avec la masse journalière d'hydrogène nécessaire pour alimenter les 13 bus qui a été calculée auparavant (266.5 [kg_{H2}/jour]), un prix approximatif de l'installation de 6'236'100 [CHF] a pu être calculé en considérant que 1 Euro vaut 1.04 CHF (état avril 2022). En considérant un prix pour l'amortissement sur 20 ans, un montant annuel de 311'805 [CHF/ans] a pu donc être estimé. Ces prix sont cohérents avec d'autres analyses qui ont été réalisées, en prenant en compte le prix de l'électrolyseur ainsi que le prix du stockage. Il est possible d'imaginer qu'avec l'évolution de ces technologies, la capacité et les coûts des stations à hydrogène vont augmenter et diminuer respectivement selon la tendance montrée sur la Figure 28 [25].

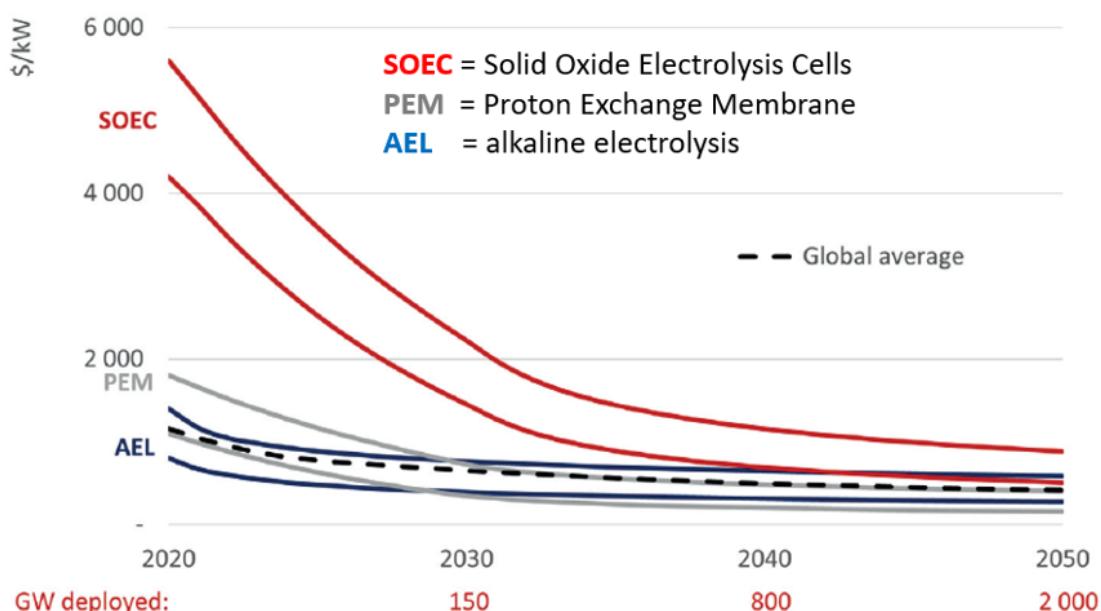


Figure 28 Prévision des coûts et de la capacité des électrolyseurs entre 2020 et 2050, [25][25] p18

4.4.5 Analyse comparative des solutions retenues

Ce dernier sous-chapitre lié aux calculs des coûts présente une comparaison des solutions présentées dans les sections précédentes (4.4.1 - 4.4.4). Le **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** fourni une comparaison des coûts annuels (véhicules, énergétiques et infrastructure) et des impacts CO₂ calculés pour chaque technologie retenue dans cette étude. Pour comparer les solutions de manière équivalente, l'impôt sur les huiles minérales (0.7957 CHF/l)¹ a été enlevé pour la variante Diesel. La nouvelle référence se trouve dans la ligne grisée. Ces taxes sont majoritairement affectées à la construction des routes et à leur entretien. Ce qui n'est pas le cas pour les autres solutions considérées.

	Nombre des bus minimums nécessaires dans la flotte	Prix des véhicules selon amortissement	Coûts d'entretien	Prix énergie	Prix stations de charge dépôt (ou rempissage H ₂)	Prix stations de charge pantographe	Prix total	CO ₂ énergie
		CHF/an						
Diesel		570 000	858 721	919 581	-	-	2 348 302	1 428
Diesel Sans taxe 0.7957 CHF/l		570 000	858 721	489 163	-	-	1 917 884	1 428
CNG	13	647 833	842 274	640 998	-	-	2 131 106	1 118
CNG avec 20% Biogaz		647 833	842 274	640 998	-	-	2 131 106	894
Bus électrique 12m		682 500	631 706	458 091	34 167	47 333	1 853 797	292
Bus électrique 10m	16	816 000	631 706	397 125	34 167	66 000	1 944 997	253
Bus Hydrogène avec station-service type COOP	13	866 667	631 706	904 634	311 805	-	2 714 811	Aucune valeur

Tableau 35 Tableau avec une comparaison des coûts annuels et les bilans énergétiques pour les différentes solutions proposées avec sources d'énergie achetées chez des fournisseurs

Les résultats du **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** permettent de mettre en évidence la faisabilité du changement de technologie. On constate que la solution à Hydrogène (en rouge) est nettement plus onéreuse que la solution actuelle Diesel. Pour cette option, aucune valeur d'émission CO₂ n'a été trouvé. Étant donné que ces valeurs sont très dépendantes du mode de production et de mise en forme. (En admettant que l'hydrogène soit produit à partir du réseau électrique, les émissions CO₂ seraient de 732 [tonnes/an]).

La variante à CNG (en orange) est également un peu plus coûteuse, mais produit moins de CO₂ (dépendant de la part de biogaz prise en compte dans le carburant).

La meilleure solution qui permet d'être dans les mêmes ordres de prix que la solution Diesel actuelle, mais qui émet environ 5 fois moins de CO₂ pour l'exploitation est la solution électrique (en vert). L'énergie grise liée aux véhicules notamment à leurs batteries n'a pas été considérée. D'autre part la solution électrique permet de réduire considérablement les émissions sonores dans les villes et les villages.

Des investigations complémentaires seront nécessaires dans une étape ultérieure visant par la suite à écarter des variantes :

- La capacité de production des biogaz de la région permettrait de comparer le potentiel de production et la consommation pour améliorer la part prise en compte dans le modèle ci-dessus.
- Des systèmes de purification et transport du biogaz sont à l'étude, le transport de cette source d'énergie étant un défi dans une région comme Porrentruy ne disposant pas d'un réseau de gaz.
- L'adaptation du mix électrique Suisse vers le mix BKW permettrait une meilleure fiabilité des données CO₂.

¹ [Impôt sur les huiles minérales \(admin.ch\)](#)

- Des projets-pilotes prometteurs voient le jour dans la région concernant la production d'hydrogène. Le transport jusqu'au dépôt ou à la gare routière reste un défi majeur.

4.5 Solution de production d'énergie

Pour anticiper des solutions d'autonomie énergétique, une analyse de quelques scénarios de production d'énergie sur site à l'aide de panneaux solaires a été produite. La base de l'étude a été faite sur la base d'informations d'une centrale solaire située dans la région de Neuchâtel et qui est complètement instrumentée (Figure 29). Ces informations doivent être très similaires avec une production à Porrentruy (peu de différence géographique par rapport au soleil entre Neuchâtel et Porrentruy).

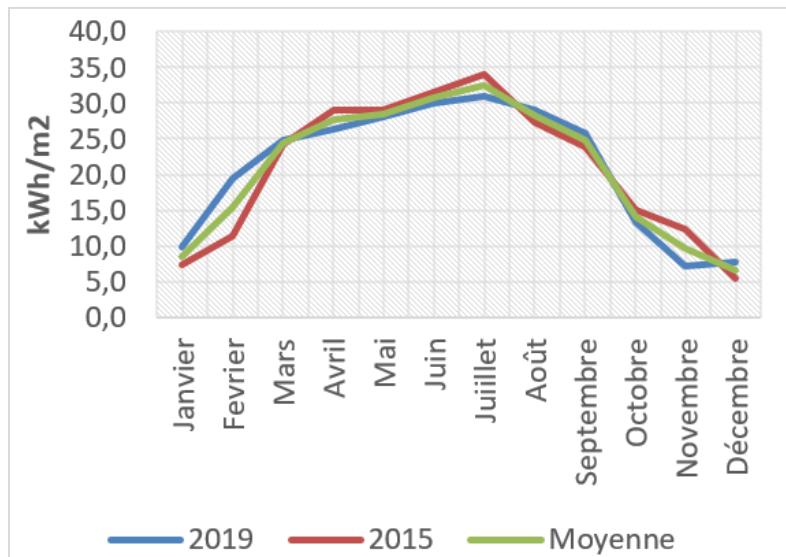


Figure 29 Données production solaire par mois centrale à Neuchâtel

4.5.1 Production d'énergie solaire équivalente

Une première solution faite pour les besoins énergétiques d'une flotte composée de bus de 12m a été réalisée. Cette solution permet de produire l'énergie équivalente annuelle (environ 2'300'000 kWh) avec une centrale solaire. Malheureusement, cette solution ne permet de charger directement les bus uniquement pendant la journée. La proximité entre le lieu de production et le lieu de consommation n'est pas prise en compte à ce stade (l'énergie produite à proximité du dépôt pour être consommée à la gare devra passer par le réseau, avec application des taxes usuelles). Le reste de la charge est fait lorsqu'il n'y a pas d'énergie solaire à disposition. Ci-dessous, les données électriques qui ont été prises en compte pour cette analyse. Ces informations ont été prises en compte pour calculer les coûts de l'électricité. Lorsque la production permet de recharger les bus (pendant la journée) l'énergie provient directement de l'installation solaire, sinon l'énergie produite est revendue au réseau électrique au prix du marché soit 8 [cts/kWh].

Consommation électrique bus 12m	Prix E électrique achat	Prix E électrique vente	CO ₂ réseau électrique
kWh/jour	CHF/kWh	CHF/kWh	g/kWh
6244	0.201	0.08	128

Pour produire annuellement l'équivalent énergétique, il faut installer 9 100 [m²] de panneaux solaires soit environ 1.4 terrain de football (6500 m²). Le coût de l'installation qui se trouve dans le Tableau 36 a été basé sur les informations de la centrale solaire qui sera produite par Varo Energy dans le canton de Neuchâtel¹.

Prix panneaux ³⁷	Surface panneaux	Nbr de terrain de foot	Prix panneaux solaires
CHF/m ²	m ²	-	CHF
144.4	9100	1.40	1 314 040

¹ [VARO Energy - L'installation solaire au sol la plus puissante de Suisse verra le jour à Cressier \(NE\)](#) (24.08.22)

Tableau 36 Variante production énergie équivalente avec centrale solaire : estimation coûts panneaux et surface nécessaire

L'énergie permettant de recharger les bus pendant la journée soit entre 9h et 17h est de 2103 kWh. Une valeur de 1900 kWh sera prise pour les calculs de la partie de l'énergie directement récupérable de l'installation solaire. L'énergie supplémentaire nécessaire sera achetée au réseau et le surplus de production solaire sera également revendu au réseau selon les tarifs indiqués précédemment. Ici, il ne faut pas oublier que la partie d'électricité revendue au réseau est parfaitement décarbonée. Le Tableau 37 contient le bilan par mois de l'énergie nécessaire, produite et utilisable avec les coûts respectifs.

Mois	Nb. Jours	Prod. solaire	Conso Bus 12m	Production centrale solaire	Partie utilisable de la production solaire	Énergie E suppl. à acheter	Énergie restante à vendre	Prix énergie selon les tarifs achats et vente	CO ₂ réseau élec.
		kWh/ m ² mois	kWh/mois	kWh/mois	kWh/mois	kWh/mois	kWh/mois	CHF/ mois	t/mois
Janv	31	8.56	193 564	77 919	58 900	134 664	19 019	25 546	17.2
Févr	28	15.39	174 832	140 055	53 200	121 632	86 855	17 500	15.6
Mars	31	24.52	193 564	223 092	58 900	134 664	164 192	13 932	17.2
Avr	30	27.69	187 320	251 956	57 000	130 320	194 956	10 598	16.7
Mai	31	28.55	193 564	259 777	58 900	134 664	200 877	10 997	17.2
Juin	30	30.78	187 320	280 109	57 000	130 320	223 109	8 346	16.7
Juill	31	32.50	193 564	295 750	58 900	134 664	236 850	8 119	17.2
Août	31	28.19	193 564	256 506	58 900	134 664	197 606	11 259	17.2
Sept	30	24.81	187 320	225 794	57 000	130 320	168 794	12 691	16.7
Oct	31	14.08	193 564	128 111	58 900	134 664	69 211	21 531	17.2
Nov	30	9.72	187 320	88 441	57 000	130 320	31 441	23 679	16.7
Déc	31	6.53	193 564	59 434	58 900	134 664	534	27 025	17.2
		kWh/an	kWh/an	kWh/an	kWh/an	kWh/an	CHF/ an	t/an	
		2 279 060	2 286 944	730 000	1 549 060	1 556 944	186 806	198	

Tableau 37 Variante production énergie équivalente avec centrale solaire : bilan annuel de production, consommation d'énergie et impact CO₂

4.5.2 Production d'énergie solaire et stockage dans des batteries

Cette deuxième solution proposée permettrait de produire l'énergie avec une centrale solaire, la stocker dans des batteries pour alimenter les bus notamment pendant la nuit. Dans cette configuration, la taille de l'installation solaire a dû être augmentée pour garantir l'approvisionnement même pendant le mois avec la plus faible production soit décembre. La centrale solaire représente 4.6 terrains de football et son prix est de 4 332 000 CHF toujours sur la base des informations récoltées pour la centrale installée par Varo Energy (Tableau 38). C'est un investissement important, mais qui permettrait de ne pas émettre de CO₂ liés à l'énergie nécessaire pour le déplacement des véhicules. La proximité entre le lieu de production et le lieu de consommation n'est pas prise en compte à ce stade (l'énergie produite à proximité du dépôt pour être consommée à la gare devra passer par le réseau, avec application des taxes usuelles).

Consommation électrique bus 12m	Prix E électrique vente	Énergie à stocker	Prix panneaux ¹	Surface panneaux	Nbr terrain foot	Prix panneaux solaires
kWh/jour	CHF/kWh	kWh/jour	CHF/m ²	m ²	-	CHF
6244	0.08	4344	144.4	30 000	4.6	4 332 000

Tableau 38 Variante production énergie avec centrale solaire et stockage dans batteries : estimation coûts panneaux et surface nécessaire

¹ [VARO Energy - L'installation solaire au sol la plus puissante de Suisse verra le jour à Cressier \(NE\)](#) (24.08.22)

De manière analogue à la première solution analysée (production équivalente), un bilan par mois de l'énergie nécessaire, produite et utilisable avec les coûts respectifs a été également fait pour cette deuxième possibilité. Il est présenté dans le Tableau 29. Les valeurs négatives correspondent à l'énergie qui peut être vendue. C'est dans cette situation que la centrale solaire permet de produire plus de trois fois la quantité d'énergie nécessaire sur l'année complète. Mais il est néanmoins nécessaire d'avoir cette surface pour garantir l'approvisionnement pendant les mois qui ont un faible ensoleillement. Cette solution permet de vendre l'énergie restante au réseau et de gagner des montants non négligeables de plus de 400 000 CHF/an.

Mois	Nb. Jours	Production solaire	Conso Bus 12m	Production centrale solaire	Énergie restante à vendre	Prix énergie selon les tarifs achats et vente	CO2 réseau électrique
		kWh/m ² mois	kWh/mois	kWh/mois	kWh/mois	CHF/mois	t/mois
Janv	31	8.56	193 564	256 875	63 311	-5 065	0.0
Févr	28	15.39	174 832	461 719	286 887	-22 951	0.0
Mars	31	24.52	193 564	735 469	541 905	-43 352	0.0
Avr	30	27.69	187 320	830 625	643 305	-51 464	0.0
Mai	31	28.55	193 564	856 406	662 842	-53 027	0.0
Juin	30	30.78	187 320	923 438	736 118	-58 889	0.0
Juill	31	32.50	193 564	975 000	781 436	-62 515	0.0
Août	31	28.19	193 564	845 625	652 061	-52 165	0.0
Sept	30	24.81	187 320	744 375	557 055	-44 564	0.0
Oct	31	14.08	193 564	422 344	228 780	-18 302	0.0
Nov	30	9.72	187 320	291 563	104 243	-8 339	0.0
Déc	31	6.53	193 564	195 938	2 374	-190	0.0
		kWh/an	kWh/an	kWh/an	CHF/an	t/an	
		2 279 060	7 539 375	5 260 315	-420 825	0.0	

Tableau 39 Variante production énergie avec centrale solaire et stockage dans batteries : bilan annuel de production, consommation d'énergie et impact CO₂

En revanche il faut stocker l'énergie nécessaire, soit 4344 [kWh/jour], dans des batteries et là, deux hypothèses ont été faites :

1. Avec des batteries NMC (Nickel Manganèse Cobalt).

Les 6000 cycles représentent une durée de vie de plus de 16 ans, valeur qui a été prise pour calculer l'amortissement de l'installation.

Coût batteries NMC	Durée de vie	Prix Batteries NMC	Émissions CO ₂
CHF/kWh	Nbr de cycles	CHF	kg CO ₂ /kWh
500 ¹	6000 ³⁹	2 172 000	160 (selon [23])

Tableau 40 Estimation coûts avec données énergétiques pour stockage dans des batteries NMC

2. Avec des batteries Li-Ti (Lithium-Titanate).

Le nombre de cycles entre 15 000 et 20 000 donne une durée de vie de plus de 40 ans. Pour les calculs, le nombre de cycles est de 7300 soit 20 ans. Le coût de la batterie est deux fois plus important, mais elle devrait durer plus longtemps, même bien après sa période d'amortissement.

Batteries Li-Ti	Nbr de cycles	Prix batteries Li	Émissions CO ₂
CHF/kWh	-	CHF	kg CO ₂ /kWh
1000 ²	7300	4 344 000	73 ³

Tableau 41 Estimation coûts avec données énergétiques pour stockage dans des batteries Li-Ti

¹ Selon discussion avec prof J-F Affolter: 300-700 CHF/kWh, durée de vie 6000 cycles pour technologie NMC

² Selon discussion avec prof J-F Affolter: 1000-1200 CHF/kWh, durée de vie 15000-20000 cycles pour technologie NMC

³ Source: [What is the environmental impact of lithium batteries? \(changeit.app\)](https://changeit.app/) (24.08.22)

4.5.3 Production d'hydrogène à partir d'énergie solaire avec stockage dans des réservoirs

Pour cette troisième variante de production d'énergie, l'objectif était de dimensionner une installation permettant, grâce à l'énergie solaire, de produire de l'hydrogène par électrolyse et ensuite de le comprimer à 350 bars pour le stocker dans des réservoirs.

Cette solution permettrait de ne pas émettre de CO₂ liés à l'énergie nécessaire aux véhicules pour circuler. Il est néanmoins important de mettre en évidence que le CO₂ lié à l'énergie grise nécessaire à la production de l'installation n'a pas été prise en compte, car ces informations sont très difficiles à obtenir et devrait par conséquent faire l'objet d'une autre étude plus détaillée. Pour cette hypothèse, on s'est basé sur la même centrale solaire que celle calculée dans l'hypothèse précédente depuis les informations de la centrale Varo Energy (Tableau 42).

Energie pour produire et mettre en forme H ₂	Prix panneaux	Surface panneaux	Nbr de terrain de foot	Prix panneaux solaire
kWh/jour	CHF/m ²	m ²	-	CHF
15658	144.4	30000	4.6	4 332 000

Tableau 42 Variante production H₂ avec stockage dans réservoirs : coûts panneaux solaires pour produire l'H₂ par électrolyse

Ci-dessous, les informations énergétiques de cette solution qui permet de produire l'hydrogène. Il est possible de constater que malgré la surface importante de la centrale solaire, l'énergie solaire ne suffit pas pour produire l'hydrogène d'octobre à janvier (valeurs négatives).

Mois	Nb. Jours	Énergie nécessaires pour produire et mettre en forme l'H ₂	Production solaire	Bilan entre la production et l'énergie pour l'H ₂	Prix énergie selon les tarifs achats et vente	CO ₂ réseau électrique
		kWh/mois	kWh/mois	kWh/mois	CHF/mois	t/mois
Janv	31	485 410	256 875	-228 535	45 936	29.3
Févr	28	438 435	461 719	23 284	-1 863	0.0
Mars	31	485 410	735 469	250 059	-20 005	0.0
Avr	30	469 751	830 625	360 874	-28 870	0.0
Mai	31	485 410	856 406	370 996	-29 680	0.0
Juin	30	469 751	923 438	453 686	-36 295	0.0
Juill	31	485 410	975 000	489 590	-39 167	0.0
Août	31	485 410	845 625	360 215	-28 817	0.0
Sept	30	469 751	744 375	274 624	-21 970	0.0
Oct	31	485 410	422 344	-63 066	12 676	8.1
Nov	30	469 751	291 563	-178 189	35 816	22.8
Déc	31	485 410	195 938	-289 472	58 184	37.1
		kWh/an	kWh/an	kWh/an	CHF/an	t/an
		5 715 309	7 539 375	1 824 066	-54 055	97.2

Tableau 43 Variante production H₂ avec stockage dans réservoirs : bilan annuel de production, consommation d'énergie et impact CO₂

Pour convertir l'énergie solaire en hydrogène, il faut un électrolyseur et un compresseur et des réservoirs. Dans les tableaux ci-dessous les informations concernant l'électrolyseur et le réservoir qui ont permis d'estimer les coûts. Pour les calculs financiers annuels, il a été pris un amortissement de 20 ans sur les différents éléments nécessaires à la production et à la mise en forme de l'hydrogène.

Puissance électrolyseur à 175 W/m ² crête ¹	Coûts des électrolyseurs	Prix des électrolyseurs	Prix des électrolyseurs amortissement sur 20 ans	Prix du compresseur	Prix du compresseur amortissement sur 20 ans
kW	CHF/kW	CHF	CHF/an	CHF	CHF/ans
5250	1000	5 250 000	262 500	30 000	1500

Tableau 44 Variante production H₂ avec stockage dans réservoirs : frais liés à l'électrolyseur et le compresseur

Hydrogène à stocker par an	Coûts de stockage H ₂ à 350 bars (1600 CHF/150 kg)	Prix du réservoir H ₂	Prix du réservoir H ₂ amortissement sur 20ans
kg d'H ₂ /an	CHF/kg H ₂ @350	CHF	CHF/an
22801	10.67	243207	12160

Tableau 45 Variante production H₂ avec stockage dans réservoirs : frais liés au réservoir

¹ Photovoltaïque.info - Performance des modules photovoltaïques (24.08.22)

4.5.4 Analyse comparative avec les solutions de production et stockage d'énergie

Le Tableau 46 présente une comparaison finale entre les différentes solutions étudiées jusqu'à présent. Dans le premier tableau comparatif proposé dans le chapitre 4.4.5, les 3 solutions de production et stockage d'énergie étudiées dans cette section sont ajoutées. Ceci contient le bilan des coûts et le bilan énergétique avec les émissions CO₂ estimées.

	Coûts liés aux véhicules			Coûts infrastructure					Bilan des coûts: Prix total	Bilan énergétique : Emissions CO ₂
	Prix pour les bus 12m (13 véhicules)	Coûts d'entretien	Prix énergie	Prix centrale solaire (Amortissement 20 ans)	Prix de stockage avec amortissement ¹	Prix station H ₂ (Amortissement sur 20 ans)	Prix stations de charge dépôt	Prix pantographes		
	CHF/an			CHF/an					CHF/an	Tonnes/an
Diesel (Référence)	570 000	858 721	919 581	-	-	-	-	-	2 348 302	1 428
Diesel Sans taxe 0.7957 CHF/l	570 000	858 721	489 163	-	-	-	-	-	1 917 884	1 428
Gaz naturel 20% Biogaz	647 833	842 274	640 998	-	-	-	-	-	2 131 106	894
Bus électriques (Énergie achetée)	682 500	631 706	458 091	-	-	-	34 167	47 333	1 853 797	292
Bus électriques (Production équivalente)	682 500	631 706	191 222	65 702	-	-	34 167	47 333	1 652 630	203
Bus électriques (Stockage batteries NMC)	682 500	631 706	-420 825	216 600	132 130	-	34 167	47 333	1 323 610	0
Bus électriques (Stockage batteries Li-Ti)	682 500	631 706	-420 825	216 600	217 200	-	34 167	47 333	1 408 680	0
Hydrogène : utilisation de l'énergie du réseau	866 667	631 706	904 634	-	-	311 805	-	-	2 714 811	732
Hydrogène: H ₂ produit à partir des cellules solaires et électrolyse	866 667	631 706	-54 055	216 600	12 160	311 805	-	-	1 984 883	0

Tableau 46 Tableau comparatif pour les différentes solutions établies : énergie achetée et énergie produite

Sur le récapitulatif du Tableau 46, il existe différentes solutions qui pourraient fonctionner pour le remplacement des bus diesel actuels. En termes de coûts, les solutions à gaz naturel et électrique dans les différentes configurations étudiées sont très concurrentielles même meilleur marché pour certaines configurations électriques. La solution hydrogène avec production sur place par électrolyse semble également avoir un bon potentiel.

En revanche les coûts engendrés par la solution hydrogène avec utilisation de l'énergie du réseau sont nettement supérieurs aux autres alternatives. Ce qui, selon l'étude faite, écarte cette possibilité comme potentielle alternative. Selon les informations présentées dans le graphique sur la Figure 28, les prix de cette technologie pourraient diminuer d'environ 30% d'ici 2030, ce qui amènerait les coûts aux alentours de 2 millions et rendrait ces options intéressantes. Pour cette raison il semble qu'il soit trop tôt pour s'y lancer.

D'après le bilan écologique avec les émissions CO₂, il ressort que chaque variante est plus écologique que celle diesel. Toutefois les valeurs des émissions proposées ne tiennent pas compte de l'énergie grise liée au cycle de vie. Une étude supplémentaire serait donc pertinente afin de valider cette affirmation et affiner les valeurs proposées.

¹ Amortissements considérés : NMC: 16 ans, Li-Ti: 20 ans, H₂ : 20 ans

5 Conclusions et recommandations

Cette étude démontre qu'il est parfaitement envisageable de remplacer la technologie actuelle soit les véhicules diesel par des bus fonctionnant avec d'autres sources énergétiques à émissions réduites. Les coûts restent sensiblement les mêmes sauf pour les solutions à hydrogène qui tendent à être plus chères selon la manière d'approvisionnement du gaz. Aujourd'hui, l'hydrogène reste un vecteur énergétique intéressant surtout avec la possibilité de stocker l'énergie qui devrait provenir d'énergie renouvelable comme on le voit dans cette évaluation comprenant une production sur site (le produire à partir du réseau électrique n'est pas intéressant du point de vue impact CO₂). Il est néanmoins possible que ce carburant devienne plus intéressant dans le futur selon l'évolution de la technologie qui reste actuellement peu développée pour une utilisation courante.

Selon les résultats comparatifs du chapitre 4.4, sans donc ajouter de production in situ d'énergie renouvelable, il est possible de comparer les différentes alternatives.

La solution à base de gaz naturel permettrait de réduire légèrement les coûts et en partie l'impact environnemental. Mais il ne faut pas non plus négliger les impacts sonores qui resteraient sensiblement équivalents à la situation actuelle.

Pour l'utilisation de véhicules électriques, nous avons étudié des solutions plus en détail avec deux types de bus. Il est constaté que la capacité des batteries embarquées a un impact sur le poids des véhicules donc sur la quantité d'énergie nécessaire pour satisfaire les besoins du réseau de transport. Mais avec une capacité de stockage plus faible, il est nécessaire d'utiliser un plus grand nombre de bus et une station de recharge « pantographe » supplémentaire pour satisfaire les mêmes prestations. Ce qui rend cette option moins intéressante au niveau des coûts globaux, mais qui permettrait néanmoins de réduire les émissions de CO₂ d'environ 13% par rapport à la configuration avec des bus de 12m. Il serait également possible d'analyser d'autres types de bus électriques sachant qu'il en arrive de plus en plus sur le marché. Actuellement, cette solution permet d'être dans les mêmes ordres de prix que la solution Diesel actuelle, mais elle émet environ 5 fois moins de CO₂ pour l'exploitation. Il est important de signaler que l'énergie grise liée aux véhicules, notamment à leurs batteries n'a pas été considérée. Un autre avantage de la solution électrique permet de réduire considérablement les émissions sonores dans les villes et les villages.

Dans le chapitre 4.5 sur les solutions de production d'énergie sur site, il est constaté qu'une production faite avec une centrale solaire affecte assez peu les coûts annuels si la situation tient compte des temps d'amortissements qui nous ont été fournis. Pour réduire la dépendance au fournisseur d'énergie (BKW) une ligne propriétaire serait nécessaire pour favoriser l'autoconsommation. Ces coûts n'ont également pas été pris en compte. Une autre option serait de négocier des tarifs partenaires avec l'exploitant du réseau de distribution.

	Coûts liés aux véhicules	Coûts infrastructure	Bilan des coûts: Prix total	Bilan énergétique : Émissions CO₂
	CHF/an	CHF/an	CHF/an	Tonnes/an
Diesel (Référence)	2 348 302	0	2 348 302	1 428
Diesel Sans taxe 0.7957 CHF/l	1 917 884	0	1 917 884	1 428
Gaz naturel 20% Biogaz	2 131 105	0	2 131 106	894
Bus électriques (Énergie achetée)	1 772 297	81500	1 853 797	292
Bus électriques (Production équivalente)	822 928	147202	1 652 630	203
Bus électriques (Stockage batteries NMC)	893 381	430230	1 323 610	0
Bus électriques (Stockage batteries Li-Ti)	893 381	515300	1 408 680	0
Hydrogène : utilisation de l'énergie du réseau	2 403 007	311805	2 714 811	732
Hydrogène: H ₂ produit à partir des cellules solaires et électrolyse	1 444 318	540565	1 984 883	0

Tableau 48 Tableau 47 simplifié (comparatif pour les différentes solutions établies)

Il est également important de considérer que ces valeurs ne prennent pas en compte les coûts liés aux surfaces nécessaires pour leur installation.

Il est possible d'avoir un impact CO₂ nul si la variante considère uniquement la part liée à la production d'énergie. Pour connaître plus précisément l'impact, il faudrait analyser le cycle de vie des différents éléments (véhicules et infrastructure) pour en déterminer l'impact lié à l'énergie grise (production des composant, déplacement, installation et recyclage).

Pour conclure, les besoins de mobilité sont très importants pour notre société. Tout comme le respect de l'environnement. Les décisions prises par la confédération au sujet de la politique énergétique dans les transports, la réduction de l'impact carbone ainsi que l'évolution des coûts des différents vecteurs énergétiques poussent les sociétés de transports à changer de technologie.

Au vu des résultats de l'étude et la volonté des autorités locales de mettre en œuvre le projet de réaménagement de la gare routière dans les prochaines années, nous recommandons la variante bus électriques. Des études complémentaires sur la production d'énergie locale sont à mener en parallèle des prochaines étapes.

Les collectivités n'étant pas propriétaires du foncier, des partenariats avec La Poste ainsi que les CFF sont nécessaires avant de lancer les phases de mise en œuvre à savoir l'avant-projet et le projet de l'ouvrage.

Des soutiens techniques et financiers des services et offices cantonaux et fédéraux sont indispensables à une mise en œuvre. Un échange avec ces autorités est à organiser avant d'entamer les prochaines étapes.

Liste des symboles et abréviations

CNG	Compressed natural gas (gaz naturel compressé)
OCV	Open Circuit Voltage (tension en circuit ouvert d'une cellule de la batterie)
SOC	State of Charge (état de charge de la batterie d'un bus électrique)
LFP	Batterie au Lithium avec cathode Lithium Fer et Phosphate
NMC	Batterie au Lithium avec cathode Nickel Manganèse Cobalt
TUB	Lignes des transports urbains
PCI	Pouvoir calorifique inférieur

Références bibliographiques

- [1] UITP - the International Association of Public Transport, **ZeEUS eBus Report : An overview of electric buses in Europe**, 2016
- [2] Michael Faltenbacher, Aline Hendrich, Stefan Kupferschmid und Sphera, **Projektübersicht 2019/2020 Zero Emission Busse in Deutschland Im Rahmen der Programm begleitforschung Innovative Antriebe im straßengebundenen ÖPNV**, 2020
- [3] Thoralf Knote, Beate Haufe, Lars Saroch, **E-Bus-Standard: Ansätze zur Standardisierung und Zielkosten für Elektrobusse**, Fraunhofer-Institut für Vehrkrafs- und Infrastruktursysteme IVI, 2017
- [4] Markus Schuster, Mag. Irene Steinacher und von DI Christoph Link, **Marktübersicht Elktro-und Wassersotbusse**, Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie Wien, 2020
- [5] Andreas Hutter, Nelson Koch, Thomas Söderström, **Stratégie Energétique 2050 dans les Transports Publics-Etude du potentiel de l'hydrogène dans les TP Rapport final**, Office fédéral des transports, 2022
- [6] Regionale Kooperation Westküste, **Machbarkeitsstudie Wasserstoffbusse in den Kreisen Dithmarschen und Steinburg**, 2020
- [7] Nils Monney, Laura Andres et Christian Nellen, **Motorisation à l'hydrogène des bus de trans-port public Rapport final**, Office fédéral des transports, 2022
- [8] Frank Gröschl, **Gas-Mobilität PKW LKW BUS Umweltauswirkungen, Technologie und Wirtschaftlichkeit gasbasierter Mobilität**, Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches, 2018
- [9] Christian Bach, Patrik Soltic, Jakub Rojewski, Urs Cabalzar, Sinan Teske, Thomas Büttler, **CNG mobility State-of-the-art technology**, Empa-Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Research, 2017
- [10] Jean-Luc Robyr, Robert Thierry, Leewan Bonvin, Lambrughi Alessandro, **Modélisation du réseau des transports publics de Porrentruy-Rapport technique sur la recherche des données, les modèles numériques et les calculs des coûts**, Haute école d'ingénierie et d'architecture de Fribourg (HEIA-FR), 2022
- [11] Otto Bode, **Untersuchung des Rollwiderstands von Nutzfahrzeugen auf realer Fahrbahn**, VDA Verband der Automobilindustrie, 2016
- [12] J.Y.Wong, F.I. Mech, **Theory of Ground Vehicles-third edition**, John Wiley and sons Toronto 2001, ISBN: 0-471-35461-9
- [13] Thorsten Frank, **Aerodynamik von schweren Nutzfahrzeugen – Stand des Wissens**, Kapitel 2, VDA Verband der Automobilindustrie, 2012
- [14] Martin März, **Leistungselektronik für e-Fahrzeuge-Konzepte und Herausforderungen**, Fraunhofer, 2010
- [15] Andrey W. Golubkov, Sebastian Scheikl, Rene Planteu, Gernot Voitic, Helmar Wiltsche, Christoph Stangl, Gisela Fauler, Alexander Thaler and Viktor Hackerbr, **Thermal runaway of commercial 18650 Li-ion batteries with LFP and NCA**, The Royal Society of Chemistry, vol 5, p57171-57186 (2015)
- [16] Tyler Gray, Jeffrey Wishart, Matt Shrik, **2011 Nissant Leaf VIN 0356 Electric Vehicle Battery Test Results**, Vehicle Technologies Program, 2016
- [17] Robert Thierry et Lambrughi Alessandro, **Projet ESimMobility : Rapport sur les recherches des données sur les voitures électriques**, Haute école d'ingénierie et d'architecture de Fribourg (Heia-fr) – Haute école Neuchâtel Bern Jura (Arc) – HES-SO Wallis-Valais, 2019/2020
- [18] Adrian Siegrist, Paul Schnabl, Simon Burkart, Peter de Haan, Roberto Bianchetti, **Elektromobilität – Studie Ladeinfrastruktur Region Basel Schlussbericht**, Kapitel 4.3, 2014
- [19] Schweizer Bundesrat, **Verordnung über die technischen Anforderungen an Strassenfahrzeuge**, Anhang 9, Artikel 25: Personengewichte, p243, 2006
- [20] Robert Thierry et Lambrughi Alessandro, **Projet TP Porrentruy : Rapport technique sur le modèle numérique pour bus à propulsion électrique**, Haute école d'ingénierie et d'architecture de Fribourg (Heia-fr), 2020/2021
- [21] Robert Thierry et Lambrughi Alessandro, **Projet ESimMobility : Rapport sur la construction du modèle mathématique d'un véhicule électrique**, Haute école d'ingénierie et d'architecture de Fribourg (Heia-fr) – Haute école Neuchâtel Bern Jura (Arc) – HES-SO Wallis-Valais, 2019/2020

- [22] Hussein Basma, Charbel Mansour, Marc Haddad, Maroun Nemer, Pascal Stabat, **Comprehensive energy assessment of battery electric buses and diesel buses**, THE 32ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON EFFICIENCY, COST, OPTIMIZATION, SIMULATION AND ENVIRONMENTAL IMPACT OF ENERGY SYSTEMS, p1-14 (2019)
- [23] Mia Romare, Lisbeth Dahllöf, **The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries A Study with Focus on Current Technology and Batteries for light-duty vehicles**, IVL Swedish Environmental Research Institute, 2017
- [24] Florian Grange, Karel Hubert, **Projet station H2 Mise en place d'une station de recharge hydrogène -slides présentation**, 2020
- [25] La Revue de l'énergie, **Decarbonised hydrogen imports into the European Union: challenges and opportunities**, p 1-51 (2021)

Annexes

A1 Données techniques des bus (base des données)

Sileo S10 (bus 10 mètres)

Paramètres mécaniques			
Nom du paramètre	Valeur	Unité	Remarque
Masse à vide du bus	10900	kg	Capacité maximale : 90 passagers (33 assis)
Surface pochetée	6.8	m ²	
Inertie des éléments tournants	15.4	kg · m ²	
Coefficient de résistance au roulement des pneus	0.01	-	
Coefficient de résistance aérodynamique	0.5	-	
Rendement transmission	0.97	-	
Rapport de réduction total moteur – roue	22.68	-	Pour les 2 moteurs
Diamètre des roues	0.957	m	

Paramètres électriques			
Nom du paramètre	Valeur	Unité	Remarque
Energie nominale stockée dans la batterie	225	kWh	Technologie LFP
Tension nominale de la batterie	600	V	3.3V par cellule
Rendement onduleur AC/DC	0.95	-	
Rendement convertisseur DC/DC	0.96	-	
Nombre de modules de la batterie	15	-	
Nombre de cellules dans un module	12	-	
Puissance moteur	120	kW	2 moteurs identiques
Couple moteur	466	Nm	A l'arbre moteur
Régime maximal	9850	min ⁻¹	
Mappe rendement moteur	Voir chapitre Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.	-	
Caractéristiques cellule de la batterie (tension circuit ouvert et résistance interne)	Voir chapitre Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.	V et mΩ	

Paramètres auxiliaires			
Nom du paramètre	Valeur	Unité	Remarque
Consommation climatisation	Voir chapitre Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden., courbe pour bus 10 m	kW	

eCitaro (bus 12 mètres)

Paramètres mécaniques			
Nom du paramètre	Valeur	Unité	Remarque
Masse à vide du bus	12000 (batterie 198 kWh) 13500 (batterie 396 kWh)	kg	Capacité totale : 85 (29 assis)
Surface pochetée	6.8	m ²	
Inertie des éléments tournants	15.4	kg · m ²	
Coefficient de résistance au roulement des pneus	0.01	-	
Coefficient de résistance aérodynamique	0.5	-	
Rendement transmission	0.97	-	
Rapport de réduction total moteur – roue	22.68	-	Pour les 2 moteurs
Diamètre des roues	0.957	m	

Paramètres électriques			
Nom du paramètre	Valeur	Unité	Remarque
Energie nominale stockée dans la batterie	198 396	kWh	198 : série, technologie NMC
Tension nominale de la batterie	655	V	
Rendement onduleur AC/DC	0.95	-	
Rendement convertisseur DC/DC	0.96	-	
Nombre de modules de la batterie	15	-	
Nombre de cellules dans un module	12	-	
Puissance moteur	125	kW	2 moteurs identiques
Couple moteur	485	Nm	À l'arbre moteur
Régime maximal	12000	min ⁻¹	
Mappe rendement moteur	Voir chapitre Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.	-	
Caractéristiques cellule de la batterie (tension circuit ouvert et résistance interne)	Voir chapitre Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.	V et mΩ	

Paramètres auxiliaires			
Nom du paramètre	Valeur	Unité	Remarque
Consommation climatisation	Voir chapitre Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. , courbe pour bus 12 m	kW	

eCitaroG (bus 18 mètres)

Paramètres mécaniques			
Nom du paramètre	Valeur	Unité	Remarque
Masse à vide du bus	19000	kg	Capacité totale : 151 (max 46 assis)
Surface pochetée	6.8	m ²	
Inertie des éléments tournants	21	kg · m ²	
Coefficient de résistance au roulement des pneus	0.01	-	
Coefficient de résistance aérodynamique	0.5	-	
Rendement transmission	0.97	-	
Rapport de réduction total moteur – roue	22.68	-	Pour les 2 moteurs
Diamètre des roues	0.957	m	

Paramètres électriques			
Nom du paramètre	Valeur	Unité	Remarque
Energie nominale stockée dans la batterie	396	kWh	Technologie NMC
Tension nominale de la batterie	657	V	
Rendement onduleur AC/DC	0.95	-	
Rendement convertisseur DC/DC	0.96	-	
Nombre de modules de la batterie	15	-	
Nombre de cellules dans un module	12	-	
Puissance moteur	125	kW	2 moteurs identiques
Couple moteur	485	Nm	À l'arbre moteur
Régime maximal	12000	min ⁻¹	
Mappe rendement moteur	Voir chapitre Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.	-	
Caractéristiques cellule de la batterie (tension circuit ouvert et résistance interne)	Voir chapitre Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.	V et mΩ	

Paramètres auxiliaires			
Nom du paramètre	Valeur	Unité	Remarque
Consommation climatisation	Voir chapitre Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden., courbe pour bus 18 m	kW	

Ebusco 2.2 (bus 12 mètres)

Paramètres mécaniques			
Nom du paramètre	Valeur	Unité	Remarque
Masse à vide du bus	12850	kg	Capacité totale : 90 (max 41 assis)
Surface pochetée	6.8	m ²	
Inertie des éléments tournants	15.4	kg · m ²	
Coefficient de résistance au roulement des pneus	0.01	-	
Coefficient de résistance aérodynamique	0.5	-	
Rendement transmission	0.97	-	
Rapport de réduction total moteur – roue	22.68	-	Pour les 2 moteurs
Diamètre des roues	0.957	m	

Paramètres électriques			
Nom du paramètre	Valeur	Unité	Remarque
Energie nominale stockée dans la batterie	363	kWh	Technologie LFP
Tension nominale de la batterie	600	V	
Rendement onduleur AC/DC	0.95	-	
Rendement convertisseur DC/DC	0.96	-	
Nombre de modules de la batterie	15	-	
Nombre de cellules dans un module	12	-	
Puissance moteur	135	kW	2 moteurs identiques
Couple moteur	400	Nm	À l'arbre moteur
Régime maximal	12480	min ⁻¹	
Mappe rendement moteur	Voir chapitre Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.	-	
Caractéristiques cellule de la batterie (tension circuit ouvert et résistance interne)	Voir chapitre Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.	V et mΩ	

Paramètres auxiliaires			
Nom du paramètre	Valeur	Unité	Remarque
Consommation climatisation	Voir chapitre Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden., courbe pour bus 12 m	kW	

A2 Profils vitesse et altitude des différents tracés (lignes)

Ligne	Profil vitesse mesuré	Profil altitude mesuré et ensuite lissé
72	Temps [s]	distance [km]
73	Temps [s]	distance [km]
75	Temps [s]	distance [km]
76	Temps [s]	distance [km]
77	Temps [s]	distance [km]
TUB Bellevue	0 100 200 300 400 500 600 Temps [s]	Distance [km]
TUB Oiselier	0 200 400 600 800 Temps [s]	Distance [km]

A3 Profils passagers des différents tracés

Ligne	Profil passagers calculé sur la base des données fournies de CarPostal
72	Temps [min]
73	Temps [min]
75	Temps [min]
76	Temps [min]
77	Temps [min]
TUB Bellevue	Temps [min]
TUB Oiselier	Temps [min]

A4 Horaires considérés dans l'étude

Horaires pendant la semaine (Lu-Ve) pour chaque ligne

Porrentruy - Delémont	06:10 06:40 07:10 07:40 08:10 08:40 09:10 10:10 11:10 12:10 13:10 13:40 14:10 15:10 16:10 16:40 17:10 17:40 18:10 18:40 19:10 19:40 20:10 21:10
Porrentruy - Delémont	06:10 06:40 07:10 07:40 08:10 09:10 10:10 11:10 12:10 12:40 13:10 13:40 14:10 15:40 16:10 16:40 17:10 17:40 18:10 18:40 19:10 19:40 20:10 20:40
Porrentruy - Delémont	06:10 06:40 07:10 07:40 08:10 08:40 09:10 10:10 11:10 12:10 12:40 13:10 13:40 14:10 15:10 16:10 16:40 17:10 17:40 18:10 18:40 19:10 19:40 20:10 21:10
Porrentruy - Delémont	06:10 06:40 07:10 07:40 08:10 08:40 09:40 10:40 11:40 12:10 12:40 13:40 14:10 15:10 15:40 16:10 16:40 17:10 17:40 18:10 18:40 19:10 19:40 20:40
Porrentruy, gare	05:50 06:20 06:50 07:20 07:50 08:20 08:50 09:50 11:20 12:20 12:50 13:20 13:50 14:50 15:50 16:20 16:50 17:20 17:50 18:20 18:50 19:20 19:50 20:50
Porrentruy - Lavaux	06:44 07:44 08:44 09:44 11:44 12:44 13:44 14:44 15:44 16:44 17:44 18:44 19:44 20:44
Porrentruy - Bonfol	06:07 07:06 07:58 08:58 11:08 13:08 13:58 16:22 17:22 18:20