



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Verkehr BAV

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

Office fédéral des transports OFT
Programme de mise en œuvre de la stratégie énergétique 2050
des transports publics (SETP 2050)

GUIDE POUR LA PLANIFICATION DE L'INFRASTRUCTURE DE CHARGE





Impressum

Éditeur :
Office fédéral des transports (OFT)
Programme Stratégie énergétique 2050 des transports publics (SETP 2050)
CH-3003 Berne
info.energie2050@bav.admin.ch
www.bav.admin.ch/energie2050

Première édition : mai 2025



Ce QR-Code donne accès à l'ensemble de l'étude et à des informations complémentaires.

Direction du programme : Stany Rochat, OFT

Rédaction/mise en page :
Roman von Däniken et Thibault Martin,
Helbling Technik AG, CH-5000 Aarau

Les auteurs du présent guide sont seuls responsables de son contenu et des conclusions.

Versions linguistiques :
Diese Publikation ist auch in deutscher Sprache verfügbar ([Link](#)).

Image de couverture :
© Helbling Technik AG

TABLE DES MATIÈRES

1	Avant-propos
2	Introduction
5	Analyse des besoins en matière de puissance de charge et d'énergie
9	Définition du concept de charge
11	Infrastructure de charge
16	Évaluation des coûts
19	Bilan écologique
21	Thèmes complémentaires



Avant-propos

La conversion du parc de bus des transports publics (TP) à la propulsion électrique est en cours. Plusieurs entreprises de transport urbain ont déjà bien avancé, certaines ont introduit avec succès des bus électriques dans des régions rurales, à la topographie difficile et plus étendues et d'autres encore n'en sont qu'au début. Dans de nombreuses entreprises, la conversion du parc de bus s'accompagne d'une stratégie appropriée. Ainsi, les futures nouvelles acquisitions comportent de plus en plus souvent une propulsion électrique par batterie.

Dans le cadre du programme de recherche et d'innovation Stratégie énergétique 2050 des transports publics (SETP 2050) de l'OFT, cette transition en matière de propulsion a été soutenue et accompagnée par de nombreux projets, qu'il s'agisse d'études conceptuelles et de potentiel ou de la mise à l'essai de véhicules pilotes. Dans ce contexte, il est important d'élaborer des guides afin de transmettre les connaissances acquises aux entreprises. Un premier guide sur l'électrification des parcs de bus a déjà été rédigé en 2019, qui couvrait encore l'ensemble du spectre : de la planification des différentes lignes à la conception de l'infrastructure de charge en passant par la formation des collaborateurs. Car le passage à une propulsion électrique va bien au-delà de l'acquisition du véhicule en question ; c'est un changement de système.

Le présent guide se concentre sur l'infrastructure de charge qui forme une partie intégrante et importante du passage à la propulsion électrique par batterie. La conception et l'optimisation de l'infrastructure de charge sont exigeantes, car le changement de technologie implique le développement de nouvelles compétences et l'adaptation des processus d'exploitation. Avec ce document, nous espérons combler les lacunes, apporter un soutien aux entreprises de transport et faciliter ainsi le passage à la propulsion électrique pour les bus.

Christa Hostettler, directrice de l'OFT

INTRODUCTION

Contexte

Avec sa « loi sur le climat » ([LCI](#)), la Suisse s'est fixé pour objectif de ne plus émettre de gaz à effet de serre à partir de 2050 (objectif de zéro net). L'Union des transports publics (UTP) a pour ambition que les transports publics soient neutres en CO₂ dès 2040 déjà. La majeure partie des émissions de CO₂ des transports publics en Suisse est générée par les bus (environ 81 %), raison pour laquelle il est souhaitable de réduire les émissions dans ce secteur.

Plusieurs villes et entreprises de transport ont déjà élaboré des stratégies à cet égard. À Coire, le plan directeur Energie et Climat (*Masterplan Energie und Klima*) indique les moyens de réaliser l'objectif zéro net. À partir de 2028, Chur Bus, l'entreprise de bus de la ville de Coire, n'achètera plus que des véhicules équipés de systèmes de propulsion à énergie renouvelable, le choix s'étant porté sur des véhicules électriques fonctionnant sur batterie.

Chur Bus n'est pas seule à franchir ce pas. Bien qu'une électrification complète du parc permette de réduire la consommation d'énergie et des émissions de CO₂ par voyageurs-kilomètres, elle pose également des défis techniques et de planification aux exploitants de parcs de véhicules : choix de véhicules appropriés et d'une infrastructure de charge adaptée, planification de la phase de transition ou de la puissance de charge nécessaire et de sa mise à disposition.

Objectif

Le présent guide destiné aux entreprises de bus et aux exploitants de véhicules vise à encourager l'électrification des parcs de bus dans les transports publics et accélérer ainsi la décarbonisation.

En s'appuyant sur l'exemple concret de Chur Bus, il présente des procédures possibles et des recommandations de mise en œuvre pour répondre aux défis courants liés à l'électrification d'un parc de véhicules, qui peuvent être transposées ou adaptées à des projets similaires. Les différentes étapes de planification et de mise en œuvre sont décrites dans une forme accessible et leur mise en pratique illustrée par l'exemple de Chur Bus. Cela permet de diminuer les obstacles pour d'autres entreprises de bus qui souhaitent appliquer les conceptions présentées à leur propre exploitation.



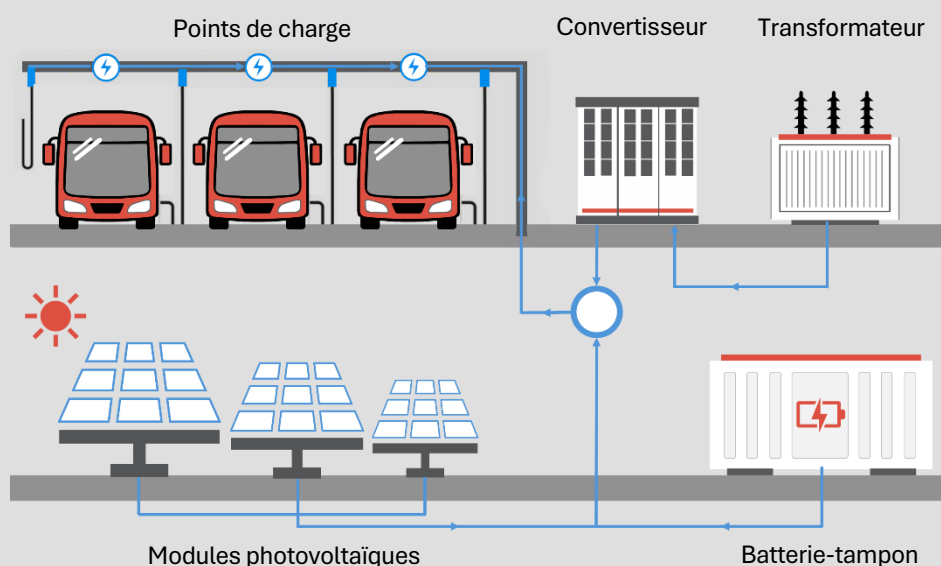
Les conclusions tirées du projet profitent directement à Chur Bus et à Engadin Bus et fournissent de précieuses indications pour d'autres entreprises du secteur.

Des conceptions de mise en œuvre détaillées, des analyses de coûts minutieuses et des évaluations complètes des systèmes électriques et des techniques de récupération de chaleur fournissent des stratégies réalisables pour les villes et les entreprises de transport de taille moyenne.

Structure et focus du guide

Le présent guide indique les principaux aspects à prendre en compte pour planifier une infrastructure de charge. Les exemples découlent d'un projet de Chur Bus en vue du renouvellement de son parc de bus à partir de 2028.

Les préoccupations portent sur les besoins en énergie, l'infrastructure technique (surface nécessaire, infrastructure de charge) ainsi que l'intégration d'installations photovoltaïques et de batteries-tampon. La valorisation de la chaleur dégagée lors de la charge est également abordée. Les concepts et stratégies de charge potentiels qui en découlent sont expliqués et les conséquences opérationnelles décrites. L'accent est mis sur une charge au dépôt, s'agissant de la variante adoptée par la plupart des entreprises de transport.



Présentation schématique des composants de l'infrastructure de charge et la manière dont ils sont reliés

Pour y parvenir, les aspects ci-après sont examinés en détail dans le présent guide, qui est structuré selon ces mêmes points :



1

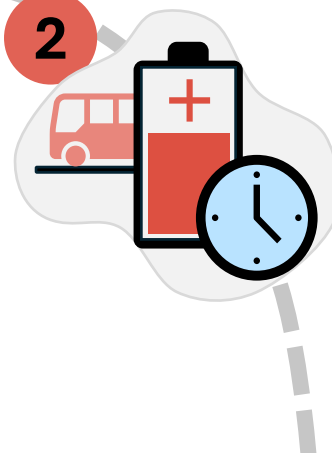
Analyse des besoins

Cette étape évalue les besoins en énergie du futur parc de bus et constitue la base du concept d'électrification et de l'échelonnement de la transition à l'électrique. On peut ainsi estimer les besoins quotidiens en énergie et la puissance de charge nécessaire pour procéder à un premier dimensionnement approximatif de l'infrastructure de charge.

Concept de charge

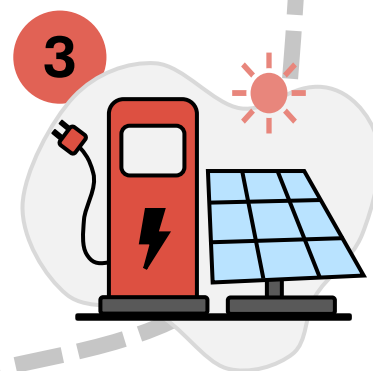
Ce chapitre concrétise les conclusions de l'analyse des besoins en tenant compte de la durée de service des véhicules sur la base des plans de roulement et des horaires. Ces derniers déterminent le temps passé au dépôt, le temps de charge à disposition et la puissance de charge minimale par véhicule. Cela permet de dimensionner définitivement les composants de l'infrastructure de charge, de définir les stratégies de charge appropriées (gestion de la charge, réduction des pics de puissance, batteries-tampons, installations photovoltaïques) et d'élaborer des recommandations d'adaptation (en cas de goulets d'étranglement dus à des rotations énergivores ou à des temps de charge courts).

2



Infrastructure de charge

Ce chapitre porte sur l'installation de l'infrastructure de charge, et notamment sur les bornes de charge, les transformateurs, les convertisseurs et le raccordement au réseau. Il aborde des sujets comme la gestion thermique, l'exploitation de la chaleur dégagée, l'espace nécessaire pour les véhicules et l'infrastructure de charge ainsi que les configurations possibles. Ces informations permettent d'établir ensuite un calendrier de mise en œuvre et de planifier la phase de transition. Il est indispensable de planifier l'infrastructure de charge pour éviter des retards, car les délais normaux de livraison et de procédure peuvent varier entre 6 et 22 mois en fonction du fabricant et autorisations à recevoir.



4

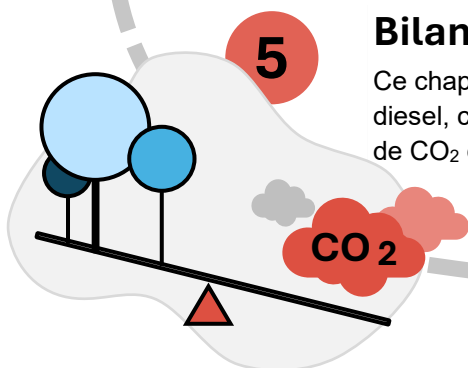
Coûts

Le chapitre des coûts offre un aperçu des coûts d'exploitation et d'acquisition et indique les coûts totaux sur le cycle de vie de l'infrastructure de charge ainsi que les possibilités de financement. Les entreprises de transport disposent ainsi d'un aperçu complet des coûts à prévoir et d'une base décisionnelle solide.

5

Bilan CO₂

Ce chapitre compare les émissions générées par les bus électriques et diesel, ce qui permet d'évaluer le potentiel de réduction des émissions de CO₂ qui réside dans l'électrification.



Thèmes complémentaires

Ce chapitre englobe les étapes de planification nécessaires jusqu'à la mise en œuvre, ainsi que les conceptions et les exigences réglementaires pour adapter l'infrastructure des ateliers aux bus électriques.

6



CHAPITRE 1

ANALYSE DES BESOINS EN MATIÈRE DE PUISSANCE DE CHARGE ET D'ÉNERGIE



En quelques mots

Le calcul et l'analyse des besoins en énergie pour chaque ligne fournissent les données de base et donc le fondement du concept d'électrification. Il s'agit de la première étape, généralement effectuée par des planificateurs de trafic, des fournisseurs de bus électriques ou des bureaux d'études spécialisés.

Ladite analyse permet de calculer et d'optimiser les besoins quotidiens en énergie du parc et des différents véhicules, ce qui permet de déterminer la puissance de charge nécessaire à partir des données de l'horaire.

Saisie des informations du réseau de lignes

L'analyse des besoins nécessite les paramètres suivants comme données de départ :



Plan des lignes

Le **plan des lignes** ou l'**horaire** offre un aperçu de l'ensemble des lignes de bus desservies ainsi que des arrêts situés le long de ces lignes. Il convient de noter que l'analyse des besoins prend également en compte les lignes nocturnes, les services de remplacement des trains et, le cas échéant, les nouvelles lignes prévues, qui ne figurent généralement pas dans le plan régulier des lignes. Ce plan étant établi par les entreprises de bus, il est disponible dès le début du projet.

Les **paramètres de la ligne** fournissent des informations détaillées servant à calculer les besoins en énergie par ligne. Les exploitants connaissent généralement les données telles que le taux d'occupation des véhicules, le type de véhicule (y c. le nombre de places, l'équipement et le poids à vide) ainsi que les besoins en énergie des dispositifs auxiliaires (climatisation, chauffage, système d'information voyageurs) ; dans le cas contraire il faut les saisir. D'autres paramètres comme les vitesses moyennes et maximales, l'itinéraire avec les croisements et les feux de signalisation, la topographie ou les températures moyennes, sont souvent librement accessibles via des sources ouvertes (*open source*) ou statistiques.

Par expérience, la **topographie** et la **température extérieure** sont les principaux facteurs d'influence sur la consommation d'énergie. Les autres paramètres permettent d'affiner la précision de l'analyse des besoins. Le comportement de l'accélération et du freinage, qui varie en fonction du conducteur et du trajet, influence directement le besoin en énergie. Il est possible à ce niveau de définir et d'appliquer des valeurs moyennes à toutes les lignes pour réduire la charge de calcul tout en conservant une précision suffisante.

Pour vérifier les résultats, il est judicieux de comparer la consommation en énergie calculée avec la consommation actuelle de diesel en tenant compte des rendements.



Petit
CONSEIL

Paramètres de la ligne



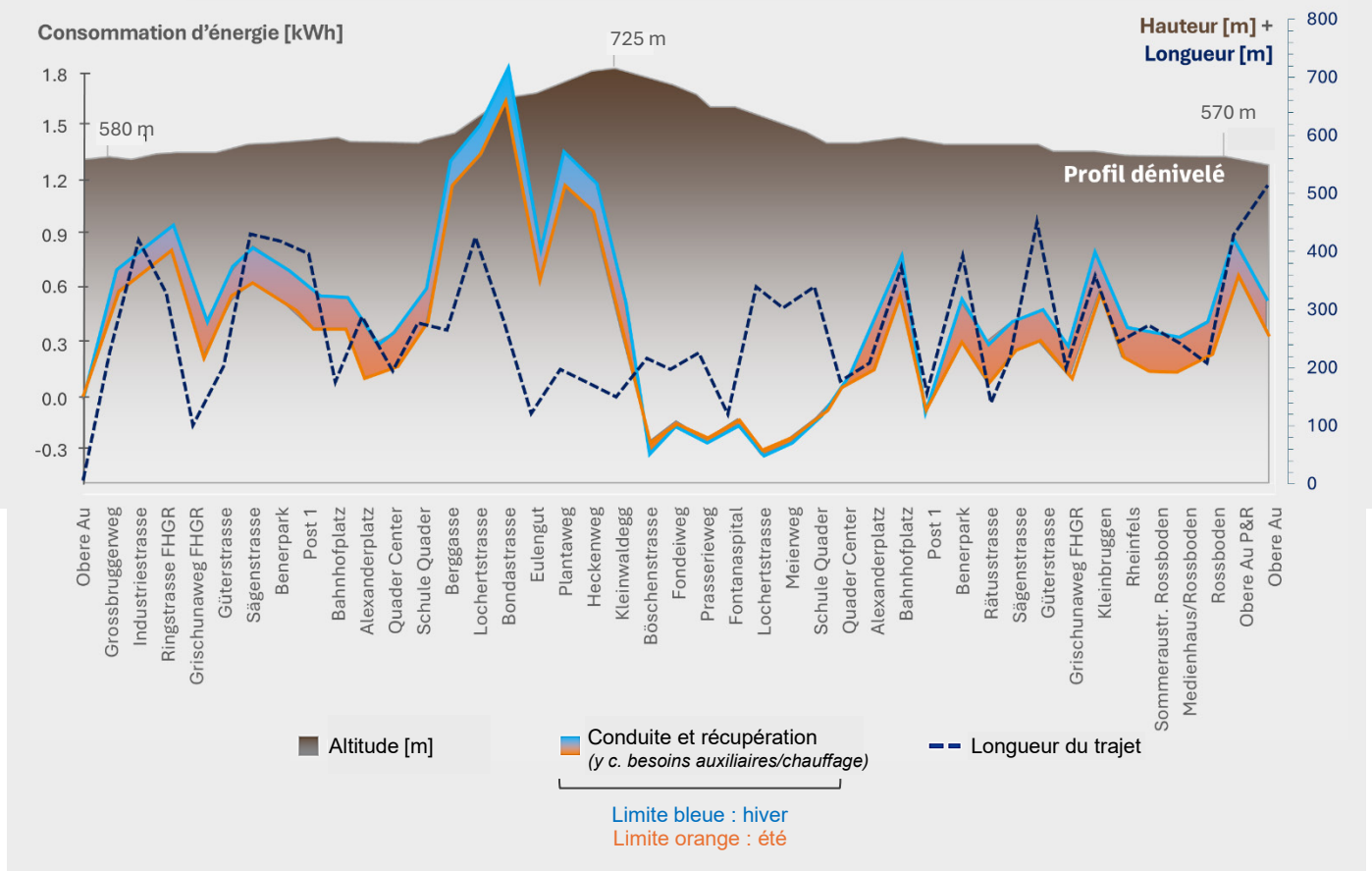
Plans de roulement

Les plans de roulement indiquent le **nombre de trajets** sur le réseau ainsi que les entrées et sorties du dépôt. Il s'agit d'optimiser les trajets en fonction des autonomies spécifiques des bus utilisés. À partir des besoins spécifiques en énergie par ligne, les plans de circulation permettent de calculer les besoins quotidiens en énergie par véhicule et pour l'ensemble du parc de bus, en additionnant l'énergie nécessaire pour les trajets respectifs des véhicules. Là aussi, il convient de prendre en compte les **lignes nocturnes** et les **prestations auxiliaires** (bus scolaires, services de remplacement des trains).

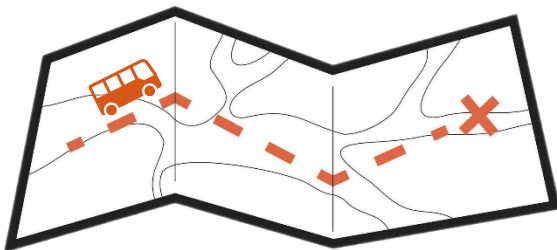
Les plans de roulement, en particulier, fournissent des informations sur le temps passé au dépôt et constituent ainsi la base de l'estimation du temps de charge à disposition.

Calcul et contrôle de plausibilité du besoin en énergie par ligne

Représentation graphique de l'analyse des besoins pour une ligne de Chur Bus



En tenant compte des paramètres de la ligne présentés dans le chapitre précédent, il est possible de calculer les besoins en énergie par ligne et par roulement. La figure ci-dessus illustre une représentation possible des résultats attendus sur la base de l'exemple d'une ligne de Chur Bus. Le graphique illustre le besoin en énergie des différents tronçons entre deux arrêts ; la bande indiquant les besoins maximum et minimum en fonction de la saison. L'énergie consommée comporte d'une part la traction et d'autre part les équipements auxiliaires (information des passagers, distributeurs de tickets, éclairage) ainsi que le chauffage/climatisation. L'influence de la longueur du trajet entre deux arrêts successifs (ligne bleue en pointillés) et de la topographie parcourue (surface brune) sur la consommation d'énergie apparaît clairement.



Le besoin en énergie par roulement dépend principalement de la longueur du trajet, de la durée d'utilisation et du dénivelé sur la section ainsi que de la température ambiante extérieure.

Généralement, il faut plus d'énergie en hiver, car les systèmes de chauffage en consomment plus que la climatisation. Il s'agit donc de dimensionner l'infrastructure en prévision de la saison froide, en tenant également compte de la capacité réduite de la batterie.



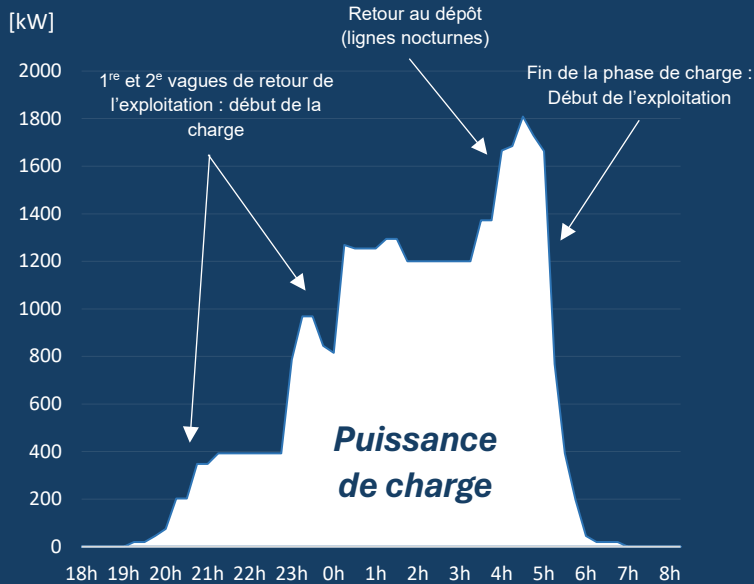
Analyse du plan de roulement et établissement du bilan énergétique

Le nombre de roulements quotidiens permet de calculer le besoin total en énergie par ligne ainsi que le besoin quotidien en énergie de l'ensemble du parc.

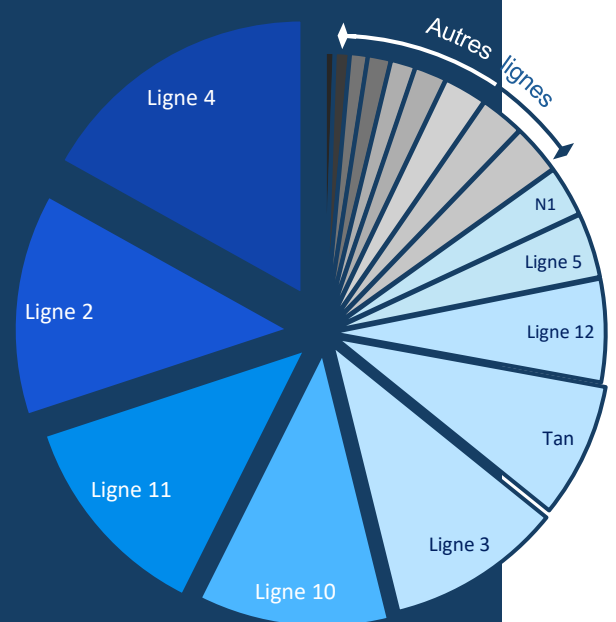
En tenant compte des temps passés au dépôt, il est possible de déduire la puissance de charge nécessaire par véhicule et donc la puissance de charge cumulée nécessaire pendant les phases de charge nocturnes.



Évolution temporelle de la puissance de charge pendant une phase de charge sans gestion des pics ni optimisation

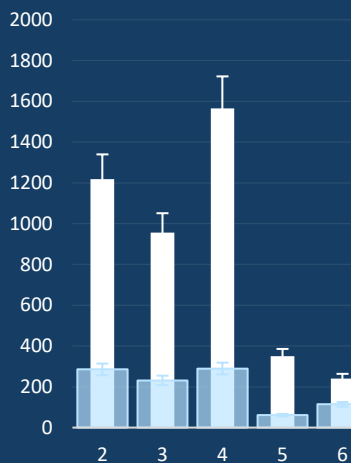


Distribution du besoin en énergie par ligne (y c. lignes nocturnes)



Besoin en énergie par ligne (avec lignes nocturnes)

Consommation des lignes par jour [kWh]



Énergie par roulement [kWh]

■ Énergie par jour

■ Énergie par roulement

DÉFINITION DU CONCEPT DE CHARGE



En quelques mots

Le **concept de charge** décrit comment optimiser la puissance de charge et joue un rôle central dans la planification de l'infrastructure de charge. Il démontre comment dimensionner cette infrastructure **de manière optimale** en tenant compte des aspects économiques et techniques.

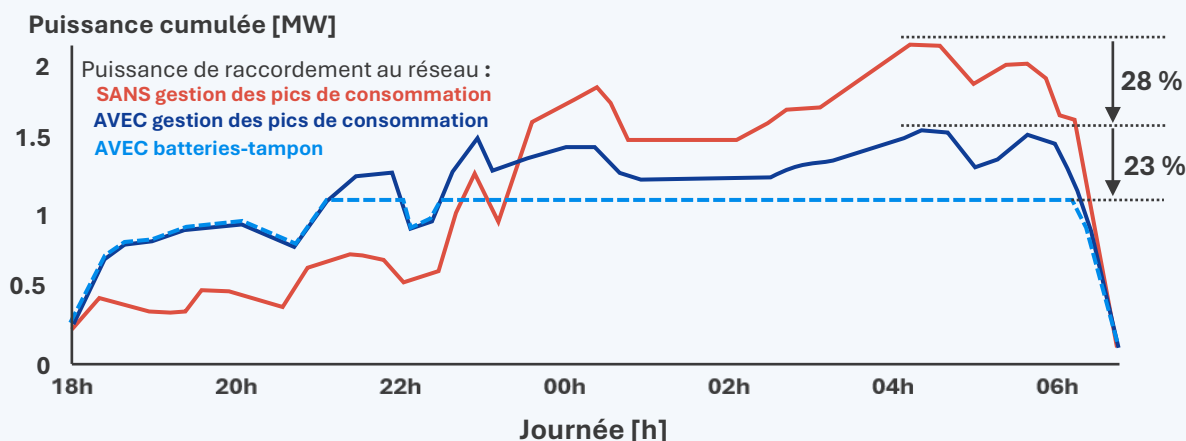
La planification de l'infrastructure de charge repose sur l'**analyse des besoins effectuée**, qui permet de déterminer la quantité d'énergie nécessaire, le temps de charge disponible par véhicule et la puissance théorique requise. Un concept judicieux permet **d'optimiser la puissance requise**, ce qui réduit les pics de consommation et donc les coûts de raccordement et d'exploitation.

Le présent chapitre présente trois variantes permettant d'optimiser la puissance requise :

- Utilisation d'un système intelligent de gestion du parc et de la charge
- Intégration d'un stockage d'énergie stationnaire
- Utilisation d'installations photovoltaïques

Système de gestion du parc

La gestion du parc de véhicules et des pics de consommation, généralement proposée par les fournisseurs de véhicules et d'infrastructures de charge, utilise les données de l'horaire et de l'état de charge des véhicules pour optimiser la **puissance de charge**. Sans un tel système, la puissance du réseau augmente fortement lorsque de nombreux véhicules reviennent en même temps. Une priorisation de la charge selon des règles dynamiques ou fixes (par ex. First In – First Out ou Last In – First Out), permet d'atténuer les pics de charge tout en garantissant des véhicules chargés à temps pour la prochaine utilisation. Dans le cas de Coire, cette gestion a permis de réduire la puissance de raccordement au réseau de 28 %.



Potentiel de réduction de la puissance de raccordement grâce à différents concepts de charge, à l'exemple de Chur Bus

Intégration d'un stockage d'énergie stationnaire

Dans le cas concret de Chur Bus, une **batterie d'accumulateurs** permet de réduire la puissance de pointe de 23 % supplémentaires : lorsqu'une limite de puissance définie est dépassée, l'énergie n'est plus prélevée sur le réseau électrique, mais de la batterie-tampon. De plus, la batterie, d'une capacité de 1 MWh dans le cas de Chur Bus, assure une **redondance supplémentaire** de l'alimentation électrique. Pendant la journée, il est possible de charger la batterie stationnaire à faible puissance, de sorte qu'il y ait suffisamment d'énergie disponible au retour des véhicules. La puissance ainsi épargnée peut être économisée au niveau du raccordement au réseau et de la facturation des pointes de puissance. Vu les investissements considérables que représente une batterie de cette taille et l'espace nécessaire qui doit également être mis à disposition, il convient d'étudier la rentabilité d'une telle solution au cas par cas.



Utilisation d'une installation photovoltaïque

Une **installation photovoltaïque** peut compléter le stockage d'énergie. Les dépôts de bus disposent souvent de grandes superficies de toit et sont donc bien adaptés à la **production d'énergie solaire**. En combinaison avec la batterie-tampon, l'électricité solaire peut être stockée jusqu'au soir. Cela permet de réduire le besoin en énergie provenant du réseau électrique et de réaliser ainsi des économies supplémentaires à long terme. Plusieurs facteurs déterminent le point à partir duquel une installation photovoltaïque devient rentable ; cela dépend notamment des prix locaux de l'électricité et de la rétribution de l'injection. Il convient donc de choisir le concept de charge appropriée **en tenant compte du prix de l'électricité** et en concertation avec le fournisseur d'énergie.





En quelques mots

L'étape suivante consiste à planifier l'infrastructure de charge. Cette planification intègre la recherche d'un emplacement, la clarification des besoins en place ainsi que l'élaboration d'un plan échelonné d'installation progressive de l'infrastructure de charge parallèlement à la conversion du parc de bus. La solution doit être alignée à la stratégie de charge choisie et le dimensionnement du raccordement au réseau doit être prévu en conséquence.

Lorsqu'un parc de bus est alimenté en énergie électrique, environ 6 % de l'énergie est perdue sous forme de chaleur dégagée pendant la charge. Il est judicieux d'extraire cette énergie de manière contrôlée et de la valoriser, c'est pourquoi le présent chapitre traite également des possibilités d'exploitation de la chaleur dissipée qui permettent d'augmenter le rendement global du système.

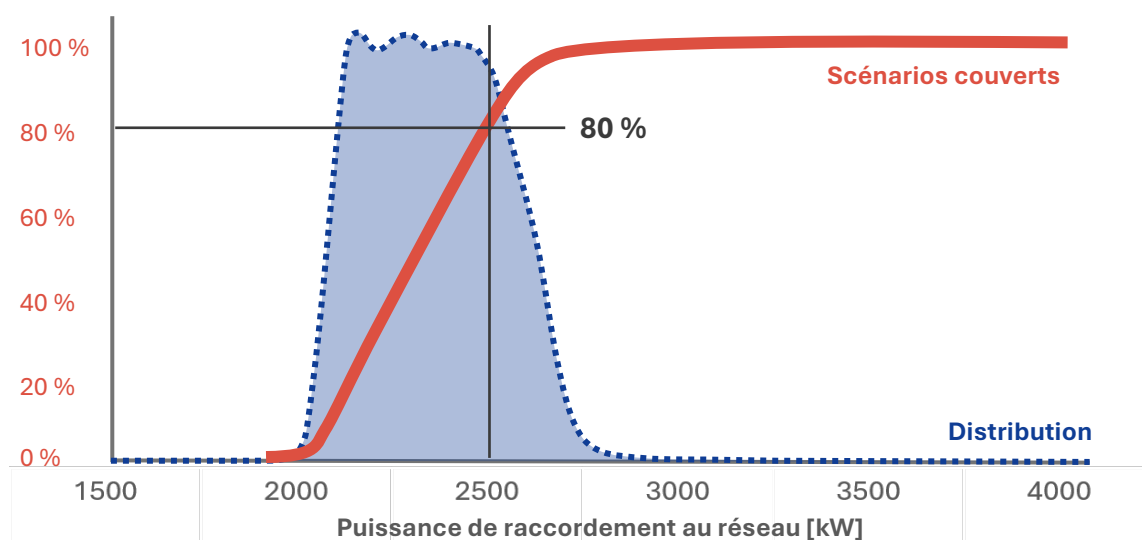
Dimensionnement de l'infrastructure de charge

1. Raccordement au réseau

Le concept de charge choisi sert de base pour le dimensionnement du raccordement au réseau. Jusqu'ici, les chapitres précédents faisaient référence à l'exploitation régulière quotidienne. Il s'agit désormais de tenir également compte des incertitudes telles que les temps de charge réduits liés à des retards, de coupures de courant, de pannes techniques, de transports de remplacement non planifiés ou d'événements extra-horaires (par ex. évènements et manifestations).

Dans le cas de Chur Bus, ces scénarios ont été enregistrés dans une simulation pour analyser leurs effets sur la puissance de charge nécessaire. La combinaison aléatoire de différents scénarios permet d'obtenir une distribution de la puissance raccordée nécessaire, qui permet d'estimer facilement le cas le plus défavorable.

Simulation Monte-Carlo



La ligne bleue indique la distribution des résultats de simulation de la puissance de raccordement au réseau nécessaire pour tous les scénarios considérés. La courbe rouge indique le pourcentage de scénarios possibles pouvant être couverts avec une puissance de charge donnée. En fin de compte, c'est l'exploitant qui doit décider jusqu'à quel point il souhaite couvrir les éventuelles incertitudes. Couvrir les derniers pourcents entraîne généralement un surdimensionnement de l'infrastructure de charge par rapport aux scénarios d'exploitation normaux. À Coire, 2500 kW permettent de couvrir 80 % des scénarios.

200 000

Nombre de **combinaisons aléatoires** simulées

80 %

Des cas, pour lesquels la puissance de charge est inférieure à 2500 kW

3 x 1 MW

Puissance de l'installation nécessaire pour couvrir l'ensemble des **cas d'utilisation**. Ce dimensionnement permet de couvrir des cas isolés extrêmes et facilitera l'extension future de l'infrastructure si nécessaire.

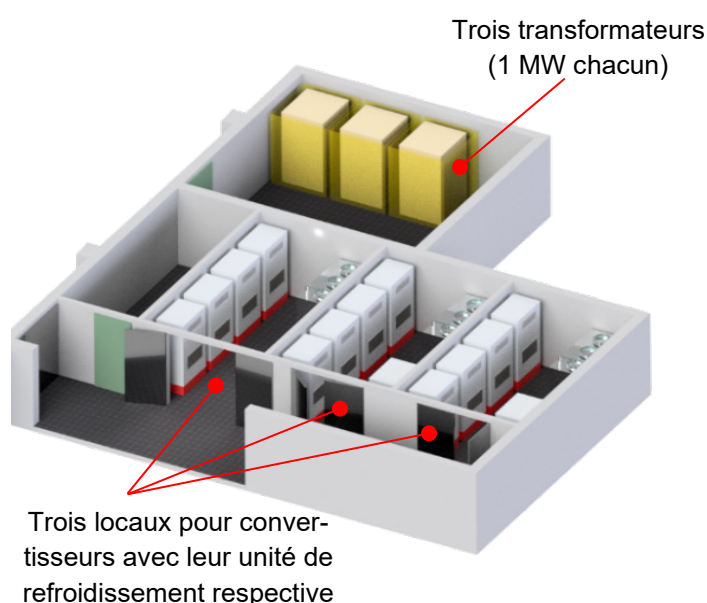
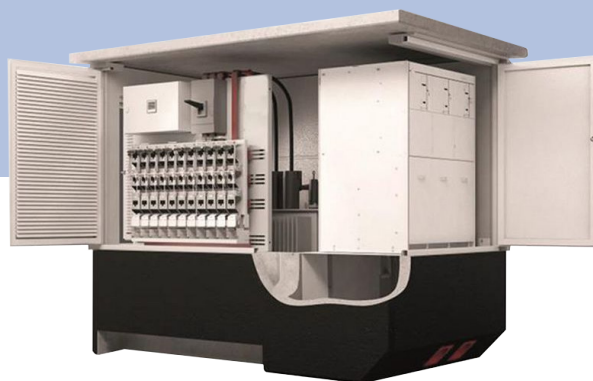
Réserves

Une **réserve** de puissance permet de faire face à des événements comme **la fête de Coire** ou des remplacements de trains.



2. Station transformatrice

La station transformatrice convertit la moyenne tension en basse tension nécessaire aux véhicules électriques. Il convient de déterminer l'installation et l'espace requis en concertation avec le fournisseur local d'énergie. Souvent, son installation est prise en charge par le fournisseur d'énergie, tandis que l'exploitant du parc assume uniquement la partie basse tension. Il est recommandé de procéder à une installation progressive, parallèlement à la conversion du parc tout en prenant préalablement en compte l'espace final requis.



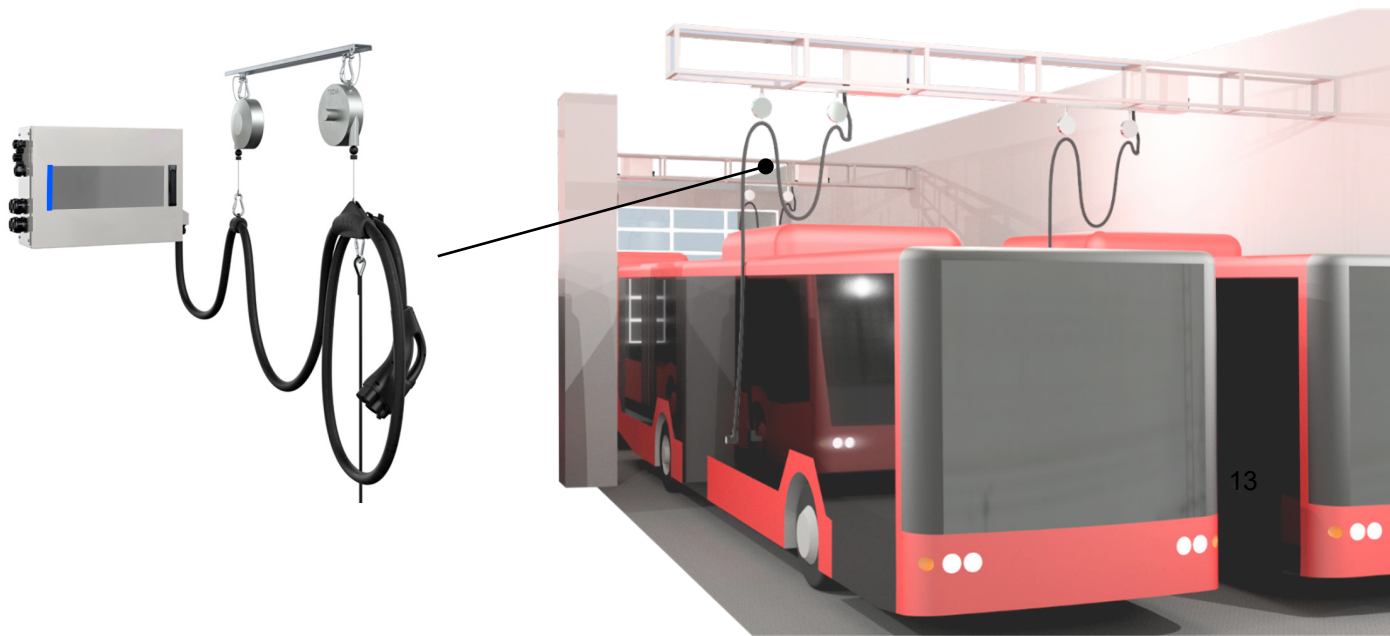
3. Convertisseurs

Les convertisseurs transforment le courant alternatif des transformateurs (400 V AC) en courant continu (400-800 V DC) et le distribuent aux points de charge. Il convient là aussi d'échelonner l'aménagement en parallèle de la conversion du parc. La réservation de l'espace doit tenir compte de différents types, car l'espace nécessaire varie selon les fournisseurs.

Dans le cas de Chur Bus, des convertisseurs seront progressivement installés dès 2026 dans des compartiments coupe-feu séparés afin de garantir la sécurité et une redondance. Les futures extensions du parc de véhicules sont prises en compte dans la planification des locaux dès le début.

4. Satellites

Les satellites constituent les différents points de charge dans le dépôt qui alimentent finalement les véhicules en énergie. Ils se composent généralement d'une borne de charge (*wallbox*) et de son câble. Les satellites complètent l'infrastructure principale et garantissent l'alimentation des points de charge situés dans les zones éloignées ou décentralisées. Ils sont particulièrement adaptés aux aires de stationnement à forte densité de véhicules et permettent un échelonnement flexible des phases de conversion.

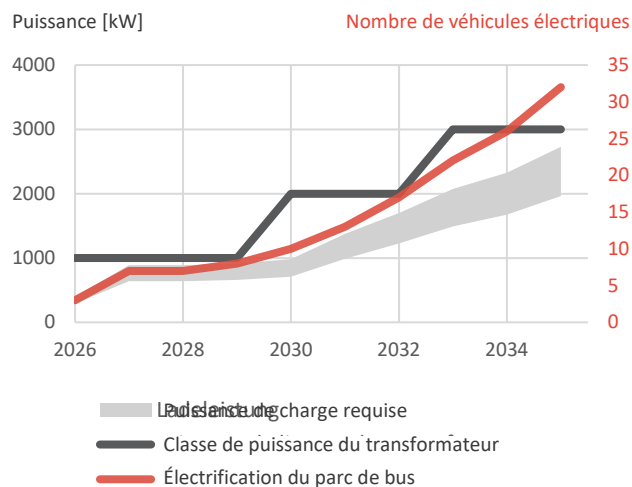


5. Échelonnement de la construction de l'infrastructure de charge

L'infrastructure peut être adaptée en **plusieurs phases d'aménagement** à l'électrification progressive du parc.

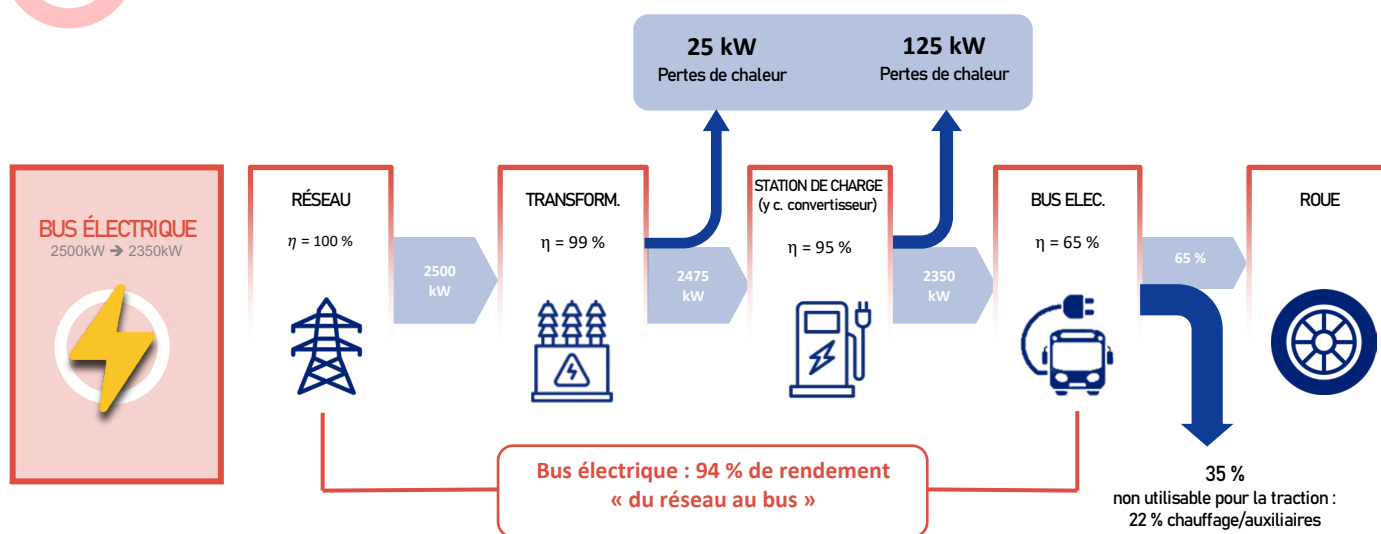
Les convertisseurs, points de charge et transformateurs sont dimensionnés et installés en fonction des besoins. Un dimensionnement optimal, tenant compte de la future stratégie de flotte, facilite les **extensions ultérieures**.

Échelonnement de l'aménagement



Gestion thermique

La transmission de l'énergie électrique du réseau jusqu'aux batteries des bus s'accompagne de pertes dissipées sous forme de chaleur, majoritairement générées par les convertisseurs (5 %).



Rendement du système, du réseau électrique au véhicule

En principe, les convertisseurs actuellement disponibles sont conçus pour être installés à l'extérieur. **Généralement**, ils nécessitent une **température ambiante inférieure à 40°C** pour le refroidissement ; la chaleur dégagée étant rejetée dans l'environnement sans être utilisée.

Dans les régions densément bâties, il est souvent difficile de disposer de suffisamment d'espace pour un grand nombre d'armoires de convertisseurs. Le choix se porte alors souvent sur des **locaux fermés**, dont il faut extraire la chaleur dissipée et l'utiliser de manière judicieuse dans ce cadre.

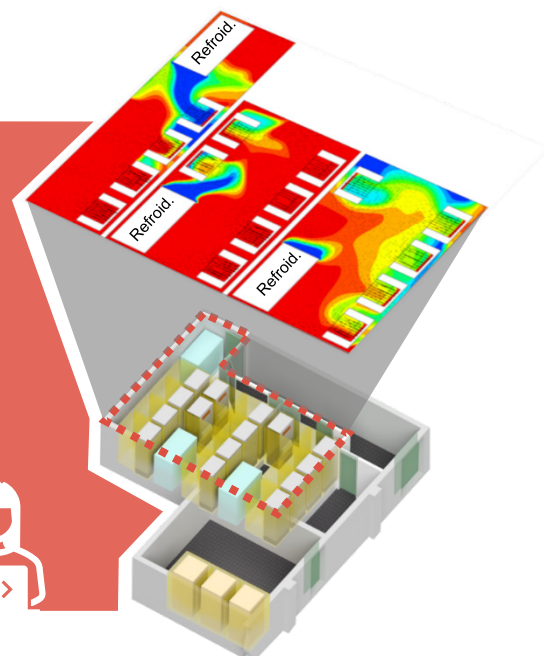
*Afin de garantir un **refroidissement optimal** des convertisseurs, il convient de simuler la distribution thermique dans les **locaux fermés**. Les bureaux d'ingénieurs disposent des logiciels requis à cet effet et peuvent vous conseiller sur l'emplacement optimal des unités de refroidissement.*



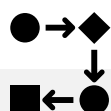
SIMULATION

La simulation des flux d'air dans les locaux des convertisseurs aide à comprendre et à optimiser les flux thermiques. Elles permettent de modéliser la répartition de la température, d'identifier les zones de surchauffe et de tester différentes solutions telles que la ventilation, l'isolation ou le refroidissement par liquide.

Ces connaissances permettent d'optimiser l'agencement des appareils, d'augmenter les performances et de prolonger la durée de vie des composants.

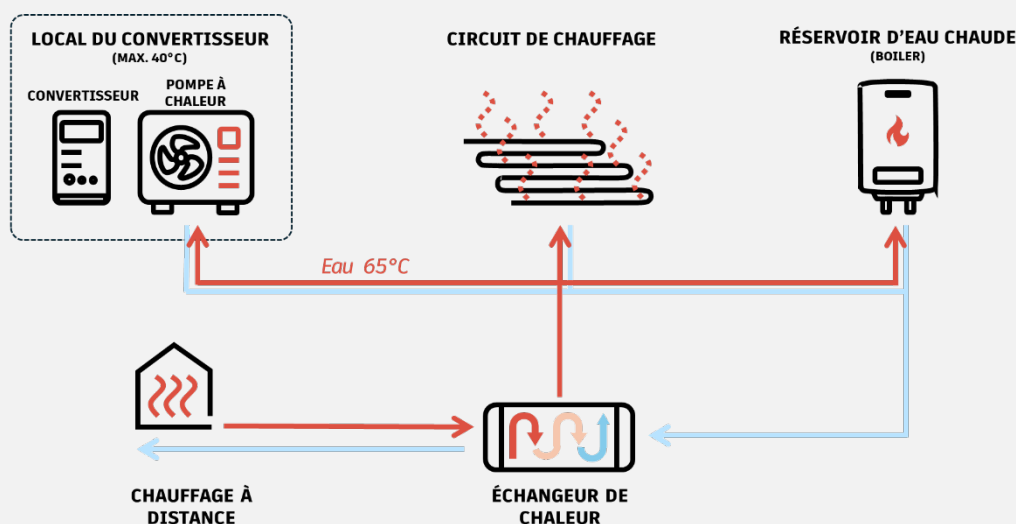


La chaleur dégagée peut être extraite au moyen d'une pompe à chaleur air-eau pour alimenter par exemple un réseau de chauffage à distance ou être utilisée localement pour l'eau chaude ou le chauffage du bâtiment.



CIRCUIT DU FLUX THERMIQUE

Mesures d'extraction de la chaleur dégagée et circuit induit du flux thermique



Simplicité

Raccordement simple aux systèmes techniques du bâtiment ou aux réseaux de chauffage à distance

Efficienne

Réduction des **pertes totales** grâce au recyclage de la chaleur dégagée

Modularité

La chaleur récupérée peut être utilisée de nombreuses **façons différentes**

ÉVALUATION DES COÛTS



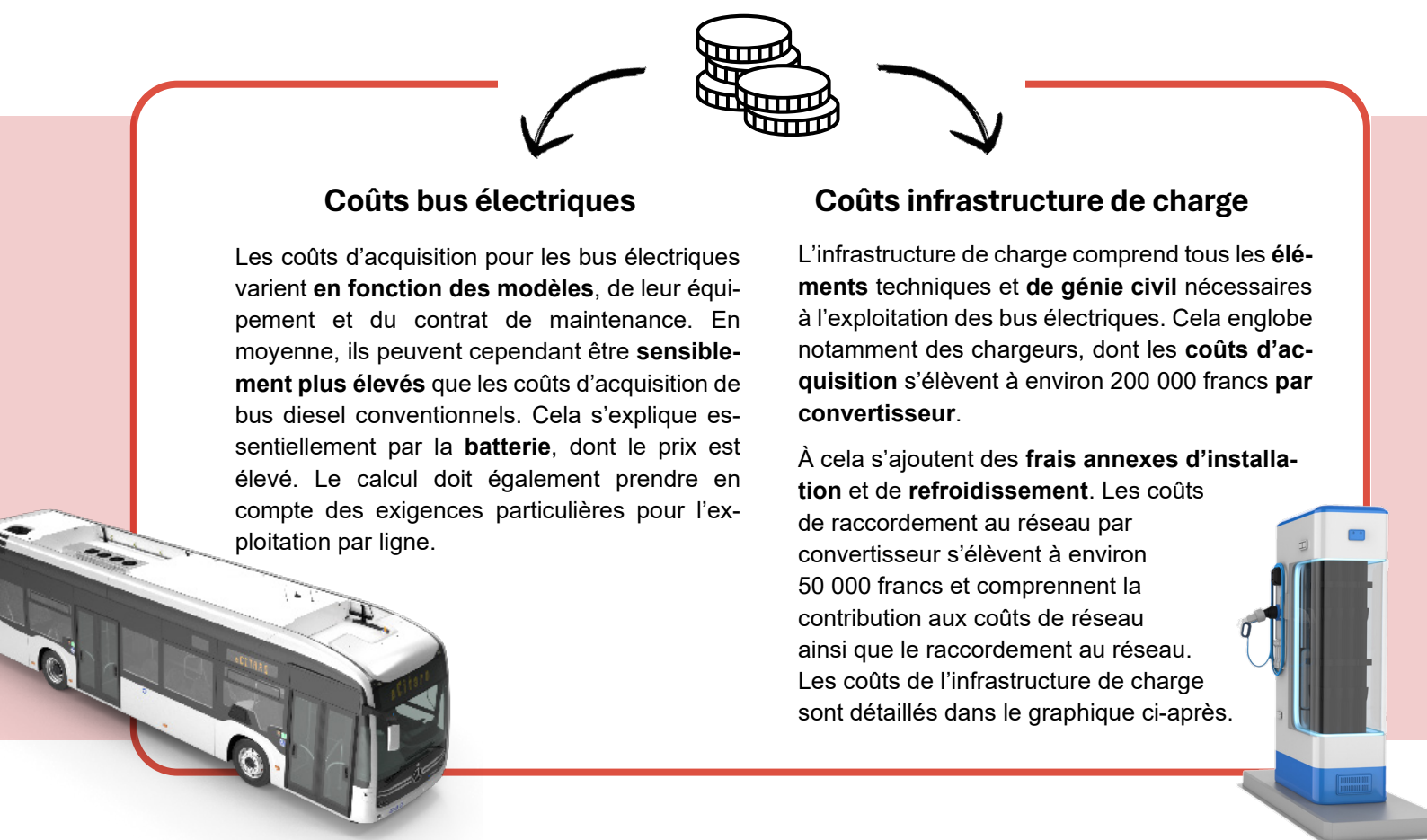
En quelques mots

Les pages suivantes sont consacrées aux aspects économiques de la mobilité électrique et de l'infrastructure de charge associée. Les coûts sont répartis en coûts d'investissement (*CAPEX*) et coûts d'exploitation (*OPEX*), ces derniers étant considérés sur une période de 20 ans (durée de vie approximative de l'infrastructure de charge) et se situant dans le même ordre de grandeur que les coûts d'investissement.

L'accent est mis sur les coûts de l'infrastructure de charge. Les coûts liés aux véhicules et à l'énergie ne sont pas détaillés ici.

Coûts d'investissement

Les coûts d'investissement (*CAPEX*, de l'anglais *capital expenditures*) comprennent toutes les dépenses nécessaires à la construction et à l'implémentation de l'infrastructure de charge ainsi qu'à l'acquisition des bus électriques. Ces coûts sont uniques et comprennent notamment les coûts d'acquisition de l'ensemble des véhicules et composants, les travaux d'installation et les coûts de raccordement au réseau qui en découlent.



Coûts d'exploitation courants

Les coûts d'exploitation (*OPEX*, de l'anglais *operational expenditures*), sont des dépenses courantes qui surviennent pendant la durée d'exploitation. Elles englobent l'entretien de l'infrastructure de charge, la maintenance des bus électriques et les coûts financiers (capital étranger ou propre).

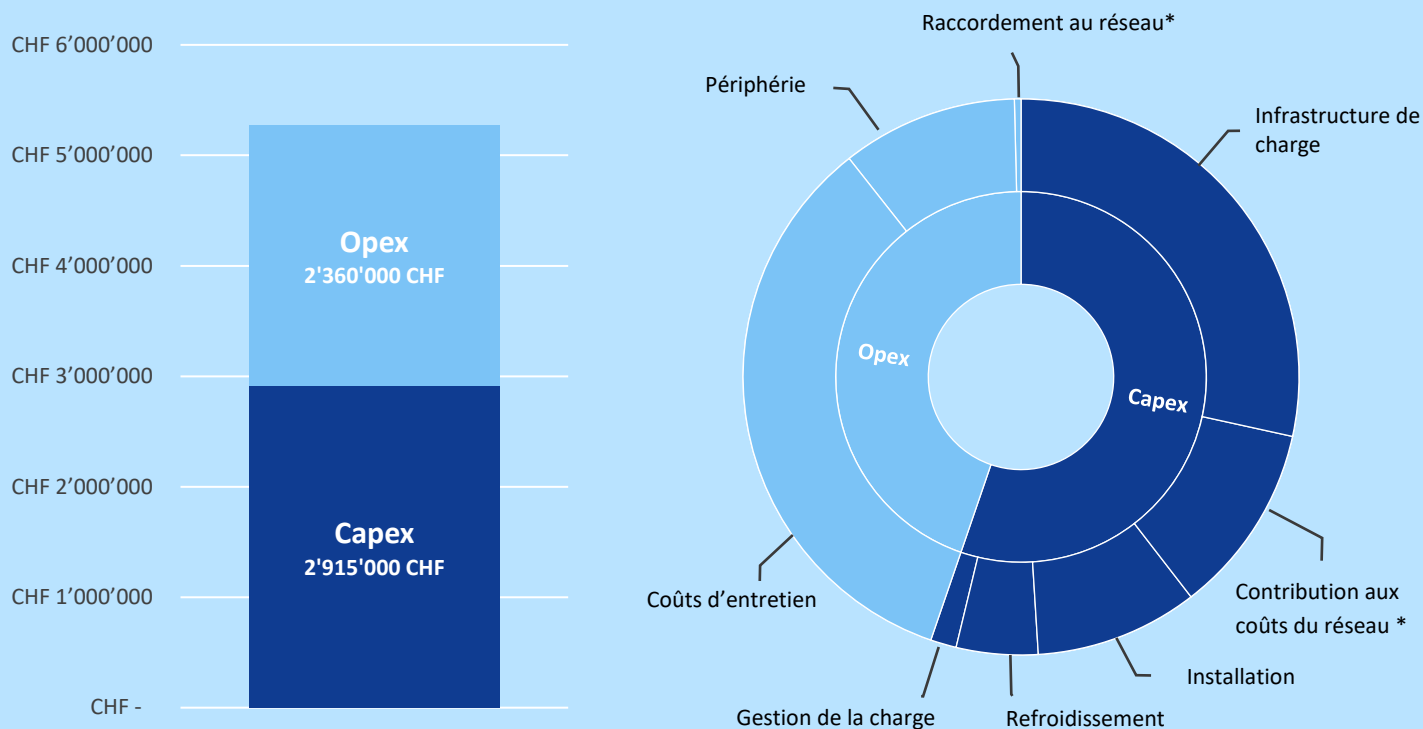
Sur une durée de vie totale de 20 ans, les coûts d'exploitation s'élèvent à environ 2,34 millions de CHF dans le cas de Chur Bus. Les coûts d'entretien semblent élevés à première vue, car le taux d'inflation moyen des cinq dernières années a été pris en compte et l'extrapolation sur 20 ans conduit à des coûts de maintenance relativement élevés.

Les hypothèses concernant les coûts doivent être régulièrement actualisées car elles reposent sur des offres, des données publiques, des expériences tirées de projets et de publications disponibles au moment de la rédaction du rapport qui sont sujettes à des fluctuations de différents facteurs d'influence. Les périphériques comprennent la consommation d'électricité des appareils périphériques (par ex. le refroidissement pour les convertisseurs) ainsi que les éventuels coûts de licence pour le système de gestion de la charge et de l'énergie.

ANALYSE CAPEX/OPEX



Coûts de l'infrastructure de charge sur une durée de vie de 20 ans avec 30 stations de 150 kW. Les coûts liés aux véhicules et à l'énergie ne sont pas inclus.



* Les contributions aux coûts du réseau et au raccordement au réseau varient selon les fournisseurs d'électricité, se distinguent par leur dénomination et peuvent être structurées différemment.

Possibilités d'encouragement et financement

Les possibilités d'encouragement englobent toutes les aides financières mises à disposition par les pouvoirs publics ou par le secteur privé pour faciliter la conversion vers des technologies à émission nulle. Il peut s'agir de subventions, d'allègements fiscaux ou de prêts à un taux d'intérêt préférentiel.

POSSIBILITÉS D'ENCOURAGEMENT

La Suisse dispose de différentes mesures d'encouragement pour les bus électriques et l'infrastructure de charge : voire à ce sujet le rapport du Conseil fédéral « [Encourager le passage des véhicules de transport public aux énergies propres](#) ». La nouveauté au niveau fédéral est l'[encouragement des bus électriques](#) par la loi sur le CO₂. La Confédération et les cantons peuvent toujours cofinancer l'infrastructure de charge pour les transports commandés via les indemnités du transport régional de voyageurs ou via le programme en faveur du trafic d'agglomération de l'ARE. Il convient de clarifier au cas par cas les différents programmes de soutien financier et d'encouragement de la mobilité électrique qui existent au niveau cantonal. En outre, les fournisseurs d'énergie proposent des contributions ou des tarifs réduits pour l'utilisation du réseau.

MODÈLES DE FINANCEMENT

Le financement peut se faire au moyen de fonds propres ou de capital étranger. Les partenariats public-privé (PPP) sont également envisageables pour partager les coûts et réduire les risques. Il est également possible d'envisager des modèles de leasing pour les bus ou des modèles de paiement à l'usage pour l'infrastructure de charge.

BILAN ÉCOLOGIQUE



En quelques mots

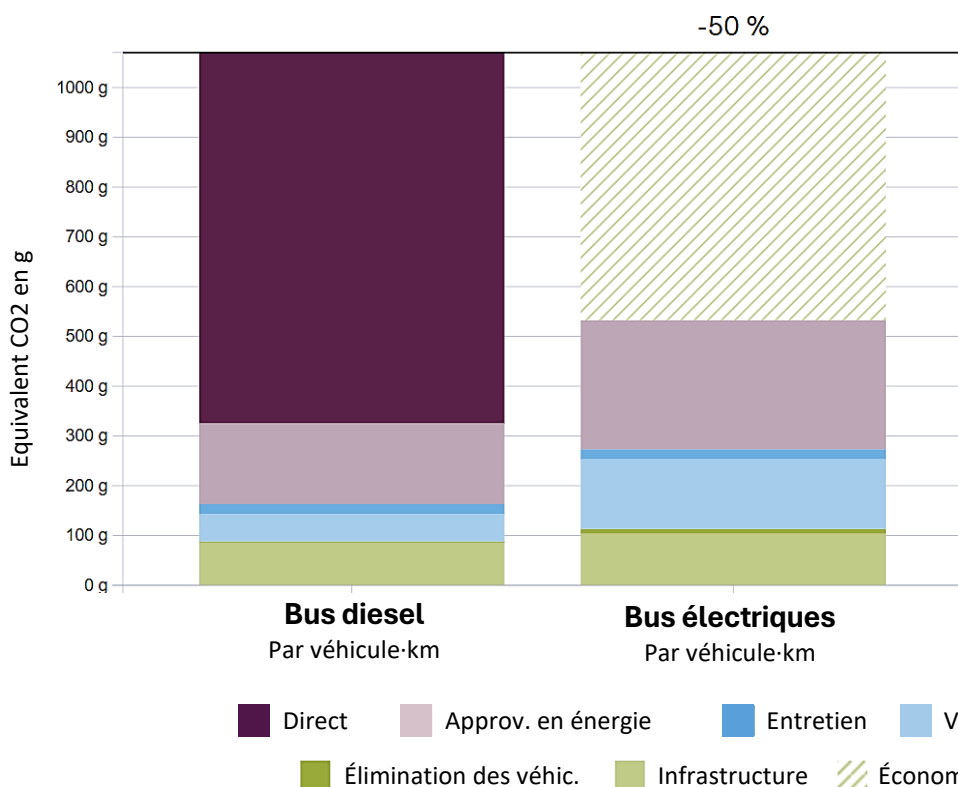
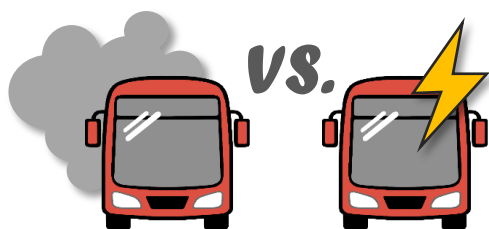
L'objectif de l'électrification du parc de véhicules est de réduire les émissions de CO₂.

Quelle est cependant l'économie réelle et quelle influence a-t-elle sur les objectifs climatiques ?

Réduction des émissions de CO₂

L'évaluation écologique des systèmes de transport public est une approche clé pour réduire l'impact sur le climat. Le bilan carbone, un des principaux indicateurs d'émissions de gaz à effet de serre (GES), quantifie les émissions totales d'un système ou d'un produit, en prenant en compte l'ensemble des phases de son cycle de vie : production, utilisation et fin de vie.

L'exploitation de bus électriques en remplacement des bus diesel permet de réduire considérablement les émissions de CO₂. La figure suivante illustre les émissions journalières de CO₂ par ligne, exprimées en kg CO₂/jour, pour les deux types de propulsion. Les bus électriques permettent une réduction moyenne de 50 % des émissions journalières.



Paramètres du véhicule :

Année de fabrication : 2020

Durée de vie : 960'000 km

Kilomètres parcourus/an : 80'000 km

Nombre de passagers : 20 (31 % d'utilisation)

Bus diesel :

Consommation de carburant : 30l/100 km

Bus électrique :

Consommation : 160 kWh/100 km

Capacité de la batterie : 550 kWh

Type de batterie : NMC

Mix électrique : mix du consommateur

Résultats du « Calculateur environnemental transport » de suisseénergie



Le « Calculateur environnemental transport » de suisseénergie permet de rapidement comparer la consommation d'énergie et les émissions de GES de différents moyens de transport.



THÈMES COMPLEMENTAIRES



En quelques mots

Le passage aux bus électriques nécessite également d'adapter l'infrastructure de l'atelier. De la sécurité haute tension aux mesures de protection contre les incendies, il s'agit de respecter de nombreuses exigences techniques et réglementaires.

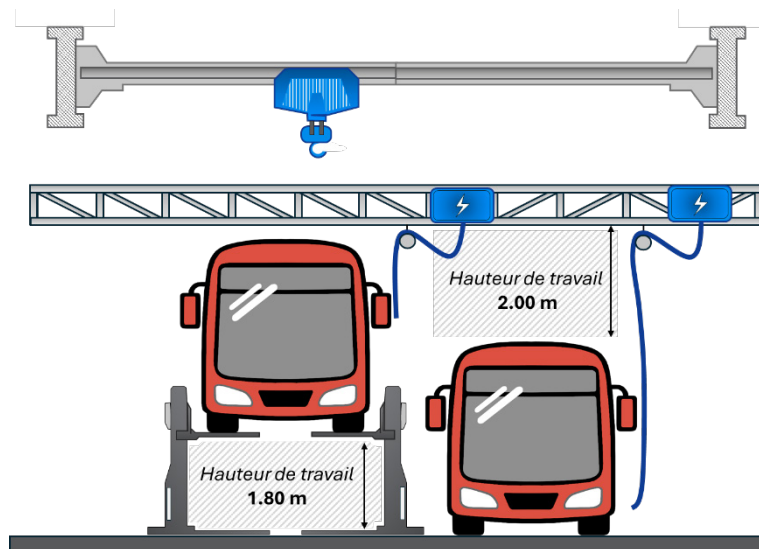
Le rapport « [*Technische Umsetzung Ladeinfrastruktur bei Chur Bus*](#) » contient de plus amples détails (résumé en français, le reste du rapport en allemand uniquement).

Aménagement de l'atelier pour bus électriques

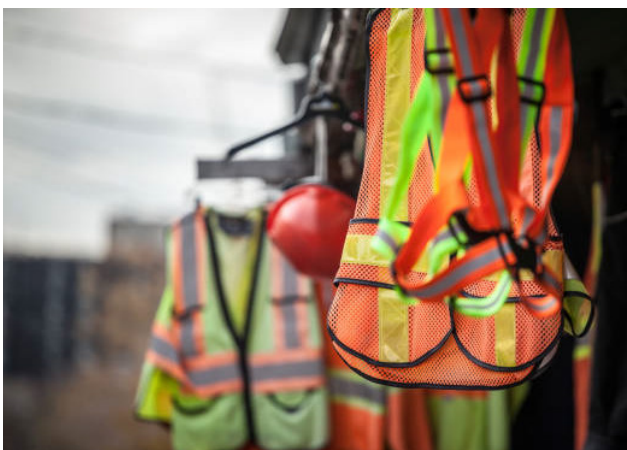
Concept d'aménagement de l'atelier pour Coire

Un atelier conçu pour les bus électriques nécessite une infrastructure fonctionnelle avec suffisamment d'espace pour les zones de charge et d'entretien, ainsi qu'un dispositif pour les travaux en toiture. Il s'agit de placer les composants de manière optimale afin de faciliter les processus de travail tout en gardant les issues de secours dégagées.

En vue d'une planification détaillée, il est recommandé de faire appel à des experts de la sécurité incendie et de la sécurité au travail pour obtenir un conseil personnalisé.



Exigences réglementaires

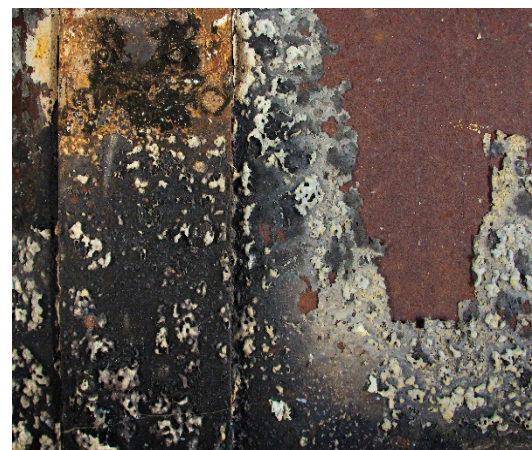


Aspects sécuritaires dans le domaine des installations à haute tension

En Suisse, les installations électriques, notamment pour la charge des bus électriques, doivent répondre à des normes de sécurité strictes. L'**ordonnance sur les installations électriques à courant fort** ([ordonnance sur le courant fort](#)), l'**ordonnance sur les lignes électriques (OLEI)** et l'**ordonnance sur la procédure d'approbation des plans des installations électriques (OPIE)** sont pertinentes à cet égard. Elles prescrivent les exigences pour les installations à haute et basse tension et garantissent ainsi une exploitation sûre pour les personnes et le matériel.

Protection incendie

Des mesures de protection incendie adaptées protègent le parc de bus contre la propagation aux autres véhicules en cas d'incendie. Il est recommandé d'équiper l'intérieur du dépôt de *sprinklers* et de distancer autant que possible les véhicules électriques stationnés entre eux afin de ralentir la propagation de l'incendie si une batterie prend feu. Les installations électriques peuvent également être réparties dans différents compartiments coupe-feu, comme dans le cas de Chur Bus où les convertisseurs sont répartis dans trois locaux distincts, et protégées par un système d'extinction au CO₂. Enfin, l'aménagement d'une place de stationnement appropriée (place d'avarie) permet de stocker des batteries ou des véhicules endommagés.



Autres ouvrages

- [1] Office fédéral de l'environnement (OFEV), "Climat : En bref". [En ligne]. Disponible sous : <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/climat/en-bref.html>
- [2] Stadt Chur, "Masterplan Energie und Klima der Stadt Chur", 2023. [En ligne]. Disponible en allemand sous : https://www.chur.ch/docn/4649449/230816_Masterplan_Energie_und_Klima_print.pdf
- [3] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV), VDV-Schrift 260: DC-Ladeinfrastruktur für Elektrobusse, Köln, Deutschland, 2020
- [4] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV), VDV-Schrift 825: Anforderungen an Betriebshöfe, Köln, Deutschland, 2019
- [5] Office fédéral de l'énergie (OFEN), "Force hydraulique en Suisse : statistique 2022", 2023. [En ligne]. Disponible sous : <https://www.news.admin.ch/fr/nsb?id=94702>
- [6] Office fédéral de l'énergie (OFEN), "Environ 80 % de l'électricité consommée en Suisse en 2022 provenait des énergies renouvelables", 2023. [En ligne]. Disponible sous : [news.admin.ch/fr/nsb?id=97643](https://www.news.admin.ch/fr/nsb?id=97643)
- [7] Association des entreprises électriques suisses (AES), "Réseaux électriques". [En ligne]. Disponible sous : <https://www.strom.ch/fr/connaissances/reseaux-electriques>
- [8] Fraunhofer IVI, Elektrische Bussysteme – Einführungskonzeptionen, Dresden, Deutschland, 2021
- [9] CNRS – Centre efficacité énergétique des systèmes, "Stratégies de gestion de l'énergie pour des flottes de bus électriques à batterie", 2020. [En ligne]. Disponible sous : <https://du-mas.ccsd.cnrs.fr/CEES/tel-03710820v1>
- [10] A. Azzi, *Projektarbeit Master – E-Bus TL*, LITRA, 2021. [En ligne]. Disponible sous : https://litra.ch/media/article_images/2021/03/Alain_Azzi_-_Projet_master_ebus_TL_public.pdf
- [11] SwissEnergie, "Calculateur environnement transport". [En ligne]. Disponible sous : https://www.suisseenergie.ch/programmes/calculateur-environnemental-transport/?pk_vid=4f9174c9418c3926174886955199e717
- [12] C. B. Heendeniya, D. Strepparava, M. Belliardi und V. Medici, "PVxTutt'Elettrico: Maximierung von Effizienz und Effektivität beim Übergang von Diesel- auf Elektroantrieb", Mendrisio, 09.04.2024.
- [13] C. Schulz-Dübi und R. Zürcher, Leitfaden Flottenelektrifizierung für Busbetriebe, EnergieSchweiz, 2023.
- [14] Office fédéral des transports (OFT) - Stratégie énergétique 2050 des transports publics, guide "Photovoltaïque et consommation propre des TP – SETP 2050", P-176, 2022.
- [15] DKE – Deutsche Kommission Elektrotechnik, Technischer Leitfaden – Ladeinfrastruktur Elektromobilität V4.1, Frankfurt am Main, Deutschland, 2022.
- [16] Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA), Roadmap Batterie-Produktionsmittel 2030, Frankfurt am Main, Deutschland, 2023.



PROCHAIN ARRÊT :

MOBILITÉ RESPECTUEUSE DU CLIMAT

**PROPULSIONS ÉLECTRIQUES,
RÉSEAUX INTELLIGENTS,
VILLES PROPRES**

INNOVATING A SUSTAINABLE FUTURE

Helbling Technik AG
Schachenallee 29
CH-5000 Aarau
+41 62 836 45 45

Suivez-nous :
helbling.ch [LinkedIn](#)



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

CHUR BUS

 **helbling**