



**Étude en vue d'une électrification complète du réseau de
bus t1 à l'horizon 2030**
Projet de master en génie mécanique

Auteur : AZZI Alain¹
Date : 18 septembre 2020

Assistants : ORTELLI Nicola, POUGALA Janody
Professeur : BIERLAIRE Michel
Laboratoire : TRANSP-OR - Transport and Mobility Laboratory

Superviseur : SEYDOUX Philippe
Entreprise : Transports publics de la région lausannoise - t1

1. alain.azzi@alumni.epfl.ch

Table des matières

1	Introduction	7
1.1	Objectif et teneur du projet	7
1.2	Choix technologiques et stratégiques	7
2	État de l'art	8
2.1	Technologies de bus électriques	8
2.2	Équipements des bus électriques	11
2.3	Autres modifications et adaptations requises	14
2.4	Plan et études de déploiement de réseaux ou de bus électriques dans d'autres villes	15
2.5	Financement et risques liés aux bus électriques	18
2.6	Modélisations de l'électrification dans la littérature	19
3	Méthodologie	22
3.1	Modèle de consommation	23
3.2	Problème d'optimisation	32
3.3	Données du cas des tl	34
4	Résultats	35
4.1	Scénario de base	35
4.2	Variations de la température de dimensionnement	37
4.3	Augmentation de la capacité des batteries ONC	39
4.4	Modification de la puissance de chargement au terminus	41
4.5	Variation du prix des véhicules	43
4.6	Variation du prix des bornes de recharge	46
4.7	Suppression de la rétrocession de l'impôt sur les huiles minérales	48
4.8	Scénarios extrêmes	49
4.9	Comparaison des scénarios	52
5	Discussion	53
5.1	Plan proposé	53
5.2	Paramètres déterminants pour la stabilité des résultats	54
5.3	Limitations et recherches ultérieures	55
6	Conclusion	56

Résumé : Le réseau de bus urbain lausannois à l'horizon 2030 pourrait être électrifié grâce aux technologies overnight charging (ONC) – chargement des bus au dépôt de nuit –, opportunity charging (OPC) – chargement aux terminus – et in-motion charging (IMC) – chargement en roulant sous les lignes de contact existantes. Cette étude détermine en fonction des horaires, de la topographie, de l'infrastructure existante et des conditions météorologiques, quelles options technologiques sont réalisables pour chaque ligne de bus. Un modèle d'optimisation réduisant le prix de la transition vers l'électrique est proposé. Il aboutit sur une feuille de route qui classe les lignes de bus en fonction de la faisabilité et du coût, ce qui permettra d'envisager plusieurs scénarios possibles pour l'électrification à l'horizon 2030 en fonction des variations potentielles de coûts, de capacité de batteries et de température de dimensionnement.

Mots clés : Bus urbain, électrification, overnight charging, opportunity charging, in-motion charging, faisabilité technique, modèle de consommation, optimisation

Synthèse et recommandations

À l'horizon 2030, le réseau de bus urbains des Transports Lausannois (25 lignes) en Suisse doit être électrifié grâce à trois technologies :

- Overnight charging (ONC) : recharge au dépôt à faible puissance. Ces bus possèdent une large batterie optimisée énergie, et n'ont besoin d'aucune infrastructure supplémentaire sur la chaussée.
- Opportunity charging (OPC) : recharge au terminus à haute puissance. Une relativement petite batterie optimisée puissance caractérise ces bus, qui requièrent donc un mât de recharge aux terminus.
- In-motion charging (IMC) : recharge sous caténaire avant de rouler grâce à la batterie sur certains tronçons. Une ligne de contact est donc requise sur au moins 50% du trajet.

Toutes ces technologies recourent au stockage d'énergie dans des batteries, à l'adaptation des ateliers et à la prise en considération des normes incendies et même parfois à ré-équiper les terminus et les dépôts.

La consommation d'énergie de chaque ligne est primordiale pour déterminer les possibilités technologiques. Les facteurs tels que la capacité des batteries ou la disponibilité de lignes de contact sont déterminants pour assurer la faisabilité technique de la solution. Un modèle est ainsi développé pour prédire consommation et faisabilité technique. Il peut être utilisé pour n'importe quelle ligne actuelle ou future de l'agglomération lausannoise - et même en Suisse, moyennant quelques modifications mineures. Cet algorithme de calcul se base sur des modèles physiques et statistiques. Il est codé en Python, permettant un usage libre de licences aux tl. De plus, il offre la possibilité de varier plusieurs paramètres dont la température, la dimension des batteries, les lignes de bus prises en compte, etc.

Grâce aux sorties du modèle de consommation, une optimisation économique peut être effectuée : elle permet de choisir la technologie et l'année de transition pour chaque ligne, avec pour objectif de minimiser le coût total de la transition vers l'électrique. L'optimisation se fait en s'assurant de la faisabilité technique (disponibilité de bus notamment) et économique (limite d'investissement annuel). L'algorithme ainsi développé sur IBM CPLEX [1] permet de varier les coûts des bus, des bornes de recharge et des carburants.

Seize simulations avec diverses variations de paramètres de prix, de capacités de batteries et de puissance de chargement sont donc effectuées. Elles offrent une idée de la robustesse des solutions, mais elles permettent surtout d'identifier les paramètres qui pourraient le plus impacter le caractère optimal de la solution proposée. La figure suivante regroupe les données de ces scénarios : pour chaque année et pour chaque ligne de bus, la figure indique le nombre de simulations ayant déjà effectuées la transition électrique.



FIGURE 1 – Résultat des seize simulations. Le nombre de simulations ayant effectuées la transition vers l'électrique est noté pour chaque ligne de bus pour chaque année.

Si une ligne ne peut être électrifiée par aucune simulation dans l'état actuel, une revue de son horaire est une solution possible.

En comptant les prix d'investissements et de carburants (diesel et électricité) une enveloppe de x à x millions de CHF est à prévoir entre 2020 et 2032 afin d'accompagner la transition électrique.

Les prix des véhicules et des mâts de recharge OPC sont les critères qui modifient le plus fortement le plan de transition.

Dans toutes les simulations, la technologie OPC est la plus avantageée. La technologie ONC est néanmoins privilégiée pour les lignes qui ont cette possibilité. L'algorithme ne fait que très rarement recours à la technologie ONC, vu que chaque ligne de bus présente au moins un véhicule qui effectue un nombre de kilomètres supérieur à l'autonomie offerte par les batteries des bus ONC actuelles. Un changement des horaires est donc nécessaire pour envisager cette option. Cette perspective obligerait les tl à posséder un plus grand nombre de véhicules, augmentant ainsi le prix d'investissement, d'exploitation et exigeant des travaux supplémentaires d'élargissement des dépôts.

Sans changement d'horaire, la technologie choisie par ligne ne présente presque pas de variations selon les scénarios. L'année de transition reste toutefois plus variable, même si pour chaque ligne, au moins 60% des scénarios font le choix de la même année de transition.

Ce rapport conclut sur l'avantage de l'OPC comme technologie pour le réseau tl actuel, si aucun changement horaire n'est effectué. Cette option mérite toutefois d'être envisagée, la technologie OPC étant plus compliquée à mettre en place.

Glossaire

- A Aire de la section du bus. 23
- \ddot{x} Accélération du véhicule assimilé à un point matériel. 24, 25
- ΔT Temps d'un cycle. 24, 25, 28
- Δt Temps d'accélération ou de décélération durant un cycle.. 24, 25, 28
- α Angle (pente) de la chaussée sur laquelle roule le bus. 23, 28
- \dot{x} Vitesse du véhicule assimilé à un point matériel. 24, 25
- μ_s Coefficient de frottement statique. 23
- ρ Densité massique de l'air. 23
- F_s Force de frottement statique (ou de roulement). 23
- F Force de traction et ou de freinage exercée par le véhicule afin de maintenir une accélération consigne. 23, 24
- N Force normale exercée par le sol. 23, 24
- F_a Force de frottement aérodynamique. 23
- a Consigne d'accélération du bus. 25, 28
- c_f Coefficient de pénétration du bus dans l'air. 23
- g Constante de gravité terrestre de $9.81m/s^2$. 23
- m Masse du bus en tonnes. 23
- v_{max} Vitesse maximale d'un bus sur un tronçon. 25
- v_{moy} Vitesse moyenne d'un bus sur un tronçon. 25
- x Position du véhicule assimilé à un point matériel. 25
- AB** Autobus : autobus standard de 12 m. 11, 32, 36–38, 40, 42, 44, 46, 49, 50
- ABA** Autobus articulé : autobus simplement articulé de 18 m. 32, 36–38, 40, 42, 44, 46, 49, 50, 54
- ABM** Autobus moyen : autobus de 10.5 m. 11, 32, 36–38, 40, 42, 44, 46, 49, 50
- batterie optimisée puissance** Batterie dont la structure chimique est prévue pour un chargement et un déchargement rapide et donc à forte puissance. 2, 10–12, 56
- batterie optimisée énergie** Batterie dont la structure chimique favorise une très haute densité énergétique afin de stocker le plus possible d'énergie dans la plus faible masse. 2, 8, 11, 12, 56
- IMC** In-motion charging : trolleybus à batterie s'approvisionnant grâce aux caténaires. 1, 2, 7, 11, 15–18, 35, 36, 38, 40, 42, 44, 46, 49, 50, 54, 56, 58
- MIB** Midibus : autobus de moins de 10.5 m. 11, 32, 36–38, 40, 42, 44, 46, 49, 50
- ONC** Overnight charging : bus à batterie optimisée pour l'énergie qui se charge exclusivement au dépôt. 1–3, 5–11, 13–19, 21, 22, 32, 35–42, 44, 46–52, 54–58
- OPC** Opportunity charging : bus à batterie optimisée pour la puissance qui se charge essentiellement au terminus, à quelques arrêts et/ou au dépôt. 1–3, 5–7, 9–11, 13–22, 32, 35–44, 46–50, 52, 54–58
- tl** Transports publics de la région lausannoise - Entreprise de transport proposant le projet. 2, 3, 5, 7, 11, 14, 15, 19, 23, 27, 29, 32–35, 41, 46, 53–55, 58
- Transp-or** Transport and mobility laboratory - Laboratoire de l'EPFL, accueillant le projet. 7

Table des figures

1	Résultat des seize simulations. Le nombre de simulations ayant effectuées la transition vers l'électrique est noté pour chaque ligne de bus pour chaque année.	3
2	Modèle newtonien de traction du véhicule. La force de traction F permet au véhicule de compenser la gravité g et les frottements F_s et F_a	24
3	Profil d'accélération, de vitesse et de position selon le modèle choisi.	25
4	Résultats du modèle de consommation spécifique en fonction de la température comparés aux données réelles.	28
5	Trajet suivi durant le test d'un autobus électrique à Lausanne. Les numéros représentent dans l'ordre les points de relevée des données. La ligne rouge-bleu présente le trajet effectué. Durant le trajet bleu, tous les arrêts officiels de bus sont effectués.	31
6	Comparaison des résultats obtenus par le modèle, aux données relevées lors du test d'un bus électrique à Lausanne.	32
7	Évolution du nombre de bus diesel et du nombre maximal de bus électriques possibles dans le parc de véhicules des tl.	34
8	Résultat de transition par ligne, année et technologie du scénario de base.	36
9	Résultat de transition par ligne, année et technologie des scénarios avec variations de la température de dimensionnement.	38
10	Différences entre les scénarios de variations de la température de dimensionnement et le scénario de base.	39
11	Résultat de transition par ligne, année et technologie des scénarios d'augmentation de la dimension des batteries ONC.	40
12	Différences entre les scénarios d'augmentation de la capacité des batteries et le scénario de base.	41
13	Résultat de transition par ligne, année et technologie des scénarios avec variation de la puissance de charge.	42
14	Différences entre les scénarios de variation de la puissance de recharge OPC et le scénario de base.	43
15	Résultat de transition par ligne, année et technologie des scénarios avec variations du prix des véhicules.	44
16	Différences entre les scénarios de variations du prix des véhicules et le scénario de base.	45
17	Résultat de transition par ligne, année et technologie des scénarios de variations de prix de chargeurs.	47
18	Différences entre les scénarios de variations des prix des chargeurs et le scénario de base.	48
19	Résultat de transition par ligne, année et technologie du scénario sans rétrocession de la taxe sur les huiles minérales.	49
20	Résultat de transition par ligne, année et technologie des scénarios les moins ou plus favorables à la transition.	50
21	Différences entre le scénario pessimiste et le scénario optimiste et le scénario de base.	51
22	Nombre de scénarios ayant effectué l'électrification par année et par ligne de bus.	52
23	Nombre de scénarios par ligne et par choix technologique.	53

Liste des tableaux

1	Paramètres du modèle de consommation spécifique thermique et auxiliaires.	28
2	Catégorisation des routes suisses selon la norme VSS [2].	29
3	Données de la simulation de base.	36
4	Récapitulatif du scénario de base par ligne de bus.	37
5	Données des simulations avec la température extérieure à 0 ou 10°C.	38
6	Prix des scénarios de transition avec différentes températures de dimensionnement.	38

7	Données des simulations avec des batteries de capacités augmentées ONC 10, 20, 30 et 50%.	40
8	Prix des scénarios de transition avec différentes augmentations des capacités de batteries.	41
9	Données des simulations avec des puissances de charge OPC plus basses (300 kW) et plus hautes (600 kW).	42
10	Prix des scénarios de transition avec différentes puissances de recharge.	42
11	Données de la simulation avec des prix de bus 10% moins chers et 10% plus chers.	44
12	Prix des scénarios de transition avec des bus moins ou plus chers de 10%.	44
13	Données de la simulation avec chargeur ONC à 60'000 CHF ou 80'000 CHF ou chargeur OPC 20% moins cher.	46
14	Prix des scénarios de transition avec des variations des prix des chargeurs.	47
15	Données de la simulation sans rétrocession de l'impôt sur les huiles minérales.	49
16	Données de la simulation avec les critères les moins favorables ou les plus favorables à la transition électrique.	50
17	Prix des scénarios de transition les plus favorables et les moins favorables à l'électrification.	50

1 Introduction

1.1 Objectif et teneur du projet

Les transports publics de la région lausannoise tl sont la principale entreprise de transport public desservant l'agglomération et la région lausannoise en Suisse. Actuellement, elle exploite 2 lignes de métro, une ligne de train (leb), 40 lignes de bus et autobus dans l'agglomération lausannoise, dont 5 lignes de bus régionales et 6 lignes de bus de nuit [3].

Le réseau de bus actuel est composé de 10 lignes de trolleybus articulés électriques, de 25 lignes urbaines au diesel, de 5 lignes régionales et de 6 lignes nocturnes. Ce réseau est exploité en 2020 grâce à 79 trolleybus, 17 remorques et 151 autobus, dont 13 à deux étages.

Par son réseau de métros électriques et de trolleybus et du leb, les transports lausannois offrent une solution de mobilité électrique très faiblement émissive de gaz à effet de serre aux habitants de l'agglomération lausannoise. Afin de renforcer son engagement environnemental, une électrification des véhicules roulant actuellement au diesel est envisagée.

L'objectif de ce travail est de proposer une stratégie d'électrification du réseau urbain actuel (25 lignes)¹.

Ce projet s'effectue dans le cadre d'un projet de master au laboratoire de transport et de mobilité (Transpor) de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne.

1.2 Choix technologiques et stratégiques

L'électrification du réseau se poursuivra grâce à une nouvelle ligne de métro (m3) et une ligne de tramway (t1). Cependant, ces infrastructures lourdes ne sont pas des solutions généralisables à tout le réseau. Le réseau bus doit donc être électrifié.

Les tl font aussi le choix de l'électrique pour les bus urbains puisque l'électricité suisse est à faible émission et que les Services industriels de Lausanne (SIL) les fournissent en courant vert. De plus, les tl maîtrisent les technologies électriques grâce à leur réseau de trolleybus.

Trois technologies sur le marché ont été choisies, car matures et déjà commerciales : l'overnight charging (ONC), l'opportunity charging (OPC) et l'in-motion charging (IMC). Ces technologies seront présentées dans la section 2.1.

Profitant de l'évolution technique de la technologie IMC, les tl peuvent étendre leur réseau de trolleybus sans étendre chaque fois la ligne aérienne de contact. Cette infrastructure ne peut pas être facilement implémentée partout et peut être sujette à des oppositions. Seule la ligne 18 profitera d'une prolongation de la ligne aérienne. De même, afin de préserver une cohérence dans leur matériel roulant, les tl préfèrent que leur parc de trolleybus – incluant les trolleybus à batterie (IMC) – se limite à des véhicules articulés et doubles articulés.

Les mêmes arguments de coût et de dérangement s'ajoutent au faible temps d'arrêt aux arrêts de bus et plaident en faveur de n'installer les bornes de recharge OPC qu'aux terminus.

Avec les incertitudes de construction des lignes à infrastructure lourde (m3 et t1) et à l'agilité d'adaptation du réseau de bus, les tl n'ont pas d'horaires et de réseaux prévus, année par année jusqu'en 2030. Il a donc été décidé de prendre le réseau actuel comme base pour la planification. Le problème d'optimisation peut évidemment être appliqué à une autre année d'étude.

1. Lignes 12, 13, 16, 17, 18, 19, 22, 23, 24, 29, 31, 32, 33, 36, 38, 41, 42, 45, 46, 47, 48, 49, 64, 68 et 69.

2 État de l'art

2.1 Technologies de bus électriques

Le marché du bus électrique est en forte expansion [4]. De plus en plus de constructeurs s'y positionnent [5]. L'avantage principal de ces bus est le rendement inégalé de la chaîne de traction et la simplicité de la récupération de l'énergie. Ceci permet aux bus articulés de consommer entre 2.5 et 3.5 kWh/km en moyenne et pour les bus plus petits entre 0.9 et 2.0 kWh/km, sachant qu'un bus articulé diesel peut consommer plus que 7 kWh/km [6]. À cet aspect s'ajoutent d'incontournables avantages : les bus électriques sont capables de fournir de l'accélération, de la puissance et du confort d'un niveau au moins équivalent aux alternatives diesel et hybride [6], voire supérieur, en raison de la réduction de bruit pour les riverains et les passagers.

Toutefois, les performances des batteries restent le point faible de ces bus. Celles-ci engendrent de longs temps de recharge, de faibles autonomies, des masses supplémentaires à tracter et des inquiétudes quant à leur recyclage [6]. Cette masse supplémentaire n'est d'ailleurs pas sans effet sur l'état de la chaussée. De plus, leur coût explique à lui seul la différence de prix entre un bus électrique et un bus diesel [6], sachant que le prix des alternatives à batteries est le double du prix des bus diesel [7]. Elles peuvent cependant aussi être louées [6].

Tous les bus électriques récupèrent l'énergie de freinage jusqu'à 75% de l'énergie disponible, augmentant leur efficacité et réduisant la taille requise de batterie [8]. Les constructeurs travaillent aussi sur l'efficacité énergétique de leurs bus, en particulier la diminution du poids, l'amélioration de l'isolation thermique et proposent l'utilisation d'un chauffage thermique d'appoint qui s'active à basse température.

2.1.1 Overnight charging (ONC)

Les bus ONC sont des véhicules électriques stockant l'énergie nécessaire dans une batterie optimisée énergie. Ils offrent une solution qui ne requiert pas d'infrastructures supplémentaires sur la chaussée, mais nécessite des bornes de recharge au dépôt.

Batteries et autonomie Les autobus ONC ont donc une large batterie pesant jusqu'à 4-5 tonnes (ou 360 kWh) et pouvant effectuer au moins 120 km par recharge. Le développement des batteries aboutira à une autonomie de 300-350 km. Actuellement, selon une étude des Verkehrsbetriebe Luzern [5], elles permettent une autonomie de 120-150 km pour un autobus, respectivement 90-120 km pour un articulé et sont appelées à atteindre en 2030, 220-280 km pour un autobus et 170-220 km pour un articulé. Selon le rapport de la BSU [9], les autobus ont des batteries de 350 kWh et consomment 1,4 kWh/km, permettant d'effectuer 107 km. Les autobus articulés ont des batteries de 450 kWh et consomment 1,8 kWh/km, pour une autonomie de 107 km. Cette technologie utilise une batterie optimisée énergie, qui est de plus grande durée de vie et est plus énergétiquement dense. Ces accumulateurs ne sont toutefois pas très rapides au chargement. Il s'agit souvent de batteries Li-NMC et Li-FePo [8]. La grande capacité d'une batterie optimisée énergie est assurée par diverses technologies qui impactent la durée de vie qui varie entre 5 et 10 ans. La technologie définit aussi la plage d'utilisation de la capacité qui va de 60% à 90%. Néanmoins, il est intéressant de noter qu'avec l'augmentation prévue des capacités des batteries (jusqu'à 1200 kWh), une autonomie plus grande ainsi qu'un temps d'utilisation plus long sont attendus [5].

Les VBZ estiment que 50-60% d'une batterie de bus ONC sont utilisées pour la traction, 10-15% sont nécessaires pour la climatisation et les auxiliaires, 10-15% assurent les cas extrêmes et 20% seront perdus avec la dégradation de la batterie. [10]

Recharge Le chargement s'opère à moins de 150 kW (généralement entre 50 et 150 kW) durant 3 à 5 heures. Le temps à disposition étant souvent le premier critère de dimensionnement de la puissance

de recharge [5]. Les bus ONC requièrent nécessairement une adaptation de l'infrastructure en dépôt. Le chargement au dépôt se fait avant tout de manière stationnaire et conductive (plug-in, docking ou ligne de contact) [8]. L'augmentation de la capacité de batterie risque de rendre obsolètes les solutions actuelles de recharge au dépôt, faute de pouvoir fournir la puissance suffisante à terme pour charger une batterie largement plus capacitaire [5].

Le chargement au dépôt impliquera nécessairement une adaptation de l'infrastructure pour protéger les usagers et prévenir contre les incendies [5]. L'équipement des dépôts pour la prévention des incendies est un sujet de plus en plus traité. L'UTP a travaillé avec la Fédération suisse des sapeurs-pompiers [11] afin de proposer des règles et des recommandations pour le transport des batteries, leur stockage, leur utilisation et leur sécurisation en recharge et lors de leur maintenance. Aujourd'hui, des recommandations sont en cours d'élaboration. Aucune loi ne régit le stockage, la charge et la manipulation des véhicules à batterie. En Europe, seule la France a légiféré sur cette nouvelle technologie.

Prix Un bus articulé ONC coûte 700'000 CHF incluant 230'000 CHF pour la batterie, qui peut aussi être louée à 4'000 CHF/mois environ, selon les données récoltées par l'étude de la HEIG-VD [6].

La durée de vie des bus est estimée à 14 ans. À mi-vie, les batteries doivent être changées. L'étude de la RBS-BSU [8] souligne la possibilité de rétrofiter les bus avec des batteries de plus grande capacité à ce moment.

Limitations Dans tous les cas présentés dans le rapport lucernois, l'utilisation de bus ONC n'a été possible que grâce à la réorganisation de l'assignation des bus, chaque bus revenant au dépôt pour se recharger une fois en journée [5].

Les véhicules ONC tractent leurs lourdes batteries en permanence et ne peuvent être chargés rapidement alors qu'ils ne présentent actuellement que de faibles autonomies. Le problème qui émerge est donc le dimensionnement de la batterie, qui lorsqu'elle est grande permet d'avoir plus d'énergie à disposition au dépit de l'augmentation de la masse du véhicule et par conséquent de la consommation spécifique, sans oublier l'impact sur le réseau routier. Le système a longtemps été désavantagé par le prix. L'amélioration ces dernières années de cette technologie lui a permis de devenir compétitive. Elle reste vulnérable sur deux aspects : le recyclage et la perte d'efficacité de la batterie à faible température, alors que la consommation du bus augmente [6].

Aperçu historique Durant la précédente décennie, les constructeurs chinois ont multiplié leurs efforts pour les bus ONC, poussés par des subventions. BYD proposait déjà en 2014, par exemple, un bus ayant une autonomie de 250 km pour 40 passagers, dont la version articulée de 18 m à batterie a été améliorée pour atteindre 275 km d'autonomie [12]. Les constructeurs européens ne rattrapent leur retard que depuis la fin de la décennie, eux aussi poussés par les nouvelles stratégies politiques de décarbonation. Mercedes n'a présenté son bus électrique baptisé eCitaro qu'en 2019 : il peut effectuer 170 km en hiver et 280 km en été [7]. Les divers constructeurs se livrent une guerre de chiffre sur la dimension de la batterie et l'autonomie qu'elle offre [6], alors qu'aucun cycle encore uniformisé n'existait en 2017, comme le témoigne la tentative d'uniformisation de l'UITP [13]. Toutefois, certains cycles normés, par exemple eSort, apparaissent progressivement.

Aujourd'hui plusieurs villes hors Chine exploitent ou ont déjà commandé des bus électriques comme Hambourg (DE), Paris (FR), Amsterdam (NL) ou encore Eindhoven (NL).

2.1.2 Opportunity charging (OPC)

La technologie OPC est un bus à batterie rechargeant à des points précis de son trajet. Il se situe donc entre un bus ONC et un trolleybus.

Batteries et autonomie Le bus OPC a recouru à une batterie optimisée puissance. Ces batteries permettent de charger rapidement, ce qui réduit la durée de vie et la densité énergétique. Elles sont aussi plus onéreuses (50% plus chères). Il s'agit souvent de batteries LTO ou de supercondensateurs (pour les plus fortes puissances de recharge notamment). [8] La batterie de technologie LTO se prête particulièrement bien à cette utilisation, certains fournisseurs utilisent aussi des batteries de technologie NMC pour une utilisation en OPC. Pour augmenter la durée de vie et garantir la puissance de recharge sur toute la durée de recharge, une utilisation de seulement 40 à 50% de la capacité de la batterie est courante.

La technologie OPC permet d'avoir une batterie à moins d'une tonne, pour une autonomie de 20-30 km, ce qui équivaut souvent à 2-3 trajets avant le besoin de recharge [5]. Des batteries plus capacitaires pour les bus OPC sont aussi disponibles. Selon l'étude de BSU [9], un autobus de 12 m en OPC nécessite une batterie de 150 kWh de capacité, ce véhicule a une consommation moyenne annuelle de 1.4 kWh/km permettant d'effectuer 107 km sans recharge. Pour les véhicules articulés, une batterie de 225 kWh est nécessaire pour une consommation moyenne annuelle de 1.8 kWh/km. Grâce à la recharge au terminus, ces véhicules peuvent assurer leurs services journaliers et atteindre les mêmes autonomies que les véhicules diesel. La batterie avec son système de gestion de charge pèse environ 10 kg/kWh [8].

L'option OPC, qui permet aussi le chargement de nuit, est possible. Les batteries pèsent jusqu'à 4t et avec le chargement au terminus, permettent une autonomie sur la journée entière. Un exemplaire est testé sur la ligne 342 Sarnen-Alpnach [5].

Recharge Le chargement se fait à 450-600 kW et dure entre 0.5 et 6 minutes. Il est recommandé donc de mettre les chargeurs aux terminus, vu le temps à disposition [5]. Actuellement, la recharge à 300 kW est aussi possible, même si la technologie s'oriente vers des puissances plus élevées.

Le chargement des bus se fait à l'arrêt ou au terminus grâce à un raccordement automatisé ou manuel. Il peut être stationnaire conductif (plug-in, docking ou ligne de contact) ou stationnaire inductif [8]. Il est à noter qu'une même borne de recharge OPC peut être utilisée pour différentes lignes de bus, ce qui en cas de retard peut provoquer un souci de disponibilité de mâts de recharge si les bus déjà en retard se trouvent simultanément à la même borne. De plus, les recharges sont courtes et puissantes, ce qui peut fortement solliciter le réseau local, obligeant d'installer une batterie ou des accumulateurs à l'arrêt pour stocker l'énergie à faible puissance, que le bus utilisera pour se recharger à plus forte puissance.

Prix Un bus articulé OPC de type TOSA coûte 1'300'000 CHF. Une station de recharge de 50 respectivement 150 kW coûte 42-48 respectivement 120'000 francs à l'achat. Une station de recharge rapide coûte 195'000 CHF, alors qu'une station au dépôt 290'000 CHF, sachant que l'équipement au dépôt coûte 2'220'000 CHF. Les 12 véhicules du TOSA et l'infrastructure de recharge représentent un investissement de 30 millions CHF, dont 50% sont dus au matériel roulant, 33% à la recharge et 5% aux travaux de génie civil. Cette technologie, qui élimine beaucoup des désavantages des bus ONC, a donc l'inconvénient d'augmenter le prix d'investissement total (les chargeurs à installer) [6].

Limitations Le bus OPC, par son besoin de chargement fréquent, ne peut desservir une distance très longue que si ses batteries sont plus nombreuses, allongeant le temps de recharge nécessaire au terminus [6]. Le temps au terminus, la dimension de la batterie et la puissance de recharge sont donc primordiaux, surtout lors de perturbations dans le trafic, puisque celles-ci obligent le bus à ne pas charger au terminus afin de tenter au mieux d'assurer l'horaire.

Le chargement au terminus présente un aspect risqué, si la station de recharge tombe en panne, si le trafic est soudain très dense ou si la consommation auxiliaire est très élevée [6].

2.1.3 In-motion charging (IMC)

Les bus IMC sont l'évolution des trolleybus. À la place des moteurs thermiques d'appoint, les batteries de secours ont fait leur apparition. Aujourd'hui ses batteries sont capables d'assurer l'énergie nécessaire pour une partie du trajet. Depuis le 3 août 2020, les tl exploitent un trolleybus avec batterie d'appoint sur la ligne 9.

Batteries et autonomie Les trolleybus sont aujourd'hui capables de transporter une batterie pour assurer 40 à 60% du trajet, selon la topologie du terrain. Le Swiss Trolleybus Plus de Hess, qui opère par exemple chez les VBZ permettrait de rouler jusqu'à 30 km sans lignes aériennes, grâce à sa batterie de 60 kWh [6]. Si une consommation de 3 à 3.5 kWh/km est considérée, il ne peut parcourir plus de 20 km.

Recharge Les bus IMC rechargent grâce à la ligne de contact. Ils récupèrent aussi de l'énergie pour recharger leurs batteries à la place de la réinjecter dans le réseau [5]. La recharge se faisant par ligne de contact, elle est donc décrite comme conductive dynamique [8].

Avantages Les bus IMC sont peu bruyants, disposent de planchers rabaissés, ont déjà fait leurs preuves et profitent de la présence de caténaires dans de nombreuses villes suisses dont Lausanne. Ils sont efficaces, propres et très performants à l'accélération. Un avantage supplémentaire de ces bus est la faible taille de la batterie qui rend la technologie encore plus intéressante d'un point de vue environnemental [6].

Ces bus permettent de réduire les coûts des lignes de contact, en délaissant les tronçons les plus chers pour conserver les tronçons droits sans croisements par exemple [8]. De plus, ils présentent des durées de vie remarquables (20 ans pour le matériel roulant et 50-60 ans pour la caténaire) [6].

Limitations Plusieurs facteurs limitent ces bus, dont l'esthétique de la caténaire qui ne fait pas l'unanimité, leur prix [6] et l'absence ou la rareté de l'offre pour les midibus (MIB), les autobus moyens (ABM) et les autobus (AB).

2.2 Équipements des bus électriques

Trois éléments sont déterminants pour un bus électrique : les batteries, la technologie de recharge et le confort thermique. Ces aspects offrent de grandes possibilités d'améliorations et de limitations pour les bus électriques.

2.2.1 Batteries

Les batteries sont la technologie définissant ces trois alternatives de bus. C'est leur développement ces dernières années qui a permis d'envisager l'électrification des bus. Cette affirmation montre aussi que les batteries ont été, et restent, le facteur principal limitant de ces mêmes bus qu'elles rendent possible.

Types de batteries Deux types de batteries se distinguent par leur architecture : la batterie optimisée énergie qui tente de maximiser la densité énergétique du stockage et la batterie optimisée puissance qui se focalise principalement sur la vitesse de recharge. En 2020, une batterie optimisée énergie coûte 750-800 CHF/kWh contre 1'200-1'600 CHF/kWh pour la batterie optimisée puissance. En 2030, il est estimé que les premières coûteraient aux alentours des 200 CHF/kWh contre 600-800 CHF/kWh pour les secondes. La densité énergétique des batteries augmenterait de 100-120 Wh/kg pour les batteries ONC et 80-100 Wh/kg pour les batteries OPC à 180-220 respectivement 150-180 Wh/kg [5].

Les accumulateurs lithium-ion Les batteries Li-NMC, Li-FePo, NMC et LTO, précédemment citées sont toutes des accumulateurs lithium-ion. Aujourd'hui, cette technologie est démocratisée : elle offre un rendement énergétique de 95%, une auto-décharge négligeable (moins de 10% en 1 mois), une densité énergétique relativement élevée et une durée de vie acceptable. La forme des cellules est souvent un compromis entre les formes polygonales, économes en espace et les formes cylindriques qui améliorent le refroidissement de l'accumulateur. Elles sont munies d'un système de gestion (BMS : Battery Management System) qui mesure au moins la température, la tension et le courant [14].

Durée de vie et prix La durée de vie des batteries est de 6 ans [5].

Le vieillissement des batteries est affecté en particulier par la température, l'étendue de la plage de sollicitation de la batterie et les vibrations. Ce dernier aspect est très peu traité dans la littérature [14]. L'altération des capacités des batteries ne se limite pas à sa sollicitation, mais aussi au temps. La fin de la vie d'une batterie est souvent atteinte lorsque l'un des deux critères est atteint : une diminution de 20% de la capacité totale de chargement ou une augmentation de 200% de la résistance de la batterie [14].

Afin d'augmenter leur durée de vie, il est envisageable de solliciter les batteries sur une plage plus petite, ce qui a le désavantage d'augmenter la masse à transporter. Les batteries pourraient aussi être réutilisées en stationnaire, avant d'être potentiellement recyclées [6].

Le coût des batteries (inclus dans le prix des véhicules) est de 850 CHF/kWh à 1'600 CHF/kWh [8].

Impact social et environnemental En réalité, les batteries restent une composante qui risque d'être critique pour l'environnement. Les accumulateurs Li-ion utilisent des éléments chimiques dont l'approvisionnement est précaire et dont le recyclage est mal maîtrisé. Ils ont néanmoins l'avantage d'être très utilisés et de rendre possible diverses architectures pour divers usages, typiquement les NMC – qui est une batterie optimisée énergie – et les LTO – qui est une batterie optimisée puissance. Une alternative plus écologique serait la batterie SoNi qui a le désavantage d'avoir une température de fonctionnement élevée (plus de 250°C) [15]. Aujourd'hui encore, la recherche continue à améliorer les batteries existantes et à imaginer des batteries du futur comme les batteries "tout solide" qui permettraient des recharges plus rapides et une sécurité accrue [16]. L'approvisionnement en matières premières et leur recyclage doivent être sérieusement traités d'un point de vue éthique, si les entreprises de transport public veulent s'engager dans une direction renouvelable et respectueuse des droits de l'Homme [6].

2.2.2 Bornes de recharge

La recharge se fait de manière stationnaire (conductive ou inductive) ou dynamique. Le cas dynamique (par caténaire) étant bien connu, ce paragraphe se concentre sur le chargement stationnaire. Pour la recharge conductive, trois systèmes existent : la borne de recharge (plug-in), la station de recharge (docking) et la ligne de contact. Dans tous les cas, des redresseurs sont nécessaires pour transformer la tension alternative du réseau en tension continue pour les batteries [8].

Stationnaire conductive : la borne de recharge (plug-in) La borne de recharge à l'avantage d'être un système intuitif, très répandu chez les véhicules électriques de tourisme. La recharge se fait grâce à un câble électrique. Certains véhicules offrent une possibilité de recharge en alternatif (redresseur intégré au véhicule) et d'autres requièrent une wall-box dans le dépôt. Certaines normes de prises émergent, sans pour autant avoir actuellement une généralisation de la tension de recharge ou du type de branchement. Le risque que chaque constructeur offre une technologie de recharge adaptée à la technologie de ses propres bus et que l'interopérabilité ne soit que rarement possible est une limitation potentielle [8]. Toutefois, des normes européennes sont en cours d'être mises en place pour assurer que ce cas de figure ne se produise pas. L'ACEA (Association des constructeurs européens d'automobiles) a d'ailleurs aussi émis

des normes d'interopérabilité [17]. L'installation au dépôt de systèmes de recharge plug-in requiert donc une adaptation du dépôt et un branchement manuel de tous les bus. Cette technologie est donc envisageable pour des bus ONC, mais est peu attractive pour les OPC, étant donné la perte de temps pour le branchement/débranchement manuel [8].

Le plug-in à borne est une technologie simple, peu onéreuse et peu exigeante en termes d'espace à bord. Elle requiert toutefois une grande emprise au sol et est inadéquate au chargement OPC. Le plug-in à câble suspendu est efficace, simple, peu onéreux et moins exigeant en espace mais présente un plus grand risque d'incidents et n'est pas adapté à l'OPC.

Stationnaire conductive : la station de recharge (docking) Les systèmes de station de recharge (docking) partagent le manque de normes uniformisées avec les systèmes plug-in. Leur avantage principal est le raccordement automatique. La recharge se fait par un pantographe plongeant, montant ou latéral. La station de recharge (hub) adaptée au bus étant préalablement installée au dépôt ou à l'arrêt. Cette technologie est déjà utilisée par Hochbahn à Hambourg (plongeant), à Münster (latéral) et à Dresde [8] et Genève (montant). Ces systèmes offrent une sécurité accrue et une plus grande vitesse de connexion, ce qui est un avantage considérable pour les technologies OPC [8]. Ce système est proposé par exemple par Siemens [18], ABB [19] et OppCharge [17]. OppCharge construit les systèmes de recharge pour terminus ou arrêt compatibles avec les systèmes ABB, HeuliezBus, IVECO Bus, New Flyer, Solaris, SIEMENS, Volvo, etc. Le système pantographe pèse 15 kg et peut charger à une puissance de 150 à 450 kW en courant continu selon les normes ISO/IEC. Le système est aussi compatible pour les bus à deux étages [17]. Le pantographe montant est plus économe en espace et permet un chargement automatisé et enlève tout risque lié aux câbles, et reste moins cher que l'alternative plongeante. Cependant, il augmente la masse totale du véhicule. Le pantographe plongeant enlève le désavantage lié à la masse tout en conservant les avantages de la version plongeante. Il est toutefois plus onéreux et plus exigeant pour le positionnement relatif entre le bus et la station de recharge. [8]

Stationnaire conductive : la ligne de contact La recharge stationnaire par ligne de contact se fait sur le réseau existant. Pour éviter l'échauffement local de la ligne, la puissance maximale de chargement est généralement limitée (100 kW) [8].

Stationnaire inductive La recharge stationnaire inductive se fait sans contact au dépôt ou à l'arrêt, et peut fournir une puissance de chargement jusqu'à 200 kW. Celle-ci est toutefois dépendante du positionnement du bus et de la distance entre le chargeur et la borne. Le système est plus esthétique et confortable. Il est néanmoins cher, plus complexe, moins efficace et requiert un nettoyage fréquent de la chaussée et du bus. Son installation requiert des travaux sur la chaussée [8].

2.2.3 Climatisation

Le confort thermique est un poste de dépense énergétique non négligeable pour les bus. Il peut être assuré en partie ou entièrement par l'électricité (appoint thermique pour les températures inférieures à 5°C par exemple). S'il est électrique, il peut s'agir d'un chauffage électrique direct ou d'une pompe à chaleur. De plus, le système de climatisation peut être séparé entre la partie conducteur et la partie passagers [8]. Les bus peuvent être mieux isolés qu'actuellement, permettant de réduire les besoins de chauffage et de refroidissement. De même, le système de gestion du confort thermique peut être optimisé pour réduire la consommation. Ces améliorations ont peu été exploitées dans les bus diesel, mais deviennent plus intéressantes dans le cadre de l'amélioration de l'autonomie des bus électriques, incitant les constructeurs à les effectuer [6].

2.3 Autres modifications et adaptations requises

2.3.1 Au dépôt

Les plans de déploiement de bus demandent des travaux d'adaptation des dépôts, si les bus ONC ou OPC à recharge de nuit sont considérés. En plus de l'installation du système de recharge, la gestion de la charge est importante. Le rapport du BSU recommande d'essayer d'utiliser les éléments les plus standardisés possibles [9]. La technologie de recharge choisie va avoir assurément une incidence sur l'emprise spatiale du dépôt et sur la hauteur sous plafond requise. Elle aura aussi une incidence sur les risques et les protocoles de protection des dépôts contre les incidents et les incendies. [8]

Le dimensionnement de l'infrastructure de recharge au dépôt et son architecture risquent d'être des entraves à l'évolution de l'exploitation des lignes. Le chargement au dépôt peut se faire à divers niveaux de puissance (jusqu'à 150 kW). Le branchement entre les bornes peut permettre d'augmenter et de réduire la puissance des chargeurs. Une gestion de la charge peut limiter l'augmentation de la puissance de raccordement, réduisant les coûts de transformations des dépôts, sachant qu'un raccordement plus conséquent peut exiger des travaux de la part de l'opérateur du réseau électrique local. L'installation exigera sans doute une sous-station électrique à tension moyenne et des transformateurs. La disposition de l'infrastructure depuis le raccordement primaire jusqu'aux diverses bornes peut se faire selon diverses architectures afin de fournir la puissance nécessaire selon la technologie choisie (plug-in à Wallbox, plug-in intégré, docking plongeant, etc.). Le dimensionnement des transformateurs est un compromis entre prix et flexibilité : un transformateur plus grand revient moins cher par véhicule mais réduit les possibilités de tension et de courant divers disponibles, compliquant ultérieurement un changement de fournisseur ou de technologie. Les variables de choix seront donc la technologie choisie, le prix et la flexibilité. De même, il est possible de séparer ou non le transformateur du dépôt, de séparer ou pas les redresseurs du dépôt. Ces choix devraient être faits aussi en fonction de l'espace à disposition et des normes de sécurité incendie. L'étude reprise par l'OFT effectuée au compte de la RBS-BSU [8] présente les avantages et inconvénients de chaque technologie de recharge et de diverses architectures. Ces détails sortent toutefois du cadre de ce projet.

En chargement dans le dépôt, la borne de recharge est estimée à 100'000 CHF [8].

2.3.2 Sur la chaussée

Sur la chaussée, les bornes de recharges pour la technologie OPC requièrent aussi parfois des transformateurs et des stations de chargement pouvant exiger jusqu'à 14 m². La recharge jusqu'à 450 kW exige une puissance de raccordement allant jusqu'à 500 kW, ce qui peut rendre plus intéressant d'avoir un accumulateur local, augmentant au passage la complexité du système. Ces stations aux terminus peuvent se révéler source de bruits gênants pour les riverains [8].

La borne de recharge OPC est estimée à 500'000 CHF [8].

2.3.3 Aux ateliers

L'adaptation des ateliers et la qualification des mécaniciens sont relevées dans le rapport recommandé par l'OFT [8]. Cette composante inclurait avant tout pour les t1 d'avoir des protocoles concernant les batteries. La gestion des bus électriques étant déjà maîtrisée par l'entreprise grâce aux trolleybus et prochainement au t1. Par exemple, la hauteur de 8 m de l'atelier ou encore les outils isolés font partie du quotidien des mécaniciens t1. Par contre, les batteries sont classifiées comme substance dangereuse et leur stockage et leur maintenance doivent être bien codifiés. Les constructeurs fournissent généralement des recommandations et des marches à suivre pour effectuer ce genre de tâches. D'autres mises en garde telles que le chargement des bus aux ateliers, et le travail sur un bus endommagé sont relevées par le rapport repris par l'OFT [8]. Un plus grand nombre de mécaniciens devraient potentiellement avoir de qualifications plus strictes quant à la gestion de tensions élevées.

Pour 50 bus, le prix de la modification d'un atelier standard est de 300'000 CHF [8].

2.3.4 Systèmes informatiques

Un système informatique pour la gestion de la recharge et son optimisation sera sans doute nécessaire. La diversité des technologies vendues par les différents constructeurs promet une complexité élevée pour de tels systèmes.

2.4 Plan et études de déploiement de réseaux ou de bus électriques dans d'autres villes

Une étude commandée par l'OFT à la Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du canton de Vaud montre que l'alternative électrique qui était déjà mentionnée dans des rapports du début du siècle, mais comme solution la moins convaincante, a remonté les échelons pour être ensuite considérée comme meilleure alternative à long terme dans des rapports des années 2009-2015. Depuis, les engagements pour électrifier les bus se sont multipliés sans pour autant que la réalité ne suive les objectifs fixés. Il est à noter que les régions qui commencent à passer à une transition ont souvent mis les moyens financiers pour y parvenir (Chine, Londres, etc.), ou ont commencé par des tests, comme les tpg (bus TOSA) ou les VMCV (ligne IMC) ou encore par les changements les moins contraignants comme les batteries de secours à la place de la génératrice dans les trolleybus chez les tpg et les tl. Entre temps les motorisations hybrides se sont montrées attractives avec des réductions de la consommation de l'ordre de 25-30% selon divers opérateurs (Seattle, New York, Bienne, Chaux-de-Fonds, Québec) [6].

Quant au choix technologiques l'étude de l'OFT déclare :

"Cette étude a toutefois démontré au travers d'une évaluation détaillée de technologies alternatives pertinentes sur cinq scénarios variés qu'il n'existe pas une seule solution universelle permettant de se passer du diesel, mais plusieurs solutions suivant les compromis choisis. Il faut considérer en effet chaque cas individuellement, notamment en raison des disparités locales propres à notre pays concernant la disponibilité des énergies, de leur coût, de la topographie, etc." (OFT, 2018, p.3) [6]

2.4.1 En Suisse

Plusieurs villes suisses imaginent déjà leur transition vers des réseaux de bus entièrement électriques.

Schaffhouse Les Verkehrsbetriebe Schaffhausen électrifient leur réseau grâce à la technologie OPC acceptée par le parlement en 2017 grâce à un partenariat avec le constructeur espagnol de bus Irizar [20]. Ce projet a été soumis au peuple en novembre 2019. Le projet de réseau de bus à recharge rapide (OPC) a été accepté par la population à 53.98%. [21]. En effet, toutes les lignes reviennent à la gare centrale où ils ont la place et le temps pour recharger. La gare se situe en aval ce qui est topographiquement favorable. Cette situation rend cette solution efficace et moins chère. Le projet se fait en trois étapes : la première, par la transformation de la ligne de trolleybus 1 en IMC, suivie du remplacement de 15 bus diesel par des bus électriques accompagné de la création de l'infrastructure finale nécessaire à la gare et enfin le remplacement du reste des bus. Le chargement se fait à 600 kW grâce à un pantographe monté sur le toit [20].

Zurich À Zurich, les Verkehrsbetriebe Zürich (VBZ) proposent une stratégie d'électrification où les bus de quartier sont électriques à batterie (ONC), les bus articulés sont hybrides ou en IMC et les doubles articulés sont des trolleybus classiques. Le réseau IMC zurichois se fera par un rallongement des lignes de contact de 20%, qui permettra de rallonger les lignes de 80%. Pour la technologie ONC utilisée pour les lignes de quartiers, l'entreprise zurichoise prévoit que l'adaptation des dépôts pour accueillir l'infrastructure de recharge est le principal changement [22]. Afin d'amorcer ce changement, l'entreprise a testé deux bus électriques (8 et 12 mètres) entre 2016 et 2018 sur 60'000 km transportant 150'000 passagers. Ces bus

ont eu quelques problèmes de jeunesse sans pour autant que l'expérience soit non concluante. Les mesures phoniques ont permis de remarquer une baisse du niveau sonore de 3 dB au plat, de 8 dB à la montée (pente de 8%) et jusqu'à 10 dB à la descente (pente de 8%). Les retours ont permis de fixer 2021 comme objectif d'électrification des lignes 35, 38, 39 et 73, et 2022 pour les lignes 66 et 78. Toutes ses lignes sont des lignes de quartier. Ces bus ONC sont capables d'effectuer 150 km. Les VBZ notent le problème du sous-dimensionnement qui met à risque l'assurance du service et du sur-dimensionnement qui augmente le prix total. L'entreprise considère donc d'accomplir plusieurs cycles de recharge par jour. Un chauffage d'appoint fossile est disponible pour les jours les plus froids de l'année. L'électrification des dépôts se fait un dépôt à la fois. Le système de gestion de charge et la planification de l'offre sont en cours d'être vus ou revus. Les VBZ souhaitent remplacer tous leurs trolleybus par des trolleybus à batterie en 2027, et développer ce réseau grâce à la technologie IMC. Certains bus sont déjà en service depuis 2019. Malgré leur expérience en trolleybus, une période de formation à la nouvelle technologie a été nécessaire pour la maintenance. Quant à la technologie OPC, l'entreprise la considère comme très complexe et chère. Elle redoute en particulier l'augmentation du temps requis aux arrêts et les réparations plus longues vu la jeunesse de la technologie. [10]

Lucerne Une étude commandée par les Verkehersverbund Luzern au cabinet Infras recommande de conserver les caténaires et d'essayer de préférence d'utiliser des bus en IMC. Des projets pilotes d'ONC pour les lignes urbaines sont recommandés tout en jugeant envisageable de tester l'option OPC. Dans tous les cas, l'étude propose de vérifier périodiquement la stratégie vu que le développement technique des diverses technologies en jeu est rapide [5]. Le rapport présente un calcul économique sur la durée de vie de l'exploitation des diverses technologies (12 ans) en se basant sur l'horaire 2018. De même, il présente une analyse de cycle de vie simplifiée pour chaque technologie qui confirme que les émissions dues au matériel roulant sont sensiblement plus significatives pour les bus électriques, alors que les émissions dues à l'utilisation du véhicule sont largement réduites. La réduction du bruit est constatée uniquement à moins de 50 km/h. Une estimation pour les lignes urbaines articulées donne une augmentation du coût annuel de 15 à 20% pour les options ONC, OPC et IMC pour un prix de diesel à 1.35 CHF/l. En agglomération, cette augmentation monte à 20 à 40% dans le même ordre ONC, OPC, IMC. Pour un autobus d'agglomération, l'ONC et l'OPC présente 15% de surcoût, l'IMC étant disqualifiée par manque de ligne de contact. Pour le midibus, le surcoût est de 30% pour l'ONC et l'OPC. Les analyses de cycle de vie dans les quatre cas montrent que l'IMC offre la plus grande réduction des émissions, devant l'OPC et finalement l'ONC. [5]

Berne-Soleure L'analyse faite sur la ligne 1 des BSU (bus articulé) a montré que 80% de bus supplémentaires sont nécessaires (en ONC) et que la solution n'est pas réalisable avec un chauffage électrique direct mais avec une pompe à chaleur lorsque le trafic n'est pas plus dense que la moyenne. Les résultats recommandent que 4 lignes se chargent en OPC et 5 en ONC. Pour les bus ONC, le nombre de bus par ligne doit être augmenté par rapport au diesel, ce qui se traduit par une expansion du parc de 24%. Le réseau sera entièrement électrifié en 3 étapes entre 2028 et 2036 [9]. Le prix total par bus incluant la batterie est de 800'000 CHF contre 450'000 CHF pour le diesel, alors que l'infrastructure de recharge est estimée à 6'819'000 CHF et la formation des collaborateurs, la gestion de projet de l'adaptation des ateliers est estimée à 1'741'000 CHF. Sans considérer l'élargissement du dépôt et les bus de réserve, le coût total est estimé à 38'341'000 CHF [9]. La puissance de recharge au dépôt BSU lorsque tout le réseau sera électrifié est estimée à 2,6 MW, cette valeur est atteinte vers 21h, lorsque les 46 bus chargent à une puissance de 150 kW. Un système optimisé réduit la charge maximale à 1,4 MW atteint entre 1h et 4h. La station de transmission (assurant la connexion au réseau, 14 m²) et le transformateur sont mis dans un bâtiment séparé du dépôt se trouvant au niveau du sol. Le système de recharge se fait en docking par pantographe plongeant. Les convertisseurs sont combinés avec les transformateurs et présentent 16 branchements par transformateur. Ces branchements sont regroupés en 4 permettant de recharger à 75 ou à 150 kW [9].

Saint-Gall Selon le directeur des transports publics saint-gallois, son entreprise souhaite avoir une flotte durable à 90% à l'horizon 2025. Afin d'y parvenir, l'entreprise a testé un midibus à batterie (ONC) et un trolleybus en IMC. Le choix de l'IMC tient au réseau déjà développé de lignes de contact dans Saint-Gall. Le directeur émet des doutes quant à l'exploitation d'une grande flotte de bus ONC dues à la grande demande que serait engendrée sur le réseau électrique et au travail requis au dépôt [23].

Genève Un système conducteur avec recharge aux arrêts et aux terminus a été imaginé par ABB en coopération avec les tpg, les SIG et l'Office de la promotion industrielle genevois. Ce système appelé TOSA est actuellement en service sur la ligne 23 des tpg [24]. Le système stocke de l'électricité à la station de recharge dans des batteries en courant continu, qui se situent tous les 3-4 arrêts et puis chargent directement la batterie du bus. Le système a requis l'installation de 13 arrêts à recharge flash sur les 50 de la ligne, de 3 bornes de recharge aux terminus, de 4 bornes de recharge aux dépôts pour 12 bus de 133 passagers. Les bus sont chargés de nuit dans le dépôt et au terminus. Ils rechargent jusqu'à 100%. À tout moment, le bus a la charge suffisante pour revenir au dépôt, la batterie conservant au minimum 60% de charge. La batterie étant de 38 kWh. Il faut remarquer que les batteries stationnaires aux arrêts doivent avoir le temps de se recharger entre les passages de bus consécutifs. [25][26][27][12] Selon une étude de 2013 sur la ligne 5 des tpg, une batterie de 68.6 kWh devrait être utilisée, la puissance à bord est de 200 kW, les 9 points de chargement sont à 200 ou 115 kW et 5 de ses stations sont équipées de stockage de 1 à 1,2 kWh à 50 kW. Pour cette installation et son exploitation, le prix est de 70'679'163 CHF dont 62% sont dus aux salaires pour une durée de vie de 30 ans. [27] La ligne 7 des tpg est prévue de passer en IMC [28].

Riviera vaudoise Les VMCV dans la Riviera vaudoise ont prolongé leur principale ligne de trolleybus vers le nouvel hôpital intercantonal du Chablais à Rennaz grâce à la technologie IMC [28]

Exemple théorique sur 5 cas suisses Une étude effectuée par la HEIG-VD pour l'OFT évalue pour 5 cas différents de bus la meilleure option : une ligne urbaine de très grande capacité et fréquence devrait être exploitée en trolleybus à batterie (IMC) ou en hybride diesel/électrique, une ligne urbaine principale à forte pente de grande capacité pourrait être exploitée en trolleybus à batterie (IMC) ou en OPC, une ligne de quartier de rabattement roulerait de façon optimale avec une motorisation hybride hydrogène/électrique ou du gaz naturel, éventuellement de l'électrique, une ligne régionale avec pente faible avec de l'ONC ou de l'hybride hydrogène/électrique, une ligne régionale qui présente de fortes pentes ne peut pas encore être électrifiée. [6]

2.4.2 À l'étranger

De plus en plus de villes et d'opérateurs de transports publics s'engagent dans une politique d'électrification des transports urbains au niveau mondial. Une motivation primaire pour ce mouvement est la poursuite d'objectifs de réduction de la pollution atmosphérique et sonore, comme à Londres, Berlin ou Paris [29] et le réchauffement climatique [30]. Londres vise un réseau de bus totalement électrifié en 2037, Berlin en 2030 (1'600 à 1'700 bus électriques prévus). En Allemagne, le nombre de bus purement électriques a été multiplié par 7 entre 2014 et 2018 à 140 bus, alors que pas loin de 400'000 bus électriques sillonnent actuellement les routes chinoises [29]. Du côté des opérateurs, une motivation supplémentaire vient de leurs objectifs de réduction de leurs émissions, principalement dues à leurs réseaux de bus [8]. Hochbahn à Hambourg en Allemagne présentait déjà 2 dépôts électrifiés, 30 bus électriques et 52 stations de recharge en 2019. Mainzer Mobilität (DE) prévoit de son côté de diviser son réseau entre purement électrique pour les bus effectuant moins de 200 km et des bus hydrogène sinon, tout en notant que le prix de l'hydrogène ne peut encore être fiablement estimé. En 2016, Göttigen (DE) prévoyait que l'électrification de 40% de son réseau était économiquement intéressante grâce à l'OPC. Movia au Danemark, prévoit un surcoût de 3-11% pour les bus électriques qu'elle prévoit reporter d'abord sur les autorités publiques qui verraient leur facture augmentée de 6-22% [29]. La recharge au terminus est actuellement exploitée à Mannheim en

Allemagne. Ce projet nommé Primove fonctionne avec des bus 12 m de Bombardier de 60 kWh chargeant à 200 kW de puissance [12]. Södertälje en Suède charge depuis 2016 un de ses bus Scania par induction au terminus (7 minutes à 200 kW) [6]. Hambourg ne commande plus que des bus électriques dès 2020 [7]. Esslingen (DE), Teplice (CZ), Salzburg (AT), Lyon (FR), Boston (US), etc. ont déjà commandé des bus IMC [28].

Selon une étude du bureau de conseil PWC, l'Allemagne comptait 154 bus électriques à batteries début 2019. D'ici 2025, 2'172 bus électriques à batterie devraient être mis en service dans ce pays. Entre 2025 et 2030, 2'003 bus électriques à batterie supplémentaires sont déjà planifiés. Malgré cet effort, la Clean Vehicles Directive (directive européenne) qui vise 45% respectivement 65% de nouveaux bus immatriculés "propres" d'ici 2025 respectivement 2030 ne sera pas atteinte, l'Allemagne comptant aux alentours de 40'000 bus². Ces données confirment ainsi la croissance du marché du bus à batterie. Le chargement de ces véhicules se fera à 49,3% en ONC et à 50,7% en OPC. 66,2% des chargeurs prévus sont des bornes plug-in, 26,1% des stations docking et 7,7% par induction [4].

Le marché des batteries Li-ion est prévu de quadrupler entre 2017 et 2025 selon une étude de l'ISTEA de la RWTH Aachen en 2019 [32]. Avec ce scénario, l'étude arrive à un prix de 150\$/kWh. Selon cette étude :

"L'optimisation des systèmes de batteries et du design des cellules n'est encore qu'au début et va sûrement être un critère déterminant de choix entre les constructeurs lors d'appels d'offres" (Sauer, 2019, slide 18, traduction libre depuis l'allemand) [32].

2.5 Financement et risques liés aux bus électriques

Un sondage effectué par la commission transports d'agglomération de l'Union des transports suisses (UTP) montre que les douze opérateurs interrogés s'accordent à prévoir une augmentation de la charge financière due à l'électrification. Certains prévoient de 5 à 20 % annualisés quand d'autres imaginent des prix d'achat de bus allant jusqu'au double. Cette notable divergence des chiffres témoigne des particularités des réseaux et de la nouveauté du déploiement de ces technologies à pareille échelle [33]. Cette inexorable augmentation des prix est due au prix des bus, de l'infrastructure de recharge, aux modifications des ateliers, à la formation des collaborateurs et au coût de la planification et du management du projet.[8].

Les divers plans d'électrification de diverses villes et divers opérateurs font émerger une constante : une volonté politique de financement des coûts d'investissement semble requise. Une déclaration de l'Union internationale des transports publics (UITP) va dans ce sens. Malgré le développement des voitures privées électriques, les transports publics restent plus écologiques. L'UITP demande un soutien financier et politique pour la transition énergétique des entreprises de transports publics [34]. L'Union des villes suisses et l'Union des transports publics se positionnent aussi en faveur des subventions [35]. Les appels des entreprises publiques à réduire les réductions et rétrocessions sur les carburants fossiles et à encourager davantage les technologies électriques permettraient de rendre la technologie électrique plus attractive [6][30]. Ainsi, les prix et subventions actuellement appliqués seront sans doute appelés à évoluer dans les prochaines années.

Les principaux risques relevés sont :

- Le prix des carburants, qui reste l'une des plus grandes inconnues [8].
- Le manque de standardisation des pièces [6].
- L'évolution des réseaux de bus [6].
- Le recyclage des batteries [6] [15].
- La législation notamment en matière de protection des produits dangereux [6].

2. La directive considère les véhicules hybrides comme "propres" aussi [31]

2.6 Modélisations de l'électrification dans la littérature

2.6.1 Modélisation de la consommation dans la littérature technique

Une étude réalisée par le bureau d'ingénieur allemand VerkehrsConsult Berlin-Dresden pour la BSU et le RBS, reprise par l'Office fédéral des transports [8] met l'accent sur l'importance de réaliser un travail ligne par ligne pour évaluer les besoins :

"L'examen de chaque ligne est l'étape la plus importante pour déduire des recommandations pour l'électrification par étape de la flotte de bus, puisque les prescriptions pour toutes les prochaines étapes y seront basées." (VerkehrsConsult Berlin-Dresden, 2019, page 42, traduction libre depuis l'allemand) [8].

La majorité des études des prestataires de transports publics suisses citées dans la section 2 dimensionne les batteries de bus ONC ou OPC ou l'emplacement des bornes de recharge OPC ou fait des analyses comparatives des technologies. Elle fait des choix basés sur des principes généraux, des valeurs de référence ou sur des analyses multicritères.

Par modélisation Il est donc nécessaire d'analyser en détail toutes les lignes du réseau de bus en utilisant des données réelles et simulées qui permettent d'identifier les meilleurs concepts de chargement et d'exploitation. L'étude recommandée par l'OFT utilise les données suivantes : les lignes du réseau, l'horaire, les vitesses moyennes et maximales, la distance entre les arrêts, le nombre de passagers, l'accélération, la position et l'altitude des arrêts, le type de véhicule, les données sur les retards et les dérangements, le développement futur du réseau, les possibilités d'intégration dans l'espace public et le temps aux arrêts, aux terminus et aux dépôts. En plus de la consommation de traction, une partie non négligeable est due au confort thermique. La consommation des bus est essentielle pour dimensionner correctement la capacité des batteries [8].

Afin de dimensionner la batterie du bus, l'étude d'Infras pour les Verkehrsverbund Luzern citant une étude des Verkehrsbetriebe Zürich, prévoient 20% de diminution des capacités due au vieillissement, 10-20% de la capacité qui ne peut être déchargée et enfin 10% de réserve opérationnelle [5]. Il est à noter que la capacité totale et la capacité disponible de la batterie sont souvent données par le constructeur. L'étude de l'OFT [8] accepte un état de charge maximal respectivement minimal à 90% respectivement 10% de la capacité de la batterie.

Par données réelles Le retour des VBZ se base sur des données de tests. Il indique une consommation comprise entre 0.7 et 0,9 kWh/km en moyenne sur les lignes où le bus de 8 m circule. La consommation montait jusqu'à 2.5 kWh/km en fonction des tronçons et de la charge de passagers. Les tests ont aussi mesuré que le chauffage purement électrique direct consommait jusqu'à 2.1 kWh/km, doublant la consommation totale du bus [10], ce qui corrobore les données des trolleybus tl.

Par cycles standardisés Les efforts d'électrification ont déjà mené à l'établissement de cycles comparatifs de batteries et de consommation de bus électriques. Le projet E-sort de l'UITP permet de comparer ces deux aspects avec une procédure standardisée. Il est à noter que cette procédure ne prend pas en compte le chauffage/refroidissement et n'est pas encore sensibilisée aux conditions météorologiques. Le bus est chargé à mi-capacité et effectue un circuit de test ne présentant aucun nid-de-poule, aucune section surélevée et des pentes uniquement inférieures à 1,5%. Ce test permet de comparer les véhicules entre eux et essaie de fournir une base de comparaison avec des bus diesel [13]. Il ne donne toutefois pas des données exploitables pour dimensionner un réseau.

2.6.2 Modélisation de l'électrification des bus dans la littérature scientifique

Dans le projet myTosa, Scarinci, Zanarini et Bierlaire [25] introduisent un modèle de prédiction de la consommation. Il sera utilisé lors d'une série de simulations sur une même ligne de bus. Chaque véhicule a un nombre maximal de passagers et sera rempli au fur et à mesure par des personnes de masse aléatoire selon un modèle de distribution de masse de la population. De même, l'accélération maximale et diverses consignes d'accélération seront définies en fonction du conducteur : elles présentent toutefois toutes une forme trapézoïdale. Pour chaque tronçon, une vitesse maximale et une charge de trafic sont estimées. L'horaire, les lignes de bus et les arrêts sont repris de l'horaire officiel. La fréquentation de la ligne est simulée avec des paramètres variables à plusieurs reprises. Le nombre d'accélérations entre les arrêts est fonction du type de routes et la consommation énergétique est calculée à travers deux modèles différents. La consommation est due à deux contributions différentes : la traction (en kWh/km) et les auxiliaires (chauffage, refroidissement, etc. en kWh par unité de temps). L'énergie de traction est interpolée en fonction de l'accélération, de la pente, la vitesse, le nombre de passagers, l'état de charge et de la température à partir de données calculées par plusieurs modèles nanoscopiques. L'interpolation a été choisie comme une régression polynomiale. Un test entre le premier et le cinquième degré a permis de définir le degré qui approxime le mieux les données collectées. Le nombre d'arrêts intermédiaires le long du trajet est estimé grâce au nombre d'intersections par km selon le type de route des cartes genevoises. Une distribution statistique est ensuite assignée à chaque type de route. La principale limite de ce modèle est qu'il n'identifie pas les différents types d'arrêts intermédiaires : feux rouges, passages piétons, etc.

Kunith, Mendelevitch, Kuschmierz et Goehlich [36][37] soulignent aussi les critères de prédiction de la consommation comme la masse du véhicule, la topographie, le rendement et la température. Ils relèvent aussi la complexité liée au chauffage qui influe fortement sur la consommation des bus électriques. Idéalement, l'étude souhaitait prendre des données de consommation réelles relevées par acquisition, mais relève la rareté des données réelles chez les entreprises de transports publics. Un modèle est donc créé : pour chaque distance entre deux arrêts consécutifs, les caractéristiques telles que la vitesse sont notées, afin de créer un profil de conduite. Une correction de cette vitesse le long du parcours du bus est faite en fonction du trafic. Le modèle va utiliser la norme DIN 70030 pour prédire la consommation d'énergie. La force de traction se compose de la résistance de l'air (frottement dynamique), la résistance de roulement (frottement statique), la résistance à la gravité et l'accélération. Trois types de bus sont retenus dans l'étude : les autobus (12 mètres), les autobus articulés (18 mètres) et les bus à étage. L'étude présente les valeurs prises pour chacun de ses coefficients. Avec ces données, la force de traction est obtenue. Elle est multipliée par la distance parcourue et divisée par l'efficacité, avant de rajouter la consommation des auxiliaires, et puis ajustée par un facteur correctif pour le trafic. La consommation des auxiliaires est définie sur une journée en fonction d'une température constante. Cette méthode est utilisée pour le réseau des BVG (Berlin, DE) composé de 16 lignes. Le modèle utilisé pour dimensionner l'infrastructure de recharge OPC sera utilisé que pour un jour de semaine hivernal. Une dimension de batterie est sélectionnée pour assurer le service. Le nombre de bornes de recharge est déterminé. Et ensuite, le prix total d'installation est calculé : le prix d'un bus sans batteries, le prix de la batterie au kWh et le prix du transformateur et de la borne de recharge et des travaux de son installation sont ajoutés. Cette étude prend en considération que les prix d'installation, et inclut aussi la mise en commun des stations de transformation et des bornes de recharge en définissant les intersections du réseau. Le problème est résolu par minimisation du prix d'infrastructure. Il sera sensibilisé sur la puissance de chargement, les marges d'état de charge de batteries et la température extérieure.

Vepsäläinen, Kivekäs, Otto, Lajunen, Tammi [38] développent un modèle pour prédire la consommation des bus électriques lors de simulations. Cette étude s'aligne avec les autres sur la nécessité que le calcul ne soit pas très exigeant en puissance computationnelle afin de permettre des résultats rapides pour effectuer une multitude de scénarios sur une même ligne. Le modèle créé présente des écarts de moins de 0.1% avec des données réelles. Les données les plus importantes pour ce modèle sont la longueur de la ligne de bus,

le nombre d'arrêts, l'altitude, la densité du trafic et le style de conduite. Le modèle créé est implémenté sur Matlab Simulink. Ce modèle est intéressant, car il prend en considération la vitesse du vent et l'impact des conditions de pression et de température sur la densité de l'air. Il simule aussi le vieillissement de la batterie grâce à un circuit électrique équivalent. La validation des résultats est faite par confrontation à des données réelles collectées à Espoo (FI).

Gao, Guo, Ren, Zhao, Ehsan et Zheng [39] s'intéressent plutôt aux coûts d'opération d'un réseau de bus ONC. Ils identifient les facteurs suivants comme principales raisons de variations de la consommation journalière des bus : le jour considéré (week-end, semaine), les conditions météorologiques (température, smog, pluie) et l'utilisation de la climatisation. L'algorithme va utiliser des données réelles pour créer des corrélations entre les différents paramètres, afin d'avoir une consommation représentative de différentes journées. Ces données seront toutefois utilisées pour planifier plus judicieusement la gestion de la recharge de la batterie de bus.

Sebastiani, Lüders et Fonseca [40] proposent un modèle qui utilise les données GPS des bus diesel actuels : les accélérations et décélérations sont donc considérées comme identiques. L'étude souligne l'augmentation de la consommation avec le nombre de feux de circulation. Pour chaque feu, une probabilité d'arrêt est assignée (entre 32 et 45%) selon les données réelles. Ceci a permis l'amélioration du modèle de prédiction de la consommation. Le maintien des horaires par les bus est jugé primordial pour conserver la part modale de ce moyen de transport. Le modèle développé sur Matlab est utilisé sur 6 lignes de bus de Curitiba (BR).

Sinhuber, Rohlf et Sauer [41] proposent un modèle prédictif de la consommation en se basant sur des données de services de cartographie en ligne. La consigne d'accélération est constante à la décélération, mais évolue à l'accélération depuis une valeur constante à une autre valeur avec un changement presque linéaire. Le modèle utilisé par cette étude, appliqué à une ligne de bus de Hürth (DE), s'est montré très fidèle aux données réelles relevées.

Xylia, Leduc, Patrizio, Silveira et Kraxner [42] développent un système plus automatisé de prédiction de la consommation. Le programme est utilisé pour les 526 lignes de bus circulant dans l'agglomération de Stockholm en Suède. D'abord les données des lignes sont acquises, ensuite les trajets sont reconstruits, puis une minimisation des coûts ou de l'énergie totale est faite, enfin la position des stations de recharge OPC est spécifiée. La recharge en station est calculée grâce à la puissance disponible et le temps à l'arrêt. Si l'énergie potentiellement rechargée à un arrêt est suffisante, alors une borne de recharge est installée. Le projet ne souhaitant pas nécessairement électrifier toutes les lignes, si l'énergie chargée n'est pas suffisante, la ligne de bus n'est pas électrifiée.

Conti, Orchi, Valentini, Nigro et Calò [43] présentent un modèle pour évaluer les solutions d'électrification pour transports publics pour l'ENEA en Italie. Elles évaluent trois options : la recharge de nuit ONC, la recharge au terminus OPC et la recharge flash en cours de trajet OPC. La recherche de solutions faisables se fait ligne par ligne et en quatre étapes : estimation de la consommation et des émissions, dimensionnement de l'infrastructure de recharge incluant à bord, comparaison économique de la solution électrique à la solution diesel quant aux coûts, calcul des externalités en particulier les effets sur le bruit et la santé publique. La consommation se base sur des données de consommation théoriques développées dans un modèle de l'Université de L'Aquila. Les solutions infaisables sont exclues et les solutions de chargements sont toujours dimensionnées au maximum pour assurer le service. L'analyse économique prend en compte les coûts des investissements initiaux, des remplacements de batteries et d'équipements, le coût de l'énergie, la maintenance et la valeur résiduelle à la fin de l'étude. Le modèle a été testé sur cinq lignes de bus de Rome (IT). Le cas utilisé est confronté à une analyse de sensibilité sur le prix de la technologie la moins mature (OPC), sur la durée de vie des batteries et le prix de l'énergie.

Wei, Liu, Ou et Fayyaz [44] incluent dans leur optimisation la transition graduelle vers l'électrique et la combinaison des technologies ONC et OPC. La mise en service échelonnée des bus électriques se fait par

une introduction chaque année d'un nombre prédéfini de nouveaux bus électriques. L'étude ne s'intéresse toutefois pas à la consommation, mais s'assure que tout bus soit chargé dès qu'il atteint son autonomie kilométrique.

Andersson [45] évalue les dimensionnements des stations de recharge OPC aux terminus des lignes de bus de Västerås en Suède, le but étant de minimiser le coût en incluant l'optimisation entre batterie stationnaire et frais de connexion au réseau plus puissante. L'étude penche pour une amélioration de la connexion au réseau, comme cet investissement est pour 40 ans. L'étude favorise aussi les batteries LTO au LFP, puisqu'elles peuvent être davantage sollicitées (plus faible charge résiduelle). L'étude présente plusieurs caractéristiques de diverses technologies de batteries. Le prix des batteries est estimé à 8500 SEK/kWh soit 838 CHF/kWh. La consommation est prise à 2.3 kWh/km, se basant sur une estimation du constructeur Volvo. Cette étude confirme que la normalisation des chargeurs est en cours, même si l'industrie n'a pas encore suivi les normes. Il est cependant confirmé que le chargeur au terminus est moins cher qu'en cours de ligne.

Wang, Huang, Xu et Barclay [46] montrent la possibilité de réduire le coût grâce à la réduction des dimensions de l'infrastructure de recharge. Cet objectif est principalement atteint par la réduction du nombre de chargeurs. L'étude affirme qu'il est réaliste de considérer que la durée de recharge est proportionnelle à la durée de chargement. Cette étude minimise le coût de l'infrastructure de recharge sans pour autant se soucier de l'impact sur le prix d'investissement et d'exploitation de bus. Le modèle est testé sur la ville de Davis en Californie (US) en utilisant AMPL. L'analyse de sensibilité se fait sur l'autonomie du bus, la durée des trajets, la durée des recharges, l'état de charge en début de service et le modèle de facturation de l'électricité.

Rogge, van der Hurk, Larsen et Sauer [47] suggèrent que le problème lié à l'assignation de bus peut être repris d'un modèle traditionnel d'assignation de bus auquel on ajoute une autonomie au bus. Ceci découle en particulier de la focalisation de l'étude sur la technologie ONC, Daimler et de MAN affirmant leurs souhaits de se concentrer sur cette technologie. Ils remarquent aussi que cette technologie implique un autre processus de planification des trajets par rapport à la technologie OPC, qui a l'avantage de conserver le caractère optimal des processus d'assignation des bus diesel actuels. Le calcul de coût estime le coût temporel d'exploitation des bus et rajoute à chaque assignation nouvelle de bus un temps de service (aller-retour au dépôt) qui permet de mieux estimer le coût de rajout d'un bus et d'estimer le coût du personnel. Il est à noter que la solution d'assignation de bus quoique mathématiquement bien élégante, ne peut être résolue même pour des cas simples. Les calculs s'adaptent donc pour contrer ses limites : un traitement des données est effectué avant l'algorithme d'optimisation. Ce traitement à l'avantage d'être automatisé : les lignes de bus sont automatiquement générées sur openstreetmap par exemple. Le modèle se divise en trois étapes : d'abord, la minimisation du nombre de bus, ensuite, l'optimisation de la charge et enfin, le calcul du coût total. Le modèle de consommation utilise les données de la durée, la vitesse moyenne, la charge de passagers et la pente de la route reprises de l'étude de Sinhuber, Rohlf et Sauer [41]. Afin d'obtenir une solution optimale, plusieurs scénarios sont générés puis évalués par un algorithme génétique. Ce modèle est implémenté sur soit trois lignes de bus de la ville allemande d'Aix-la-Chapelle, soit une ligne de la ville danoise de Roskilde [47].

3 Méthodologie

Cette section introduit le modèle de consommation développé pour ce projet (section 3.1). Il sera utilisé pour identifier les possibilités d'électrification de chaque ligne, l'infrastructure nécessaire à ce changement et la consommation de la ligne. Puis, le modèle d'optimisation des choix technologiques et des années de transition est exposé (section 3.2). Enfin, l'implémentation du modèle au cas des transports publics lausannois est présentée (section 3.3).

3.1 Modèle de consommation

Un modèle de consommation est développé afin d'évaluer les besoins énergétiques et la faisabilité des technologies de bus pour chaque ligne. La maille du modèle est un trajet entre deux arrêts officiels des tl.

Ce modèle de consommation combine deux modules :

- Un module newtonien qui permet de déterminer l'énergie de traction en fonction de l'accélération, de la pente et de la masse du véhicule (section 3.1.1).
- Un module statistique qui permet de déterminer l'énergie de chauffage, de refroidissement et des auxiliaires en fonction de la température extérieure. Ce module se base sur des données relevées et/ou simulées sur un trolleybus tl durant plusieurs années (section 3.1.2).

Le modèle ainsi obtenu permet de déterminer grâce à la pente, la fréquentation, la vitesse et la température extérieure la consommation d'un bus le long de son parcours et à ses terminus.

Quelques adaptations permettent d'intégrer les deux modules, de les adapter aux données des tl et d'intégrer un modèle de prédiction d'arrêt (section 3.1.3). Ce modèle est confronté aux données d'un test d'autobus électrique de 12 mètres testé à Lausanne (section 3.1.4).

3.1.1 Module de traction et récupération

Le modèle de traction réduit le bus à un point matériel se mouvant suivant une direction. Il est donc possible d'appliquer la seconde loi de Newton et de déterminer ainsi la force de traction moyennant une modélisation de l'accélération souhaitée.

À partir de l'expression de cette force, le travail (c'est-à-dire l'énergie) peut être calculé pour la traction et pour la potentielle récupération d'énergie.

Hypothèses et modèle de Newton Quelques hypothèses sont faites afin de pouvoir établir les équations du mouvement :

- Le bus est considéré comme un point matériel de masse m .
- Entre deux arrêts, le bus suit une ligne droite de pente α .
- Le frottement statique est proportionnel à la force normale N par le coefficient de frottement statique μ_s .
- Le frottement aérodynamique est dû à la vitesse du véhicule, il est affecté par la densité de l'air ρ , le coefficient de pénétration du bus dans l'air c_f , la surface du bus A et la vitesse du bus.

Il en résulte un bus qui subit cinq forces (voir figure 2) :

- la force de gravité \vec{g} ;
- la réaction normale du sol N ;
- le frottement statique dû à l'interface pneu-sol F_s ;
- le frottement aérodynamique dû à l'interface bus air F_a ;
- la force de traction et de freinage F , qui permet au véhicule de maintenir une accélération consignée.

En appliquant la deuxième loi de Newton selon le repère bidimensionnel orthogonal $(O, \vec{e}_x, \vec{e}_y)$, les équations 1 et 2 sont obtenues.

$$F - \mu_s N - mgsin(\alpha) - \frac{1}{2}\rho c_f A \dot{x}^2 = m\ddot{x} \quad (1)$$

$$N - mgcos(\alpha) = m\ddot{y} \quad (2)$$

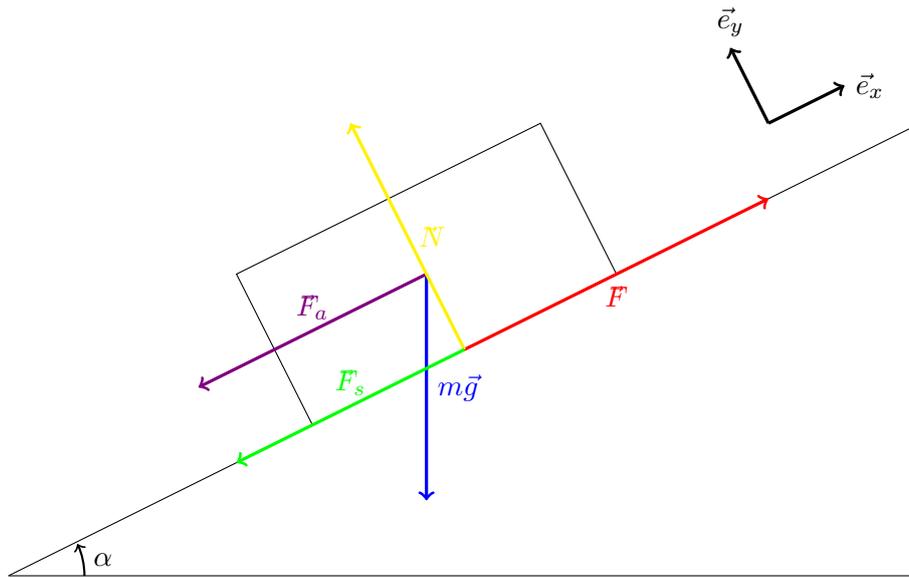


FIGURE 2 – Modèle newtonien de traction du véhicule. La force de traction F permet au véhicule de compenser la gravité g et les frottements F_s et F_a .

Pour assurer l'adhérence du bus au sol, l'accélération selon l'axe \vec{e}_y est nulle en d'autres termes $\ddot{y} = 0$. Conséquemment, il est possible d'exprimer les forces normale N et de traction-freinage F comme suit :

$$N = mg \cos(\alpha) \quad (3)$$

et

$$F = m\ddot{x} + mg\mu_s \cos(\alpha) + \frac{1}{2}\rho c_f A \dot{x}^2 + mg \sin(\alpha) \quad (4)$$

La force de traction-freinage assure l'accélération-décélération ($m\ddot{x}$), compense ou profite du frottement statique ($mg\mu_s \cos(\alpha)$), compense le frottement aérodynamique ($\frac{1}{2}\rho c_f A \dot{x}^2$) et compense ou profite de la gravité ($mg \sin(\alpha)$).

Les données de coefficient de frottement, de pénétration dans l'air, de densité d'air et de section utile du bus sont issues de la littérature [38].

Consigne d'accélération, vitesse moyenne et vitesse maximale Pour pouvoir modéliser la force F , une consigne d'accélération \ddot{x} est requise. L'hypothèse d'une accélération constante jusqu'à atteindre une vitesse souhaitée est faite (profil trapézoïdal). Ce profil d'accélération doit toutefois garantir la vitesse moyenne sur le tronçon.

Il en résulte la consigne d'accélération suivante :

$$\ddot{x} = \begin{cases} a & \text{si } 0 \leq t < \Delta t \\ 0 & \text{si } \Delta t \leq t < \Delta T - \Delta t \\ -a & \text{si } \Delta T - \Delta t \leq t < \Delta T \end{cases} \quad (5)$$

avec ΔT la durée totale entre deux arrêts complets du bus et Δt la durée de l'accélération et de la décélération.

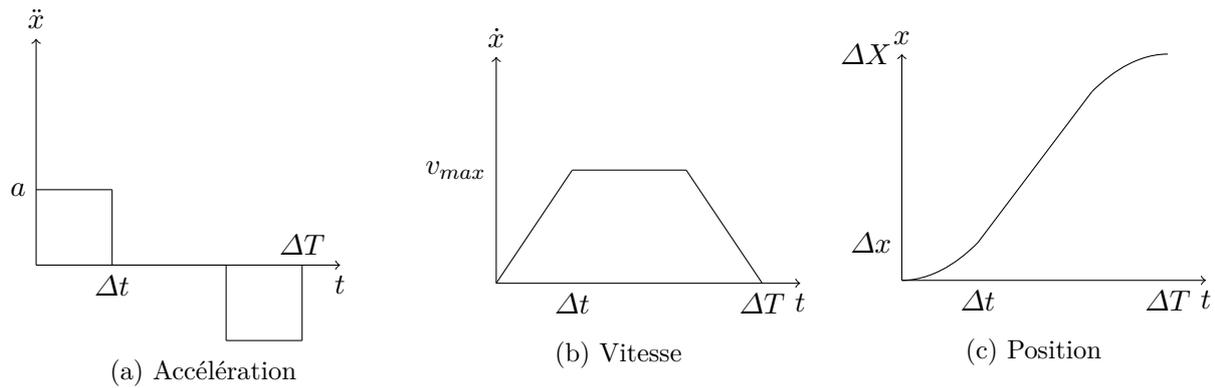


FIGURE 3 – Profil d'accélération, de vitesse et de position selon le modèle choisi.

Ceci permet d'avoir la vitesse suivante, où v_{max} est la vitesse maximale atteinte sur le cycle :

$$\dot{x} = \begin{cases} at & \text{si } 0 \leq t < \Delta t \\ a\Delta t = v_{max} & \text{si } \Delta t \leq t < \Delta T - \Delta t \\ a\Delta t - a[t - (\Delta T - \Delta t)] = a(\Delta T - t) & \text{si } \Delta T - \Delta t \leq t < \Delta T \end{cases} \quad (6)$$

Or la vitesse moyenne par tronçon est connue (v_{moy} ou \tilde{x}), et comme la consigne de vitesse (équation 6) permet de calculer une vitesse moyenne, le nombre d'inconnues peut être réduit. En effet, la vitesse moyenne \tilde{x} s'écrit :

$$\tilde{x} = \frac{\frac{1}{2}v_{max}\Delta t \cdot 2 + v_{max}(\Delta T - 2\Delta t)}{\Delta T} \quad (7)$$

Après simplifications, cette équation devient :

$$\tilde{x} = v_{moy} = v_{max}\left(1 - \frac{\Delta t}{\Delta T}\right) \quad (8)$$

Et comme $v_{max}=a\Delta t$, il est possible de déduire une relation entre Δt et ΔT :

$$\Delta t = \frac{\Delta T - \sqrt{\Delta T^2 - 4\frac{v_{moy}\Delta T}{a}}}{2} \quad (9)$$

La position x peut aussi être déterminée (équation 10). Elle sera utile pour les calculs d'intégrales pour déterminer la consommation.

$$x = \begin{cases} \frac{at^2}{2} & \text{si } 0 \leq t < \Delta t \\ at\Delta t - \frac{a\Delta t^2}{2} & \text{si } \Delta t \leq t < \Delta T - \Delta t \\ -\frac{at^2}{2} + a\Delta T t - \frac{a\Delta T^2}{2} + a\Delta T\Delta t - a\Delta t^2 & \text{si } \Delta T - \Delta t \leq t < \Delta T \end{cases} \quad (10)$$

Consommation de traction et énergie récupérée En ayant ainsi défini la force de traction-freinage et l'accélération, il est possible de calculer le travail de cette force sur la distance parcourue.

$$W = \int F\delta x \quad (11)$$

Comme cette force est composée de quatre composantes qui s'additionnent (accélération, frottements, gravité) et que la récupération est possible, il est raisonnable de calculer chacun des composantes séparément.

De même, puisque l'accélération présente trois périodes (positive, nulle, négative), il est judicieux de calculer le travail de la force de traction-décélération due à l'accélération séparément pour chacune de ces périodes.

$$W_{acc,pos} = \int_{x_a}^{x_b} ma\delta x = ma\Delta x \quad (12)$$

$$W_{acc,nulle} = \int_{x_b}^{x_c} m \cdot 0\delta x = 0 \quad (13)$$

$$W_{acc,neg} = \int_{x_c}^{x_d} -ma\delta x = -ma\Delta x \quad (14)$$

$$W_{frot} = \int_x mg\mu_s \cos(\alpha)\delta x = mg\mu_s \cos(\alpha)\Delta X \quad (15)$$

$$W_{aero} = \int_x \frac{1}{2} \rho c_f A \dot{x}^2 \delta x = \frac{1}{2} \rho c_f A \int_x \dot{x}^2 \delta x = \frac{1}{2} \rho c_f A \left(\frac{a\Delta x^2}{2} + a^2 \Delta t^2 \Delta X + 2a^2 (\Delta T - \Delta t) \Delta x - a\Delta x (2\Delta X - \Delta x) \right) \quad (16)$$

$$W_{grav} = \int_x mg \sin(\alpha) \delta r = mg \sin(\alpha) \Delta X \quad (17)$$

On obtient ainsi la consommation sans récupération $C_{cons,src}$, qui n'inclut donc que les termes positifs du travail de la force de traction-freinage :

$$C_{cons,src} = ma\Delta x + mg\mu_s \cos(\alpha)\Delta X + \xi mg \sin(\alpha)\Delta X + W_{aero} \quad (18)$$

avec

$$\xi = \begin{cases} 0 & \text{si } \sin(\alpha) < 0 \\ 1 & \text{si } \sin(\alpha) \geq 0 \end{cases}$$

La part récupérée est une proportion q de l'énergie négative dans les équations du travail (équations 12 - 17).

$$C_{recup} = q[(\xi - 1)mg \sin(\alpha)\Delta X + ma\Delta x] \quad (19)$$

Conséquemment, la consommation totale sur un cycle (de vitesse nulle à vitesse nulle) est exprimée par :

$$C_{cons,cyc} = C_{cons,src} - C_{recup} \quad (20)$$

Ce qui permet d'obtenir la consommation kilométrique de traction(-freinage) c_t :

$$c_t [kWh/km] = \frac{n \cdot C_{cons,cyc}}{d} \quad (21)$$

où n est le nombre de cycles sur le tronçon de longueur d .

3.1.2 Module de consommation du confort thermique et des auxiliaires

En sus de la traction, le véhicule a besoin d'assurer certaines charges nécessaires pour assurer le confort et le bon déroulement de la course de bus :

- Le confort thermique l'hiver : le chauffage d'un bus peut se faire électriquement grâce à une résistance ou une pompe à chaleur.
- Le confort thermique l'été : le refroidissement d'un bus électrique est également électrique.

- Les équipements auxiliaires en particulier l'éclairage, l'information-passagers et les systèmes embarqués des bus.

Les transports lausannois ont effectué des relevés sur la consommation d'un trolleybus articulé à Lausanne sous un mandat de l'Office Fédéral des Transports (OFT) et en collaboration avec diverses entreprises et institutions. Ces relevés pluriannuels montrent par poste de dépense les moyennes mensuelles de consommation kilométrique. Les données mensuelles permettent de reconstituer la consommation par poste selon la température extérieure (figure 4).

Les données des postes thermiques et auxiliaires d'intérêt permettent d'établir un modèle qui relie consommation de chaque poste à la température ambiante.

L'extrapolation polynomiale d'ordre 2 semble suivre le mieux la consommation des postes de chauffage et de refroidissement. Cet ordre d'extrapolation est d'ailleurs en ligne avec la thermodynamique, le transfert de chaleur s'exprimant au deuxième ordre de la température ambiante, comme suit.

L'équation du transfert de chaleur s'écrit [48], avec \dot{m} le flux de réfrigérant et c_c sa capacité thermique :

$$\dot{Q}^+ = \frac{\dot{m}c_c(T_H - T_C)}{COP} \quad (22)$$

Or le coefficient de performance maximal (COP) en chauffage est, selon le deuxième principe de thermodynamique, une fonction des températures du réservoir chaud (T_H) et du réservoir froid (T_C) [48] :

$$COP_{max,chauffage} = \frac{T_H}{T_H - T_C} \quad (23)$$

En refroidissement, le coefficient de performance maximal s'écrit [48] :

$$COP_{max,refroidissement} = \frac{T_C}{T_H - T_C} \quad (24)$$

Or, l'intérieur du bus est le réservoir chaud en cas de chauffage et le réservoir froid pour le refroidissement. Ainsi la température atmosphérique T_{atm} est notée T_C en cas de chauffage et T_H en cas de refroidissement. Il en résulte que l'équation 22 peut s'écrire comme suit :

$$\dot{Q}_H^+ = \frac{\dot{m}c_c(T_H - T_{atm})}{\frac{T_H}{T_H - T_{atm}}} = \dot{m}c_c \frac{T_{atm}^2 - 2T_{atm}T_H + T_H^2}{T_H} \quad (25)$$

$$\dot{Q}_C^+ = \frac{\dot{m}c_c(T_{atm} - T_C)}{\frac{T_C}{T_{atm} - T_C}} = \dot{m}c_c \frac{T_{atm}^2 - 2T_{atm}T_C + T_C^2}{T_C} \quad (26)$$

On peut donc conclure que l'énergie utilisée par le chauffage et le refroidissement est une fonction quadratique de la température extérieure (ou atmosphérique), confirmant ainsi l'observation faite à partir des données des tl.

Quant à la consommation des auxiliaires, elle est considérée comme indépendante de la température, ce qui semble être le cas aussi dans les données des tl.

Le graphique 4 montre le modèle en comparaison avec les valeurs de l'étude.

Le modèle polynomial utilisé peut être écrit sous la forme :

$$\dot{Q}^+ = aT^2 + bT + c \quad (27)$$

Les constantes sont récapitulées dans le tableau 1.

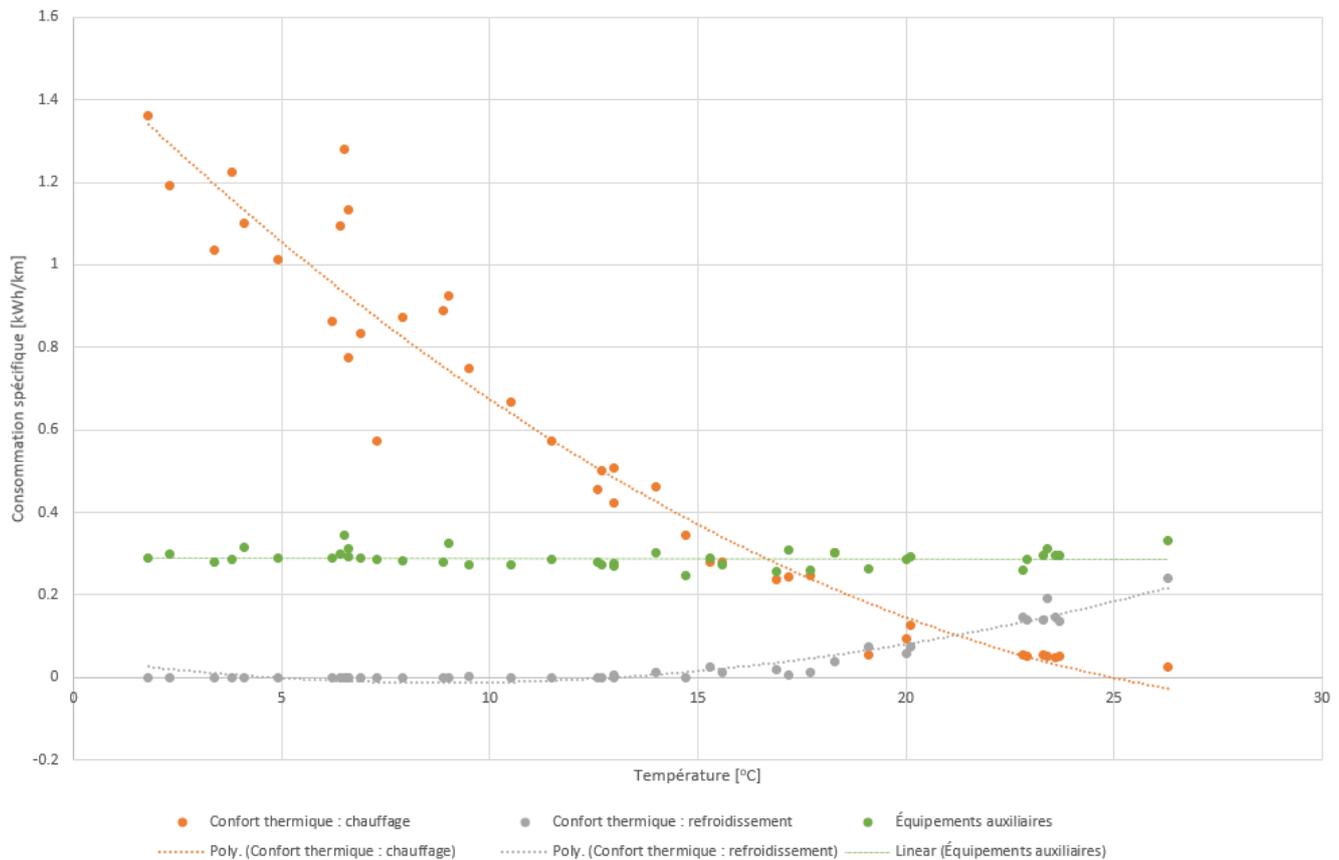


FIGURE 4 – Résultats du modèle de consommation spécifique en fonction de la température comparés aux données réelles.

TABLEAU 1 – Paramètres du modèle de consommation spécifique thermique et auxiliaires.

Poste de consommation	Paramètres		
	a	b	c
Chauffage	0.001561	-0.09969	1.515
Refroidissement	0.0007598	-0.01352	0.04712
Auxiliaires	-	-	0.2889

3.1.3 Adaptation du modèle aux cas réels

Les deux modules ainsi obtenus permettent d'avoir un modèle de la consommation spécifique d'un bus. Néanmoins, certains paramètres requièrent des ajustements :

- L'altitude des arrêts, qui permet notamment de déterminer la pente α .
- Les paramètres : durée de cycle ΔT et durée d'accélération et de décélération Δt et consigne d'accélération a .
- Le bus consommant même à l'arrêt pour le chauffage/refroidissement, pour la résistance et pour les auxiliaires, une conversion des unités en kWh/km en kWh/minutes à l'arrêt est nécessaire.
- La masse du véhicule et la température extérieure doivent encore être fixées.
- Le modèle thermique ne propose pas de température maximale respectivement minimale pour l'arrêt du fonctionnement du chauffage respectivement du refroidissement.

- Les horaires des véhicules étant donnés en minutes, certains tronçons ont une durée de 0 minute dans les données.

Acquisition des altitudes et du type de route L'altitude des arrêts de bus permet de définir les pentes effectuées à chaque tronçon. Ces données d'altitude ainsi que la position des arrêts, selon le système de coordonnées suisses, sont extraites depuis les données d'arrêts de bus de l'OFT et Swisstopo [49].

L'altitude est acquise directement dans les données. Les coordonnées du système suisse sont converties en coordonnées GPS, et la classification de la route la plus proche est obtenue depuis ses coordonnées sur les cartes suisses d'OpenStreetMap.

Module de prédiction du nombre d'arrêts Les bus s'arrêtent pour quatre raisons différentes :

- Les arrêts officiels des bus qui permettent aux passagers d'embarquer et de débarquer.
- Les arrêts dus à la morphologie du parcours : les feux rouges, les passages piétons et le changement des voies principales à celles secondaires.
- Les arrêts à répétitions dus à la densité du trafic, typiquement lors d'embouteillages.
- Les arrêts intempestifs suite à une irrégularité comme une personne qui traverse hors passage piéton, un véhicule stationné à l'arrêt officiel de bus ou un accident de la route, etc.

Les arrêts officiels sont connus. Ils sont prévus dans les horaires et les tl disposent des données sur la probabilité d'arrêt à chaque station.

Les arrêts dus aux voies de circulation peuvent être certes comptés, mais ceci diminue fortement le potentiel d'automatisation des données. La méthode retenue dans cette étude se base sur la classification normalisée suisse SN 640 040b telle que reprise par Dumont et Tille [2].

Dans le chapitre 2, Dumont et Tille introduisent 5 catégories de voies de circulations avec des valeurs moyennes minimales entre les noeuds routiers. Cette classification est reprise sur les cartes de l'Office Fédéral des Routes (OFROU) et de l'Office Fédéral de la Topographie Swisstopo.

Il est considéré que les bus s'arrêtent à tous les croisements, et que le nombre de croisements est égal à la longueur de tronçon sur la distance minimale entre noeuds routiers. Comme cette valeur n'est pas nécessairement entière, les entiers les plus proches sont pris en considération et une moyenne pondérée est effectuée. La pondération se fait par la partie décimale du rapport entre la longueur de tronçon et la distance entre noeuds.

TABLEAU 2 – Catégorisation des routes suisses selon la norme VSS [2].

Type de route	Route à grand débit (RGD)	Route principale (RP)	Route de liaison (RL)	Route collectrice (RC)	Route de desserte (RD)
Distances minimales entre les noeuds routiers [m]	1000	250	100	50	25
Vitesse de circulation [km/h]	80-120	80-100	60-80	20-60	20-50

Le trafic dense décélère les véhicules. Dans ce modèle, un embouteillage réduit la vitesse moyenne. Cependant le nombre d'accélération et de décélération reste inchangé.

Les arrêts intempestifs sont difficiles à prévoir et aucune tentative de modélisation ou d'acquisition de données n'a été effectuée dans ce sens.

Depuis ces valeurs, il est possible de déterminer la durée d'un cycle ΔT comme la durée d'un tronçon divisé par le nombre d'arrêts de bus.

$$\Delta T = \frac{\text{Durée entre deux stations}}{\text{Nombre d'arrêts entre deux stations}} \quad (28)$$

La valeur de la consigne d'accélération est limitée pour un trolleybus à 0.9 m/s^2 afin de garantir le bien-être des voyageurs. Cette valeur sera reprise dans cette étude.

Consommation au terminus Même au terminus, le bus continue de consommer pour le confort thermique et les auxiliaires.

Cette consommation étant déduite d'un test de plusieurs années sur une ligne de bus, il a été nécessaire d'estimer la vitesse commerciale du bus.

Une moyenne de 20 km/h pour la vitesse de circulation étant raisonnable, la consommation par minute du chauffage, du refroidissement et de l'auxiliaire peut être trouvée. Elle est utilisée pour la durée passée aux terminus.

Masse du véhicule La masse du véhicule peut être calculée grâce à la masse à vide du véhicule, en ajoutant le poids des voyageurs multiplié par la masse moyenne des passagers.

La masse des batteries et des pantographes change en fonction de la technologie du bus. La masse des véhicules à vide est prise à partir de catalogues de constructeurs quand cela est possible.

La masse moyenne d'un adulte en Suisse est de 72.8 kg en 2017 selon l'Office Fédéral de la Statistique [50]. L'OFT utilise souvent 68 kg comme valeur pour la masse d'un passager. Cette valeur sera donc retenue dans ce travail.

Efficacité de récupération La récupération est considérée efficace à 90% (facteur q de l'équation 19).

Température de mise en service du confort thermique Le chauffage est mis à l'arrêt lorsque la température ambiante atteint 18°C .

Inversement, le refroidissement est mis à l'arrêt dès que la température passe sous la barre des 22°C .

Température de simulation Une température de dimensionnement est choisie : elle permet de décider de la taille requise de batterie. À plus faible température, un appoint thermique pour le chauffage est installé.

Pour calculer la consommation annuelle du bus, une moyenne est effectuée avec les températures moyennes des 4 saisons à Lausanne, chacune pondérée d'un facteur 1/4. Ces températures sont pour décembre-février de 2.8°C , pour mars-mai de 10.3°C , pour juin-août de 19.3°C et pour septembre-novembre de 11.2°C selon les données de l'Office Fédéral de Météorologie et de Climatologie MétéoSuisse [51].

Tronçons de 0 minute L'horaire étant fourni par minutes, certains tronçons entre deux arrêts consécutifs ne dépassent pas la minute. Afin de s'y adapter, il faut imaginer le temps du trajet. Tous les trajets durant 0 minutes dans les données sont considérés comme s'ils duraient 0.3 minute. Cette valeur arbitraire est retranchée de la durée du tronçon suivant afin que l'horaire officiel soit maintenu.

3.1.4 Validation du modèle avec des données réelles

Le modèle ainsi obtenu est testé sur les données d'un test de bus électrique de 12 mètres dans Lausanne. Le trajet accompli durant le test est présenté à la figure 5. Les données de l'état de la batterie sont relevées à chacun des points mentionnés dans la figure.

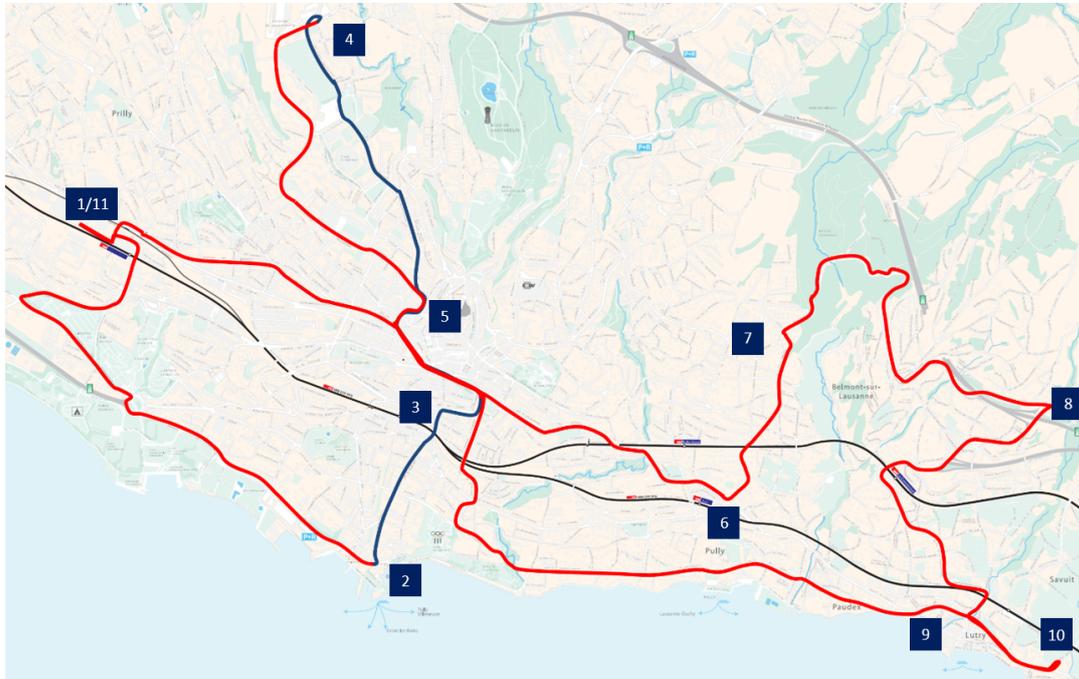


FIGURE 5 – Trajet suivi durant le test d'un autobus électrique à Lausanne. Les numéros représentent dans l'ordre les points de relevé des données. La ligne rouge-bleu présente le trajet effectué. Durant le trajet bleu, tous les arrêts officiels de bus sont effectués.

Il est ainsi possible de confronter le modèle créé avec des données réelles. La figure 6 montre que le modèle est assez performant. Il a toutefois tendance à légèrement surestimer la consommation, ce qui est moins grave que le cas inverse : un bus à batterie légèrement sur-dimensionnée est préférable à un bus qui échoue à fournir les prestations requises. Cette surestimation est inférieure à 0.5 kWh/km sur tous les tronçons, sauf un seul qui est assez court pour que les effets sur l'état de charge soient notables dans le relevé des données.

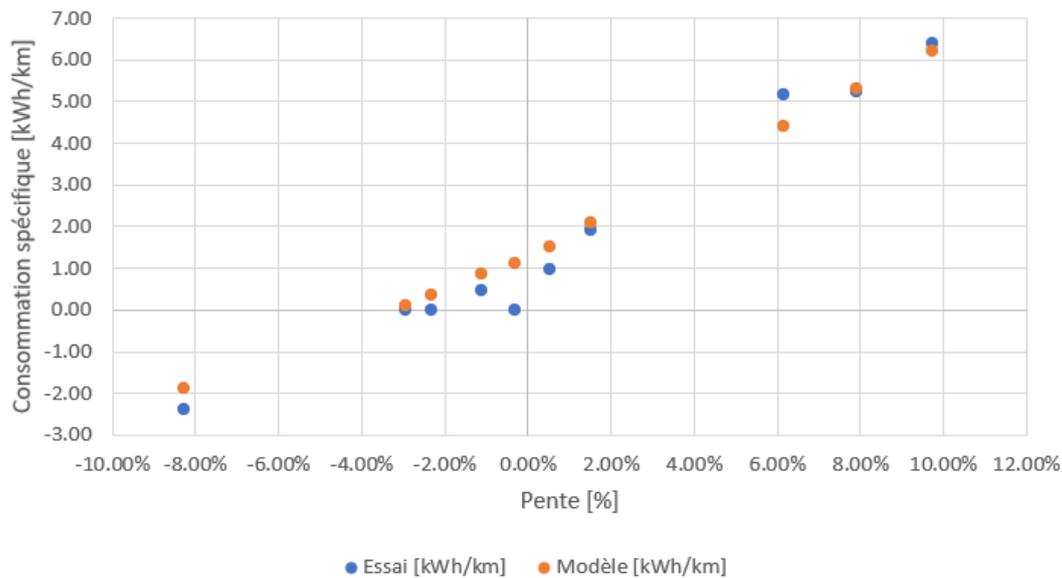


FIGURE 6 – Comparaison des résultats obtenus par le modèle, aux données relevées lors du test d’un bus électrique à Lausanne.

Le modèle ainsi obtenu peut donc être utilisé pour prédire la consommation des lignes de bus des tl.

3.2 Problème d’optimisation

Une fois le modèle de consommation créé, il indique pour chaque ligne quelles technologies (parmi ONC, OPC et OPC) sont techniquement faisables ainsi que la consommation totale par ligne pour chaque technologie. À partir de ces données, un problème d’optimisation est formulé.

L’optimisation permet de réduire le coût de la transition électrique des tl en variant technologies et années de transition pour chaque ligne de bus.

Par souci de lisibilité, les indices référant aux lignes de bus respectivement aux années, aux types de bus (midibus MIB, autobus moyen ABM, autobus AB, autobus articulé ABA) et à la dernière année d’étude sont notés l respectivement t , k et T .

Les variables de décision retenues sont donc $ONC_{l,t}$, $OPC_{l,t}$, $IMC_{l,t}$ et $Diesel_{l,t}$. Il s’agit de variables indicatrices qui prennent la valeur 1 si le bus de la ligne en question fonctionne cette année avec la technologie donnant le nom à la variable, et à 0 sinon.

La fonction objectif minimise le coût de l’électrification. Les coûts sont composés du coût d’opération (ou d’exploitation) OPEX et du coût d’investissement CAPEX.

Les coûts d’opération sont les suivants :

- Le carburant et de l’électricité, selon les prix actuellement payés par les tl.
- La maintenance préventive et corrective, négligée dans le cadre de ce travail.
- Les conducteurs : les grilles horaires ne changeant pas, leurs coûts sont invariables des technologies.

Les coûts d’investissement se résument aux points suivants :

- Les nouveaux bus électriques incluant leurs batteries et pantographes intégrés.
- Les bornes de recharge et leur système de gestion.
- L’infrastructure aux dépôts et sur la chaussée.

- Les batteries de remplacement, qui sont exclues vu que l'étude se limite à la période de transition qui est relativement courte.
- Les adaptations des ateliers, négligées dans le cadre de ce travail, vu que les tl opèrent déjà une flotte électrique (trolleybus).
- La formation des collaborateurs, négligée dans le cadre de ce travail.

CAPEX (équation 31) et OPEX (équation 32) sont des fonctions linéaires. n réfère au nombre de véhicules par type de bus et par ligne, B au prix du véhicule par technologie et type de bus et C au prix du chargeur par technologie, incluant les travaux de génie civil requis. La consommation quotidienne moyenne est notée K et est fonction de la technologie et de la ligne de bus. L'efficacité du moteur diesel est notée η et le prix du carburant est noté p^d pour le diesel et p^e pour l'électricité.

Cette minimisation se fait sous contrainte. Quelques contraintes assurent une électrification cohérente d'un point de vue technique :

- Une unique technologie de bus est utilisée par ligne de bus et par année (équation 33).
- Un unique changement de technologie sur la durée d'étude : une technologie unique électrique est choisie et un retour au diesel empêché (équations 34 et 35).
- Seules les solutions techniquement faisables selon les calculs du modèle de consommation (batterie exigée de dimension inférieure aux capacités maximales des batteries proposées sur le marché, disponibilité de ligne de contact aérienne sur au moins 50% du trajet), peuvent être réalisées. L'équation 36 exclut donc toute solution irréalisable.

D'autres contraintes logistiques s'ajoutent : elles concernent le nombre de véhicules à disposition des tl par type de véhicule et par technologie $V_{t,k}$. Le nombre de bus requis par ligne et par type est $n_{l,k}$ (équation 37). Ces contraintes assurent une transition complète, le nombre de bus diesel disponibles passant à zéro, et une augmentation progressive du nombre de véhicules électriques par une mise à disposition progressive de ces bus.

Une dernière contrainte est purement financière : elle limite le prix d'investissement consenti annuellement par les tl à I_t^{\max} (équation 38).

La fonction objectif $f(x)$ à minimiser peut donc être écrite ainsi :

$$\min_{\text{ONC,OPC,IMC,Diesel}} f(\text{ONC, OPC, IMC, Diesel}) \quad (29)$$

$$\min_{\text{ONC,OPC,IMC,Diesel}} \text{CAPEX}(\text{ONC, OPC, IMC}) + \sum_t \text{OPEX}(\text{ONC, OPC, IMC, Diesel}) \quad (30)$$

avec :

$$\text{CAPEX} = \sum_{l,k} (\text{ONC}_{l,T} \cdot n_{l,k} \cdot (B_k^{\text{ONC}} + C^{\text{ONC}}) + \text{OPC}_{l,T} \cdot (n_{l,k} \cdot B_k^{\text{OPC}} + 2 \cdot C^{\text{OPC}}) + \text{IMC}_{l,T} \cdot n_{l,k} \cdot B_k^{\text{IMC}}) \quad (31)$$

$$\text{OPEX} = \sum_l (\text{Diesel}_{l,t} \cdot \frac{K_l^{\text{IMC}}}{\eta} \cdot 365 \cdot p^d + \text{ONC}_{l,t} \cdot K_l^{\text{ONC}} \cdot 365 \cdot p^e + \text{OPC}_{l,t} \cdot K_l^{\text{OPC}} \cdot 365 \cdot p^e + \text{IMC}_{l,t} \cdot K_l^{\text{IMC}} \cdot 365 \cdot p^e) \quad (32)$$

tel que :

$$\text{ONC}_{l,t} + \text{OPC}_{l,t} + \text{IMC}_{l,t} + \text{Diesel}_{l,t} = 1 \quad \forall l, t \quad (33)$$

$$\text{Diesel}_{l,t} \geq \text{Diesel}_{l,t+1} \quad \forall l, t \quad (34)$$

$$X_{l,t} \leq X_{l,t+1} \quad \forall X \in \{\text{ONC, OPC, IMC}\}, l, t \quad (35)$$

$$X_{l,t} = 0 \quad \forall X \in \{\text{ONC, OPC, IMC}\} \quad (36)$$

$$\sum_l X_{l,t} \cdot n_{l,k} \leq V_{t,k} \quad \forall t, k, X \in \{\text{ONC, OPC, IMC, Diesel}\} \quad (37)$$

$$\sum_{l,k} ((\text{ONC}_{l,t} - \text{ONC}_{l,t-1}) \cdot n_{l,k} \cdot (B_k^{\text{ONC}} + C^{\text{ONC}}) + (\text{OPC}_{l,t} - \text{OPC}_{l,t-1}) \cdot (n_{l,k} \cdot B_k^{\text{OPC}} + 2 \cdot C^{\text{OPC}}) + (\text{IMC}_{l,t} - \text{IMC}_{l,t-1}) \cdot n_{l,k} \cdot B_k^{\text{IMC}}) \leq I_t^{\text{max}} \quad \forall t \quad (38)$$

3.3 Données du cas des tl

Données horaires et passagers Les tl ont fourni un document avec l'horaire d'un lundi scolaire de tout le réseau urbain diesel. Cet horaire inclut notamment les arrêts, les heures et les distances.

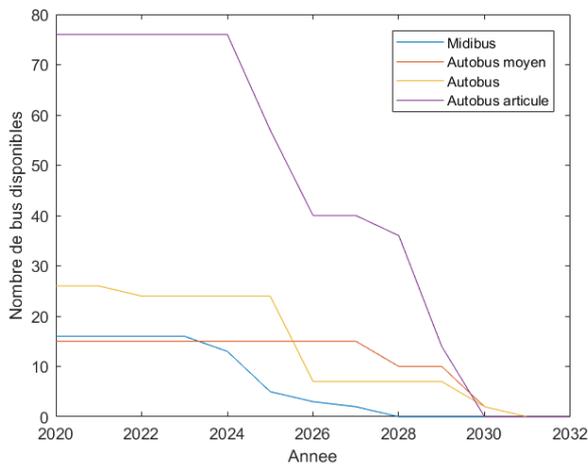
À cet horaire s'ajoute un autre document avec la charge moyenne de passagers par arrêt et par ligne à chaque trajet de bus.

Ces données sont combinées par un code Python.

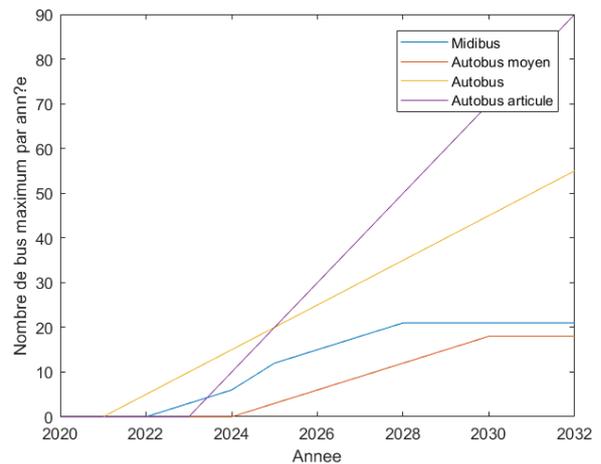
Données d'arrêt de véhicule Les tl relèvent la fréquence d'arrêt des bus à chaque arrêt et à chaque trajet. Les moyennes maximales journalières sont reprises dans le code Python.

La fréquence d'arrêts dus aux croisements est estimée selon le modèle présenté plus haut. Les coordonnées des arrêts selon l'OFT permettent de trouver la route la plus proche sur OpenStreetMap et d'obtenir son type (RP, RL, RC ou RD, voir Tableau 2). Ce travail est effectué automatiquement par un code développé sur Visual Studio Code 1.46.1.

Parc de véhicules L'évolution du parc de bus diesel des transports lausannois entre 2020 et 2032 est reprise des données tl. Elle est présentée dans la figure 7a. Le maximum de véhicules pouvant être commandé permet de remplacer la flotte de bus diesel. La figure 7b montre cette évolution.



(a) Nombre de bus diesel.



(b) Nombre maximal possible de bus électrique.

FIGURE 7 – Évolution du nombre de bus diesel et du nombre maximal de bus électriques possibles dans le parc de véhicules des tl.

Prix L'électricité et le diesel sont pris au prix actuel payé par les tl soit 13 cts./kWh pour le courant électrique et 8.65 cts./kWh pour le diesel.

Quant aux bus, leurs prix sont estimés (ONC pour l'autobus (AB) et l'autobus articulé (ABA)) par les tl ou dans la littérature (IMC en articulé (ABA)). Le reste des données sont difficiles à évaluer et sont approximées.

Le prix des bornes de recharge est évalué par les tl.

Les prix de bus et des bornes de recharge sont présentés dans la section 4.

L'enveloppe annuelle consentie en investissement par les transports lausannois est de x millions de CHF.

Implémentation Le modèle de consommation est implémenté en Python 3.8 sur Jupyter Notebook 5.6.0. Le modèle d'optimisation est implémenté sur IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 12.10.0.0.

4 Résultats

Une fois le modèle de prédiction de la consommation énergétique et le modèle d'optimisation sont développés et implémentés (section 3), plusieurs modélisations peuvent être effectuées. Elles permettent de déterminer le scénario optimal, en variant les variables d'entrées :

- La température de dimensionnement : elle peut prendre la valeur 0, 5 (scénario de base) ou 10°C.
- La dimension des batteries ONC : dans le scénario de base les batteries sont de 100, 250, 300 et 400 kWh pour un midibus, un autobus moyen, un autobus et un autobus articulé respectivement. La taille des batteries peut être augmentée de 10, 20, 30 et 50 %.
- La puissance de recharge OPC : elle peut être de 450 (scénario de base), 300 ou 600 kW.
- Le prix des véhicules : le prix peut être diminué de 10% ou augmenté de 10%.
- Le prix des bornes de recharge ONC : il varie entre 60'000 CHF et 80'000 CHF en fonction de la puissance de recharge choisie. 70'000 CHF est retenue pour le scénario de base.
- Le prix des bornes de recharge OPC : les tl s'attendent, dans de la documentation interne, à un prix de 325'500 CHF pour le chargeur de 300 kW et à 380'750 CHF pour le chargeur de 450 kW. Cette estimation considérée haute peut être réduite de 20%.
- Le prix des carburants : actuellement, la confédération rend une partie du prix du diesel par rétrocession. Dans le scénario de base, le prix avec rétrocession est considéré (0.9 CHF/L). Des scénarios sans rétrocession seront aussi calculés (1.32 CHF/L). Ces prix sont selon les tl, les prix actuellement payés.

Ces scénarios sont appliqués à toutes les lignes de bus du réseau actuel tl avec les hypothèses présentées dans la section 3.

4.1 Scénario de base

Le scénario de base prévoit les entrées présentées au tableau 3.

TABLEAU 3 – Données de la simulation de base.

Température de dimensionnement	5°C
Dimension des batteries ONC	Dans l'ordre MIB, ABM, AB et ABA en kWh : 100, 250, 300, 400
Puissance de charge OPC	450 kW
Prix des véhicules	Dans l'ordre MIB, ABM, AB et ABA en kCHF : ONC : 500, 700, 700, 900 OPC 500, 700, 700, 900 IMC - , - , - , 1'100
Prix des bornes de recharge	ONC : 70'000 CHF, OPC : 380'750 CHF
Prix carburant	Diesel : 0.9 CHF/L

Le modèle permet de trouver une solution qui recourt surtout à la technologie OPC (figure 8). Seule la ligne 29 est en ONC. Pour les lignes capables de passer en IMC, la technologie OPC est privilégiée par l'algorithme vu le plus faible prix du bus.

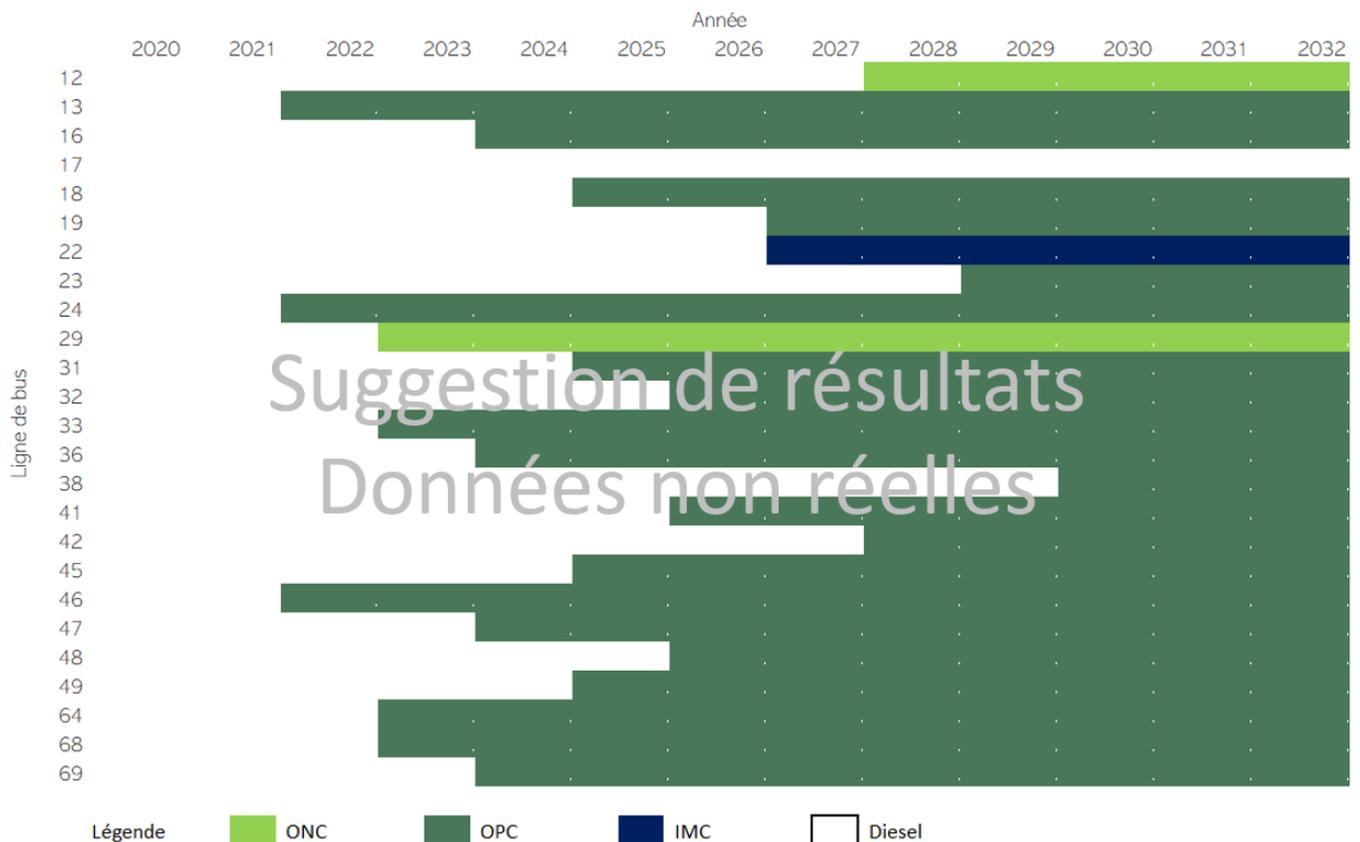


FIGURE 8 – Résultat de transition par ligne, année et technologie du scénario de base.

Une des ligne ne peut pas passer en électrique. Même avec la technologie OPC, la consommation le long de la ligne ne peut être compensée par la recharge au terminus et/ou la nuit.

L'algorithme d'optimisation finit avec un coût total de x CHF sur la durée allant de 2020 à 2032.

Le détail de la transition est fourni dans la figure 8. Elle est entamée en 2022 et s'achève en x.

Le tableau 4 montre que les bus ont tendance à avoir une consommation beaucoup trop élevée par rapport aux capacités actuelles des batteries ONC. Ceci explique pourquoi, souvent, seule la technologie OPC est techniquement faisable sans changements des horaires.

TABLEAU 4 – Récapitulatif du scénario de base par ligne de bus.

Ligne	Type de véhicule	Nombre de véhicules	Longueur de ligne [km]	Consommation maximale d'un bus en OPC [kWh]	Technologie	Année de transition
12	AB	3	2.3	x	x	x
13	ABM	2	1.8	x	x	x
16	ABM	6	7.5/8.3	x	x	x
17	ABA	10	8.7	x	x	x
18	ABA	6	6.7	x	x	x
19	ABA	7	4.3	x	x	x
22	ABA	5	4.1	x	x	x
23	ABM	1	1.7/2.5	x	x	x
24	ABM	4	5.7	x	x	x
29	MIB	1	1.5/3.0	x	x	x
31	ABA	4	6.5/7.6	x	x	x
32	AB	7	9.0/11.0	x	x	x
33	AB	6	10.8/11.9	x	x	x
36	AB	2	2.9	x	x	x
38	AB	2	2.2/3.0	x	x	x
41	ABA	4	1.8	x	x	x
42	MIB	2	2.2	x	x	x
45	ABA	5	5.2	x	x	x
46	AB	2	3.0	x	x	x
47	ABA	5	7.4	x	x	x
48	MIB	4	2.7/3.7	x	x	x
49	MIB	2	3.5	x	x	x
64	AB	3	5.5	x	x	x
68	MIB	2	6.2/7.4	x	x	x
69	MIB	1	4.0	x	x	x

4.2 Variations de la température de dimensionnement

L'impact de la température de dimensionnement sur les résultats est testé. La variation de la température impacte avant tout la consommation du chauffage. Si elle est plus basse, le recours plus massif au chauffage limite davantage les options ONC, à cause des limites de capacité des batteries.

La température de dimensionnement est prise à 0°C respectivement 10°C, ramenant les paramètres de la simulation à ceux présentés dans le tableau 5.

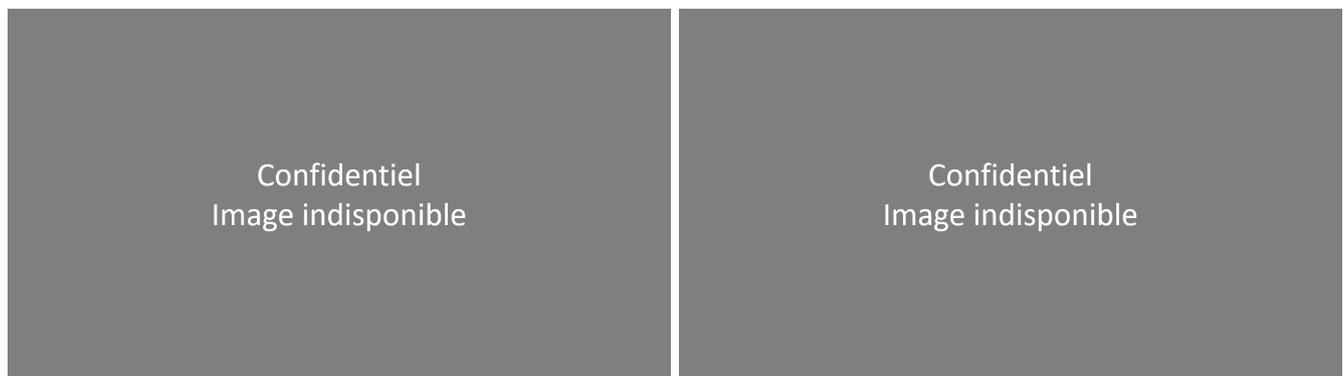
TABLEAU 5 – Données des simulations avec la température extérieure à 0 ou 10°C.

Température de dimensionnement	0°C	10°C
Dimension des batteries ONC	Dans l'ordre MIB, ABM, AB et ABA en kWh : 100, 250, 300, 400	
Puissance de charge OPC	450 kW	
Prix des véhicules	Dans l'ordre MIB, ABM, AB et ABA en kCHF : ONC : 500, 700, 700, 900 OPC 500, 700, 700, 900 IMC - , - , - , 1'100	
Prix des bornes de recharge	ONC : 70'000 CHF, OPC : 380'750 CHF	
Prix carburant	Diesel : 0.9 CHF/L	

La température de 0°C augmente la consommation énergétique sans pour autant réduire davantage le nombre de bus potentiels en ONC, augmentant légèrement le prix de transition (tableau 6). Le plan de transition reste inchangé quant aux technologies sélectionnées par ligne et aux années de transition.

Ensuite, la température de dimensionnement est montée à 10°C. Cette température est similaire aux températures printanières ou automnale à Lausanne, réduisant fortement le recours au chauffage électrique. Elle réduit la consommation électrique du bus mais augmente la consommation de diesel du chauffage thermique d'appoint. Comme cette consommation n'est pas prise en compte, le prix est donc virtuellement plus bas (tableau 6). Toutefois, cette baisse de la consommation permet à un autre bus de passer en technologie ONC : la ligne 19. L'algorithme préfère d'ailleurs l'ONC à l'OPC.

Le plan reste toutefois le même : seule la ligne 19 désormais en ONC est électrifiée en 2023 en lieu et place de 2028 (figure 10).



(a) Température de dimensionnement de 0°C.

(b) Température de dimensionnement de 10°C.

FIGURE 9 – Résultat de transition par ligne, année et technologie des scénarios avec variations de la température de dimensionnement.

TABLEAU 6 – Prix des scénarios de transition avec différentes températures de dimensionnement.

Scénario	0°C	10°C
Prix [CHF]	x	x
Différence de prix par rapport au scénario initial	x	x



FIGURE 10 – Différences entre les scénarios de variations de la température de dimensionnement et le scénario de base.

Ces résultats fournissent divers renseignements :

- La température de dimensionnement de 0°C ne change rien au plan de déploiement si ce n'est une légère augmentation de la facture d'électricité.
- L'augmentation de la température de dimensionnement à 10°C ne permet toujours pas à la ligne x d'être électrifiée et ne permet que d'obtenir une seule ligne supplémentaire en ONC.
- La température de dimensionnement n'impacte que potentiellement une ligne du réseau qui passe en ONC à la place de la technologie OPC et ceci quatre ans à l'avance. Ce faible changement montre que la température de dimensionnement n'a pas un grand impact sur l'état actuel du réseau.

4.3 Augmentation de la capacité des batteries ONC

L'augmentation de la capacité des batteries est limitée par des considérations économiques et mécaniques. Les prix des batteries diminuent ce qui permet d'intégrer de plus en plus de stockage sans pour autant altérer considérablement le coût. En parallèle, l'augmentation de l'énergie de la batterie permet de rouler plus longtemps. Toutefois, l'augmentation de la masse à transporter augmente la consommation du bus réduisant conséquemment son autonomie. Comme la batterie des bus ONC ne peut être rechargée que de nuit dans le modèle ici proposé, sa capacité de stockage jouera un rôle essentiel dans la détermination de la possibilité de passer en technologie ONC de chaque ligne.

Une augmentation de la capacité des batteries est prévue. L'amélioration des technologies de batteries et la possibilité de rétrofiter les bus de la flotte électrique ouvrent la voie vers des batteries plus capacitaires. Quatre augmentations de 10, 20, 30 et 50% de la capacité de la batterie sont modélisées.

Le tableau 7 récapitule les paramètres des quatre simulations sur les dimensions de batteries.

TABLEAU 7 – Données des simulations avec des batteries de capacités augmentées ONC 10, 20, 30 et 50%.

Température de dimensionnement	5°C				
Dimension des batteries ONC	Dans l'ordre MIB, ABM, AB et ABA en kWh : <table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td>+10% : 110, 275, 330, 440</td> <td>+20% : 120, 300, 360, 480</td> <td>+30% : 130, 325, 390, 520</td> <td>+50% : 150, 375, 450, 600</td> </tr> </table>	+10% : 110, 275, 330, 440	+20% : 120, 300, 360, 480	+30% : 130, 325, 390, 520	+50% : 150, 375, 450, 600
+10% : 110, 275, 330, 440	+20% : 120, 300, 360, 480	+30% : 130, 325, 390, 520	+50% : 150, 375, 450, 600		
Puissance de charge OPC	450 kW				
Prix des véhicules	Dans l'ordre MIB, ABM, AB et ABA en kCHF : ONC : 500, 700, 700, 900 OPC 500, 700, 700, 900 IMC - , - , - , 1'100				
Prix des bornes de recharge	ONC : 70'000 CHF, OPC : 380'750 CHF				
Prix carburant	Diesel : 0.9 CHF/L				

Les quatre simulations offrent les résultats présentés à la figure 11.

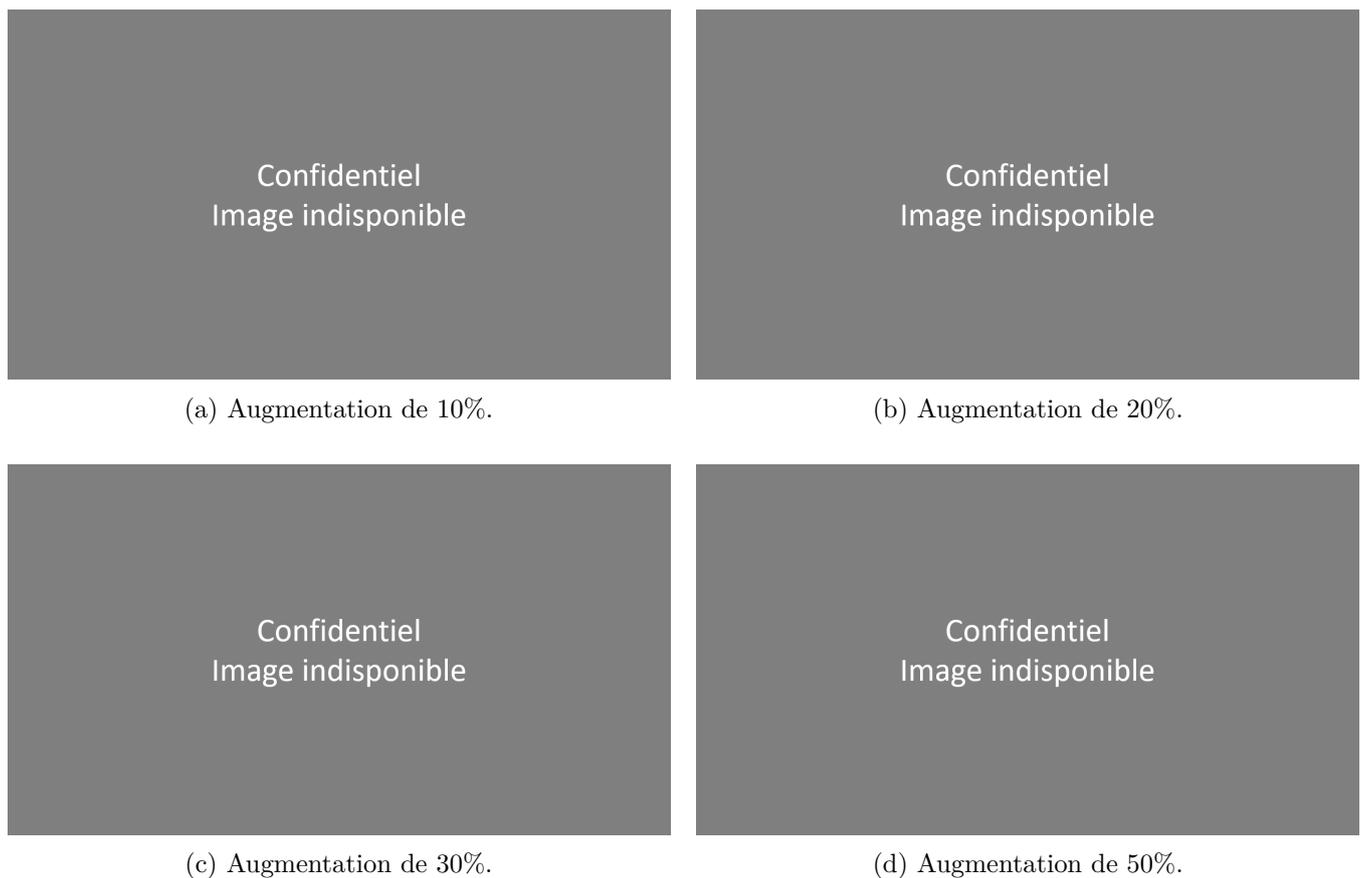


FIGURE 11 – Résultat de transition par ligne, année et technologie des scénarios d'augmentation de la dimension des batteries ONC.

TABLEAU 8 – Prix des scénarios de transition avec différentes augmentations des capacités de batteries.

Scénario	Augmentation de la capacité des batteries ONC			
	+10%	+20%	+30%	+50%
Prix [CHF]	x	x	x	x
Différence de prix par rapport au scénario initial	insignifiante			x

Seule la ligne 29 peut passer en ONC, permettant de maintenir le même résultat que pour le scénario de base (sauf pour le scénario avec une augmentation de 50% de la capacité des batteries).

L'augmentation de capacité de 50% est assez optimiste. Elle permet de vérifier avant tout la possibilité dans un futur ultérieur d'avoir un réseau qui utilise davantage la technologie ONC. Ceci permet d'ailleurs d'électrifier 2 lignes en ONC : les lignes 19 et 29.

Sans changement du plan de déploiement, la masse supplémentaire des batteries ONC n'impacte presque pas le prix, sachant que seule la ligne 29 est en ONC. Le plan avec des batteries beaucoup plus capacitaires recourt à des bus ONC pour la ligne 29, ces derniers étant moins chers que les bus OPC.



FIGURE 12 – Différences entre les scénarios d'augmentation de la capacité des batteries et le scénario de base.

Ces résultats permettent de souligner divers aspects :

- Les batteries ONC devraient encore largement s'améliorer pour permettre aux tl de continuer à exploiter leur réseau tel qu'actuellement.
- Même avec une considérable amélioration, seule une ligne supplémentaire pourrait être électrifiée en ONC.
- Avec des batteries 50% plus énergétiques, une ligne ne présente toujours aucune possibilité d'électrification.
- Les capacités plus larges n'ont aucun impact sur les années de transition, sauf lorsqu'elles ouvrent la possibilité d'électrifier une nouvelle ligne en ONC. Le cas échéant, seule cette ligne voit son année d'électrification évoluer.

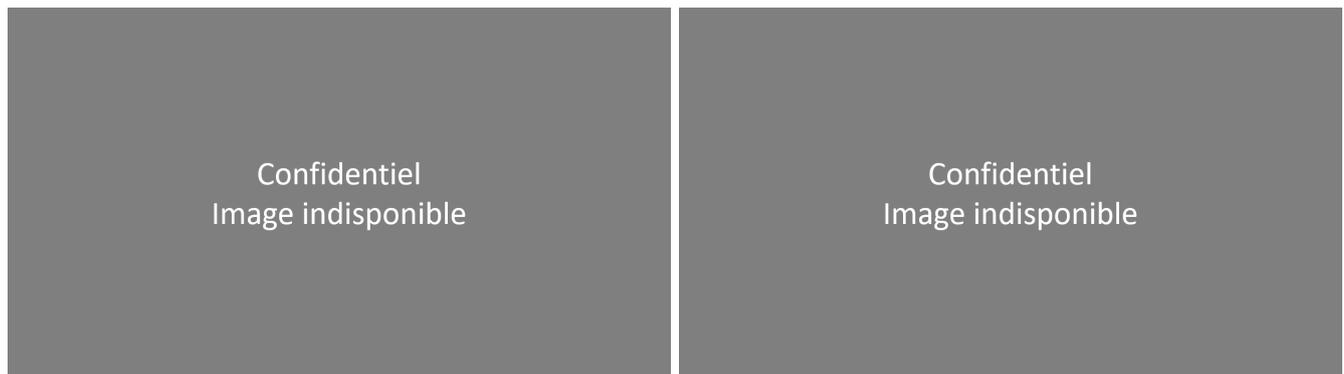
4.4 Modification de la puissance de chargement au terminus

La puissance de chargement au terminus des bus OPC peut être revue à la baisse (300 kW) ou à la hausse (600 kW). Le tableau 9 récapitule les données des deux simulations.

TABLEAU 9 – Données des simulations avec des puissances de charge OPC plus basses (300 kW) et plus hautes (600 kW).

Température de dimensionnement	5°C	
Dimension des batteries ONC	Dans l'ordre MIB, ABM, AB et ABA en kWh : 100, 250, 300, 400	
Puissance de charge OPC	300 kW	600 kW
Prix des véhicules	Dans l'ordre MIB, ABM, AB et ABA en kCHF : ONC : 500, 700, 700, 900 OPC 500, 700, 700, 900 IMC - , - , - , 1'100	
Prix des bornes de recharge	ONC : 70'000 CHF OPC : 325'500 CHF	ONC : 70'000 CHF OPC : 380'750 CHF
Prix carburant	Diesel : 0.9 CHF/L	

La figure 13 récapitule les résultats des deux simulations.



(a) Chargeur de 300 kW.

(b) Chargeur de 600 kW.

FIGURE 13 – Résultat de transition par ligne, année et technologie des scénarios avec variation de la puissance de charge.

Ce changement a pour première conséquence une réduction du prix de la technologie OPC, ce qui pousse le prix total vers le bas.

TABLEAU 10 – Prix des scénarios de transition avec différentes puissances de recharge.

Scénario	300 kW	600 kW
Prix [CHF]	x	x
Différence de prix par rapport au scénario initial	x	x

Le plan de déploiement avec une puissance de charge de 300 kW (figure 13a) montre quelques différences avec le scénario de base. Elles sont montrées dans la figure 14. Par exemple, une ligne est électrifiée 2 ans plus tôt et une autre une année plus tard. Ces différences s'expliquent avant tout par un prix d'investissement moins conséquent, qui encouragera parfois l'électrification des lignes dans un ordre différent, afin de rentrer dans les coûts annuels maximaux. En 2025, quatre lignes sont électrifiées à la place des deux lignes décalées d'une année.



Confidentiel
Image indisponible

FIGURE 14 – Différences entre les scénarios de variation de la puissance de recharge OPC et le scénario de base.

Le passage à une puissance de charge de 600 kWh n'ouvre malheureusement pas la voie à l'électrification de la ligne x. Le résultat reste donc totalement inchangé par rapport au scénario de base, le prix du mât étant considéré le même.

Quelques enseignements principaux peuvent donc être tirés :

- La ligne x ne peut être électrifiée avec une puissance de charge aussi élevée que 600 kW.
- L'augmentation de la puissance de charge n'impacte pas le plan de déploiement de base (à prix de mât égal).
- Une baisse de la puissance du mât baisse le prix sans réduire les possibilités d'électrification.
- Les chargeurs au terminus à 300 kW changent le plan de déploiement pour 11 lignes dont 7 de uniquement 1 an. Seules deux lignes sont électrifiées plus de 3 années plus tôt.

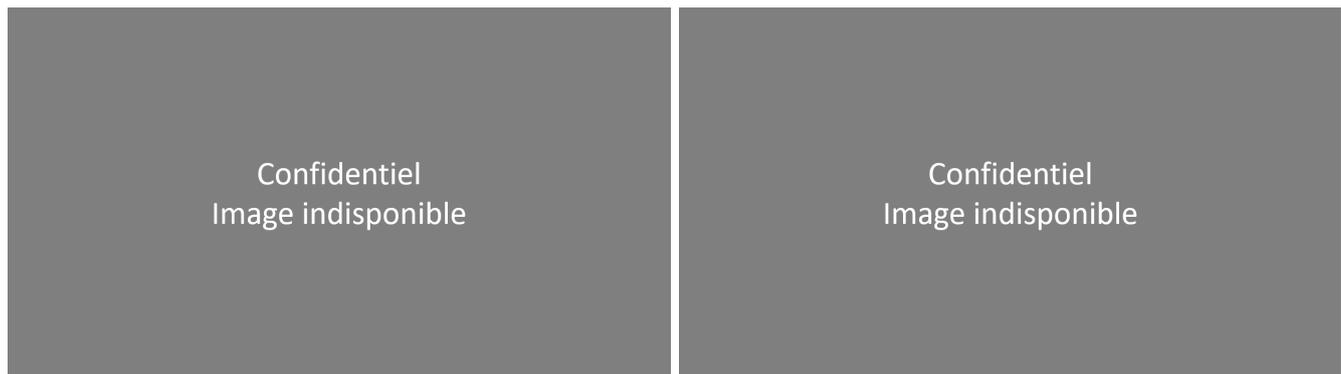
4.5 Variation du prix des véhicules

Le prix des véhicules pourrait baisser à cause de l'avancée technologie ou industrielle ou encore à cause de l'augmentation des volumes produits ou des subventions sur ces véhicules. Un scénario avec les prix des véhicules réduits de 10% est donc effectué.

Parallèlement, un risque d'augmentation des coûts de véhicules à cause de normes, de positions dominantes sur le marché etc. ne peut être exclu. Une augmentation des prix de 10% est donc aussi simulée.

TABLEAU 11 – Données de la simulation avec des prix de bus 10% moins chers et 10% plus chers.

Température de dimensionnement	5°C						
Dimension de batteries ONC	Dans l'ordre MIB, ABM, AB et ABA en kWh : 100, 250, 300, 400						
Puissance de charge OPC	450 kW						
Prix des véhicules	Dans l'ordre MIB, ABM, AB et ABA en kCHF : <table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%;">ONC : 450, 630, 630, 810</td> <td style="width: 50%;">ONC : 550, 770, 770, 990</td> </tr> <tr> <td>OPC 450, 630, 630, 810</td> <td>OPC 550, 770, 770, 990</td> </tr> <tr> <td>IMC - , - , - , 990</td> <td>IMC - , - , - , 1'210</td> </tr> </table>	ONC : 450, 630, 630, 810	ONC : 550, 770, 770, 990	OPC 450, 630, 630, 810	OPC 550, 770, 770, 990	IMC - , - , - , 990	IMC - , - , - , 1'210
ONC : 450, 630, 630, 810	ONC : 550, 770, 770, 990						
OPC 450, 630, 630, 810	OPC 550, 770, 770, 990						
IMC - , - , - , 990	IMC - , - , - , 1'210						
Prix des bornes de recharge	ONC : 70'000 CHF, OPC : 380'750 CHF						
Prix carburant	Diesel : 0.9 CHF/L						



(a) Véhicules 10% moins chers.

(b) Véhicules 10% plus chers.

FIGURE 15 – Résultat de transition par ligne, année et technologie des scénarios avec variations du prix des véhicules.

TABLEAU 12 – Prix des scénarios de transition avec des bus moins ou plus chers de 10%.

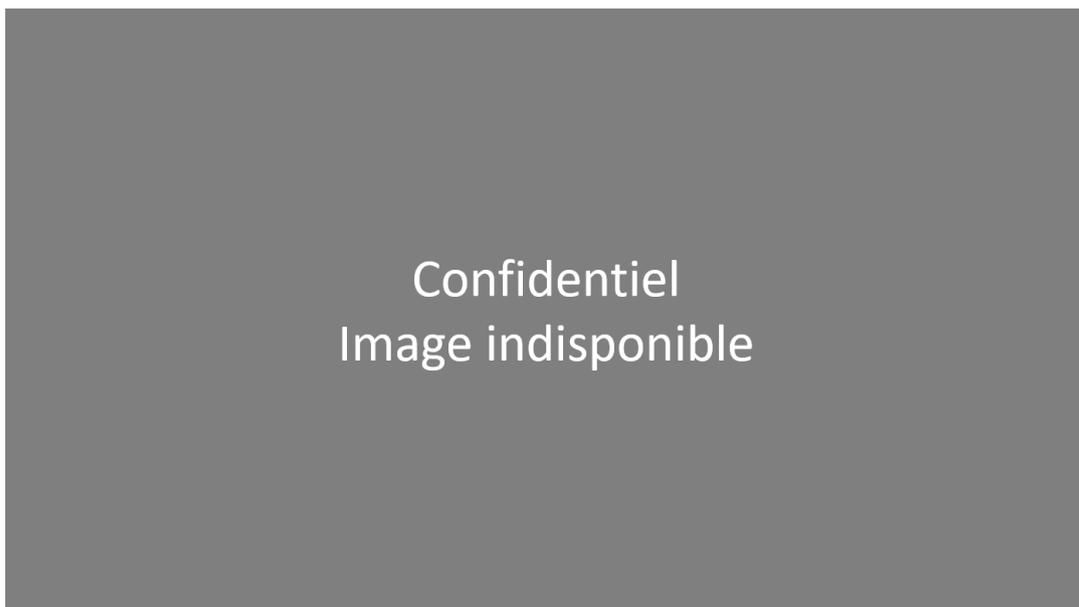
Scénario	10% moins chers	10% plus chers
Prix [CHF]	x	x
Différence de prix par rapport au scénario initial	x	x

La réduction du prix des véhicules pousse les lignes avec plus de véhicules à être électrifiées plus tôt, sans dépassement de l'enveloppe maximale consentie. Le plan ne change pas quant aux technologies, seules les années de transitions pour certaines lignes sont modifiées (figure 16).

À l'inverse, une augmentation des prix des véhicules rend l'électrification plus progressive. Elle s'étend désormais sur une année supplémentaire. L'enveloppe maximale annuelle est la première cause de l'échelonnement. Certes, le prix de la transition devient plus cher mais une économie est faite par l'usage des bus diesel davantage jusqu'à leur fin de vie.



(a) Véhicules 10% moins chers.



(b) Véhicules 10% plus chers.

FIGURE 16 – Différences entre les scénarios de variations du prix des véhicules et le scénario de base.

Ces deux scénarios permettent de soulever les points suivants :

- Le prix des bus impacte les années de transition : 11 sont concernés lors d'une réduction, 5 lors d'une augmentation.
- Lors d'une augmentation de 10%, 5 lignes sont affectées durant 1 an uniquement. Ceci ne concerne que les années 2027 et 2028.
- Une réduction du prix affecte deux lignes sur plus de 2 ans : la ligne x, électrifiée 4 ans plus tôt et la ligne x (3 années plus tôt).
- La réduction du prix offre donc du potentiel d'économie générale sur le coût de la transition.
- Dans les deux scénarios, la variation du prix est minime.

4.6 Variation du prix des bornes de recharge

Le prix des bornes de recharge est aussi sujet à de potentielles variations de prix.

Les transports lausannois envisagent de payer pas moins de 60'000 CHF pour les bornes de recharge au dépôt. Ils imaginent une variation entre 60'000 CHF et 80'000 CHF.

Pour les bornes de recharges au terminus, les tl fournissent une estimation haute, une réduction de 20% est donc simulée.

Température de dimensionnement	5°C		
Dimension des batteries ONC	Dans l'ordre MIB, ABM, AB et ABA en kWh : 100, 250, 300, 400		
Puissance de charge OPC	450 kW		
Prix des véhicules	Dans l'ordre MIB, ABM, AB et ABA en kCHF : ONC : 500, 700, 700, 900 OPC 500, 700, 700, 900 IMC - , - , - , 1'100		
Prix des bornes de recharge	ONC : 60'000 CHF OPC : 380'750 CHF	ONC : 80'000 CHF OPC : 380'750 CHF	ONC : 70'000 CHF OPC : 304'600 CHF
Prix carburant	Diesel : 0.9 CHF/L		

TABLEAU 13 – Données de la simulation avec chargeur ONC à 60'000 CHF ou 80'000 CHF ou chargeur OPC 20% moins cher.

Le plan de transition reste le même pour les chargeurs à 60'000 et 80'000 CHF (figure 17) : ni les technologies ni les années de transition n'évoluent par rapport au scénario de base.

La réduction du prix des bornes de recharge aux terminus a un impact plus important sur le prix total. Ceci a une conséquence sur 13 des 25 lignes de bus roulant en OPC. Le plan de déploiement ainsi obtenu permet le passage plus rapidement à plus de bus électriques.

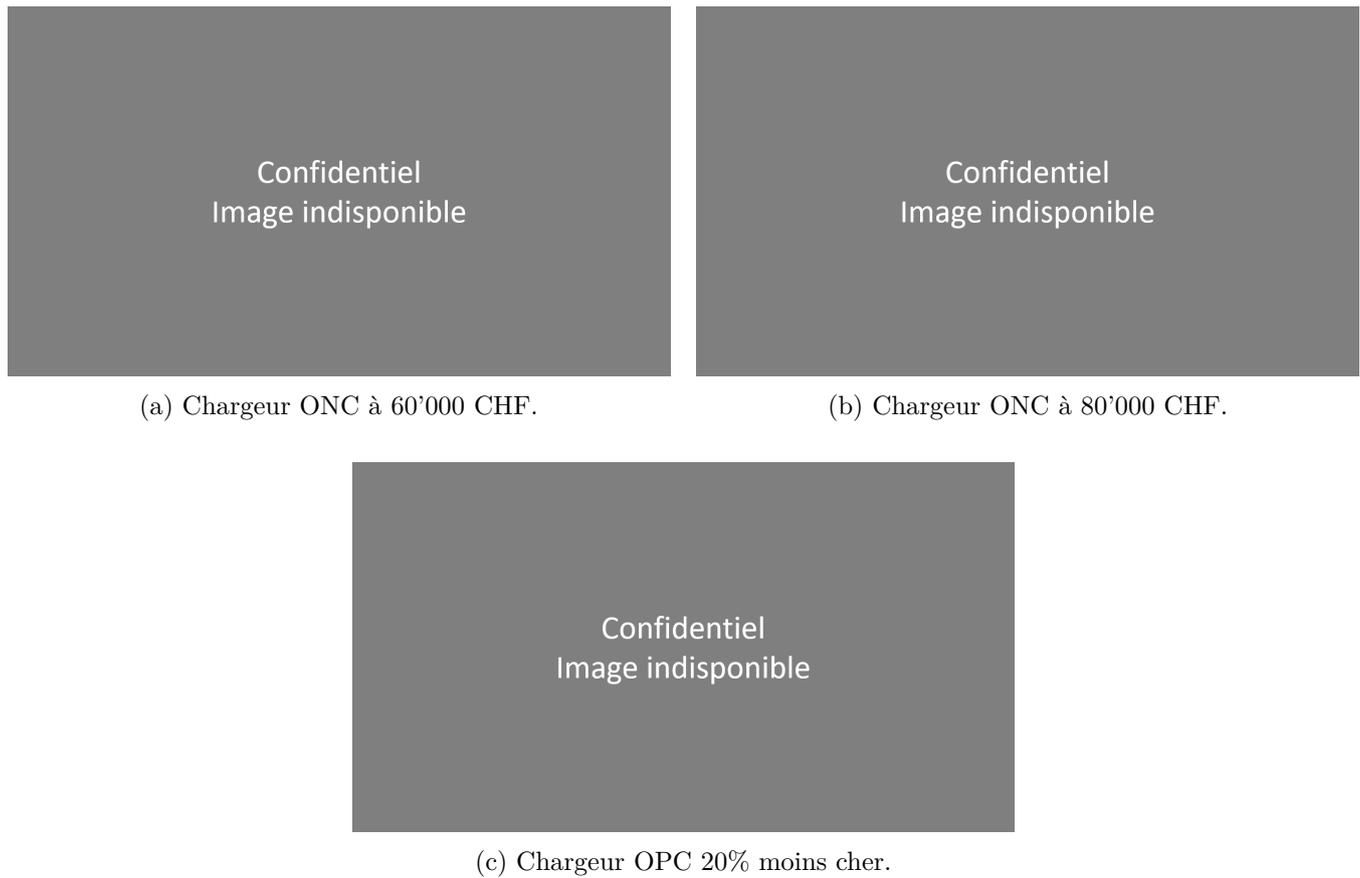


FIGURE 17 – Résultat de transition par ligne, année et technologie des scénarios de variations de prix de chargeurs.

TABLEAU 14 – Prix des scénarios de transition avec des variations des prix des chargeurs.

Scénario	Chargeur ONC à 60'000 CHF	Chargeur ONC à 80'000 CHF	Chargeur OPC 20% moins cher
Prix [CHF]	x	x	x
Différence de prix par rapport au scénario initial	insignifiante		x

Confidentiel
Image indisponible

FIGURE 18 – Différences entre les scénarios de variations des prix des chargeurs et le scénario de base.

La variation des prix des chargeurs permet de déduire les observations suivantes :

- La variation du prix des chargeurs ONC n'a aucun impact, puisqu'une seule ligne, à uniquement un bus est concernée.
- Le prix du chargeur OPC a un impact considérable sur le plan de déploiement et surtout sur le prix total.
- Malgré les 13 lignes impactées par le prix du chargeur au terminus, 9 lignes voient la transition évoluer d'une année uniquement.

4.7 Suppression de la rétrocession de l'impôt sur les huiles minérales

Dans les cadres des discussions sur les plans d'électrification, la suppression de la rétrocession faite par la confédération de l'impôt sur les huiles minérales effectuée en faveur des prestataires de transports publics est évoquée (section 2.5). Une réduction de cette rétrocession augmentera significativement le prix de la transition à cause de l'augmentation du prix du carburant avant la transition. Le coût atteint les x CHF soit une augmentation de x.

La fin de la rétrocession ne fait qu'augmenter le prix sans pour autant changer le plan. En effet, avec la structure actuelle du modèle, l'amortissement des bus existants n'est pas pris en compte. Conséquemment, il est déjà plus avantageux de passer le plus vite possible aux technologies électriques.

TABLEAU 15 – Données de la simulation sans rétrocession de l'impôt sur les huiles minérales.

Température de dimensionnement	5°C
Dimension des batteries ONC	Dans l'ordre MIB, ABM, AB et ABA en kWh : 100, 250, 300, 400
Puissance de charge OPC	450 kW
Prix des véhicules	Dans l'ordre MIB, ABM, AB et ABA en kCHF : ONC : 500, 700, 700, 900 OPC 500, 700, 700, 900 IMC - , - , - , 1'100
Prix des bornes de recharge	ONC : 70'000 CHF, OPC : 304'600 CHF
Prix carburant	Diesel : 1.32 CHF/L



FIGURE 19 – Résultat de transition par ligne, année et technologie du scénario sans rétrocession de la taxe sur les huiles minérales.

La fin de la rétrocession aurait donc les effets suivants :

- L'augmentation du prix de l'exploitation du réseau actuel, qui perd en attractivité. Cette étude ne prenant pas en compte l'amortissement de la flotte diesel, il est impossible de juger de l'impact d'une telle mesure sur l'accélération de la transition.
- Aucun changement du plan ne se fait grâce à la fin de la rétrocession de la taxe sur les huiles minérales.
- Une évaluation plus profonde de cet impact ne peut se faire que grâce à une introduction de l'amortissement des véhicules diesel dans la fonction objectif.

4.8 Scénarios extrêmes

Deux scénarios sont développés en prenant les critères les moins favorables à une transition vers l'électrique pour le premier et les plus favorables pour le deuxième. Ils sont résumés dans le tableau 16.

L'augmentation de la capacité des batteries se limite à 30%, le scénario à 50% étant considéré très optimiste.

TABLEAU 16 – Données de la simulation avec les critères les moins favorables ou les plus favorables à la transition électrique.

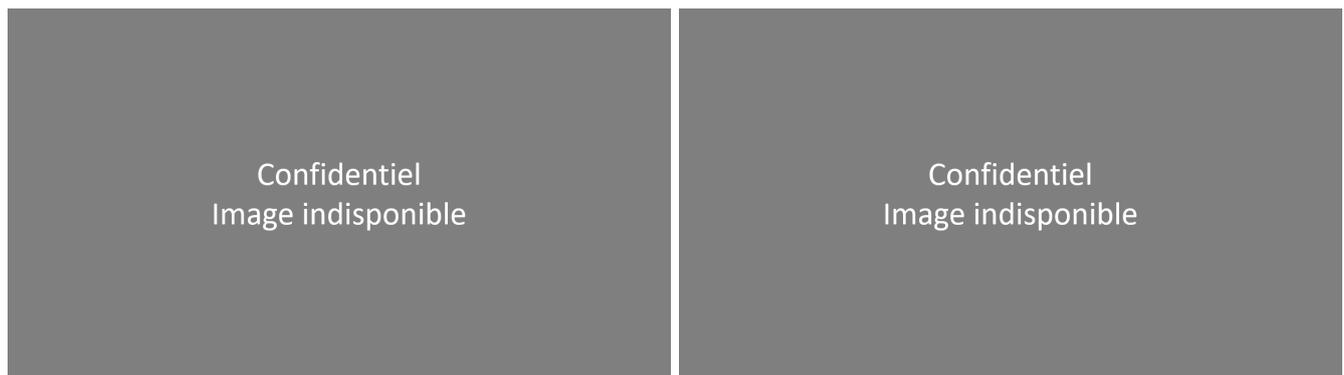
Température de dimensionnement	0°C	10°C
Dimension des batteries ONC	Dans l'ordre MIB, ABM, AB et ABA en kWh :	
	100, 250, 300, 400	130, 325, 390, 520
Puissance de charge OPC	300 kW	600 kW
Prix des véhicules	Dans l'ordre MIB, ABM, AB et ABA en kCHF :	
	ONC : 550, 770, 770, 990	ONC : 450, 630, 630, 810
	OPC 550, 770, 770, 990	OPC 450, 630, 630, 810
	IMC - , - , - , 1'210	IMC - , - , - , 990
Prix des bornes de recharge	ONC : 80'000 CHF OPC : 325'500 CHF	ONC : 60'000 CHF OPC : 304'600 CHF
Prix carburant	Diesel : 0.9 CHF/L	Diesel : 1.32 CHF/L

Les deux scénarios péjorent ou favorisent la transition, sans se soucier du prix. D'ailleurs, les deux scénarios offrent une réduction du prix (tableau 17).

Le scénario optimiste achève l'électrification de l'ensemble du réseau une année plus tôt (ligne x exclue).

TABLEAU 17 – Prix des scénarios de transition les plus favorables et les moins favorables à l'électrification.

Scénario	Pessimiste	Optimiste
Prix [CHF]	x	x
Différence de prix par rapport au scénario initial	x	x



(a) Critères les moins favorables.

(b) Critères les plus favorables.

FIGURE 20 – Résultat de transition par ligne, année et technologie des scénarios les moins ou plus favorables à la transition.

Les divergences entre ces deux scénarios et le scénario de base sont résumées dans la figure 21.



(a) Scénario pessimiste.



(b) Scénario optimiste.

FIGURE 21 – Différences entre le scénario pessimiste et le scénario optimiste et le scénario de base.

Les cas extrêmes dévoilent :

- Les deux scénarios impactent un nombre considérable de lignes : 14 pour le moins favorable et 13 lignes pour le plus favorable. 11 lignes sont d'ailleurs impactées identiquement.
- Le scénario optimiste permet à la ligne 19 de passer en ONC, grâce aux conditions techniques plus favorables.
- Malgré la péjoration technique et économique du scénario pessimiste, les chargeurs moins puissants et donc moins chers permettent une électrification pas moins rapide que d'autres scénarios présentés en cours d'étude comme notamment le scénario avec les bus 10% plus chers.
- Le prix du chargeur montre encore une fois qu'il est un paramètre primordial dans le prix.

4.9 Comparaison des scénarios

La figure 22 récapitule les scénarios précédemment présentés : pour chaque ligne de bus et chaque année, le nombre de scénarios prévoyant que la technologie électrique est utilisée est signalé. Cette illustration permet ainsi de visualiser la convergence des scénarios.

Les scénarios montrent une assez faible variabilité :

- Tous les scénarios convergent parfaitement pour 7 lignes des 24 formant le réseau urbain.
- Plus de 2 scénarios sur 3 proposent la même année de transition pour 21 lignes sur 24.
- Plus de 5 scénarios sur 8 proposent la même année de transition pour toutes les lignes de bus.
- Dans aucun scénario, la ligne x n'est électrifiée. Ceci est dû aux limitations techniques avec les hypothèses faites.
- 5 scénarios choisissent une autre année de transition que la majorité : pour les lignes x, x, x et x (1 année plus tard), x et x (1 année plus tôt), x (4 années plus tôt) et x (2 années plus tôt).
- Il en découle que les lignes x et x sont celles qui présentent le plus de variabilité d'année de transition selon le scénario.
- Un plan de déploiement où la majorité des scénarios ont convergé est réalisable. Il coïncide d'ailleurs au scénario de base.



Confidentiel
Image indisponible

FIGURE 22 – Nombre de scénarios ayant effectué l'électrification par année et par ligne de bus.

Quant à la figure 23, elle permet de souligner la convergence technologique pour toutes les lignes vers la solution OPC. Seule la ligne 19, qui choisit systématiquement la technologie ONC lorsque ce choix se présente, suggère une deuxième variante. Il convient néanmoins de signaler la rareté de ce cas (2 scénarios sur 16).

Les résultats montrent donc une grande stabilité et une convergence vers la solution de base. Il est à noter que le prix du chargeur OPC est la plus grande source de variabilité. La majorité des lignes ne subissent

aucune variation (7 lignes) ou une alternative une année avant ou après sans variation technologique (8 lignes). Pour ces lignes, il est donc judicieux d'affirmer que le plan peut être fixé, avec un besoin décisionnel pour les neuf lignes de bus restantes.



Confidentiel
Image indisponible

FIGURE 23 – Nombre de scénarios par ligne et par choix technologique.

5 Discussion

Après avoir présenté les résultats dans la section 4, cette section s'intéresse à mettre en perspective le plan d'électrification, à déduire les paramètres les plus déterminants pour assurer la stabilité des résultats, et à souligner les améliorations possibles du modèle.

5.1 Plan proposé

Le plan proposé (scénario de base, section 4.1) fait exactement pour chaque ligne, le même choix que la majorité absolue des scénarios faits (voir figures 22 et 23). Le scénario de base est donc stable par rapport aux critères testés.

Ce plan permet d'électrifier le réseau avec moins de x millions de CHF d'investissement annuels. De plus, par leur efficacité électrique considérable, les bus électriques coûtent moins chers en carburant que leurs consorts diesel, malgré la rétrocession de la confédération de la taxe sur les huiles minérales. Le coût d'investissement en bus et en bornes de recharge est donc le principal facteur échelonnant la transition dans le temps. Un autre facteur limitant est l'impossibilité technique de passer en électrique à cause d'une autonomie nécessaire très large, d'un temps très restreint au terminus et de l'impossibilité d'installer des caténaires : ceci est le cas d'une ligne qui ne peut être électrifiée sans changement d'horaire.

En considérant le prix des carburants, mais en excluant l'amortissement des bus diesel et le coût des chauffeurs et de la maintenance, la fonction coût s'attend à une dépense de x à x millions de CHF entre 2020 et 2032. Ceci permet de passer le réseau urbain des tl en électrique entre x et x .

Presque chaque ligne du réseau urbain des transports lausannois présente un bus qui roule assez longtemps pour réduire les possibilités de la technologie ONC. Même en choisissant une température de dimensionnement de chauffage qui oblige le recours au chauffage thermique durant plus de 90 jours par année et en augmentant la capacité des batteries de 30%, cette technologie ne permet toujours pas de fournir le service requis pour plus de deux lignes de bus. La seule possibilité pour obtenir davantage de bus ONC est un changement de l'horaire des bus tl, ce qui nécessiterait potentiellement l'élargissement de la flotte. Fatalement, ce choix impliquerait une augmentation des coûts et de l'impact environnemental.

La technologie OPC semble donc être le meilleur choix pour la majorité des lignes du réseau. Cette option a l'inconvénient de potentiellement gêner les riverains du moins à cause des travaux aux terminus. Afin de ne pas les importuner, les tl envisagent de ne pas installer des mâts de recharge à moins de 50 mètres des habitations sans que la station de transformation d'énergie soit isolée dans un petit local préfabriqué. Cette perspective réduirait l'attrait de bus OPC et encouragerait les tl à changer les horaires et à augmenter le nombre de véhicules dans le but d'avoir des véhicules ONC.

La technologie OPC prend systématiquement le dessus sur la technologie IMC vu le prix des trolleys articulés à batterie. Ceci pourrait changer si le remplacement des batteries est pris en compte et si une durée d'étude plus longue est prise.

La technologie OPC pour midibus n'existe pas. En effet, la puissance de charge pour ces véhicules est prise à 150 kW, et il est considéré que c'est le chauffeur qui effectue le raccordement au terminus : il s'agit donc réellement de bus ONC qui sont exploités en tant que bus OPC.

La ligne 19 est la seule ligne à basculer en ONC lorsque la taille des batteries est convenablement augmentée. Cette ligne a donc le choix avec la technologie OPC. Toutefois, l'alternative en OPC est plus stable (elle est possible dans 14 scénarios sur 16). Certes, l'alternative ONC est avantagée dès qu'elle est possible, mais elle requière un recours largement supérieur en diesel pour le chauffage d'appoint thermique souvent sollicité.

5.2 Paramètres déterminants pour la stabilité des résultats

Malgré la convergence des scénarios, certains critères se sont montrés plus susceptibles d'impacter plus conséquemment le scénario d'électrification.

La réduction de la température n'a pas d'impact contrairement à son augmentation (à 10°C), qui par l'attribution d'une ligne supplémentaire à la technologie ONC, change le scénario pour une ligne en termes de technologie et d'année d'électrification. La température de dimensionnement n'a donc que très faiblement un impact sur le plan proposé. Toutefois, elle risque d'avoir un impact sur la stabilité de l'horaire, vu que plus la température baisse plus les batteries sont sollicitées. Si un choix de dimensionnement à 5°C est maintenu, sachant que même à 0°C, le plan reste inchangé, alors le plan a de la marge de manoeuvre. Si une température de 0°C est choisie, une analyse d'une température de dimensionnement plus faible (par exemple -5°C) serait intéressante.

L'augmentation de la capacité des batteries n'affecte aucunement le résultat avant d'atteindre 50%. À cette valeur-là, le scénario obtenu est identique au cas d'une augmentation de la température de dimensionnement à 10°C, la ligne 19 étant électrifiée désormais en ONC, 4 ans plus tôt. Ceci confirme l'incapacité du reste du réseau à passer en ONC sans changement horaire. L'augmentation de la capacité des batteries n'a donc pas un paramètre de grande influence sur le plan d'électrification du réseau.

Un premier changement plus notable intervient à la baisse de la puissance de recharge OPC. À 300 kW, 11 lignes sont électrifiées à un autre moment. La baisse du prix des bornes ouvre une voie vers une électrification plus accélérée : 6 lignes sont électrifiées en moyenne plus de 2 années plus tôt, contre 5 lignes électrifiées 1 an plus tard uniquement. Par exemple, 10 bus ABA sont acquis en 2025 dans les 2 cas : ils sont utilisés pour la ligne x dans le scénario de base, alors qu'ils sont répartis entre la ligne x et x dans le scénario à

300 kW. Ceci est dû à la possibilité d'acquérir plus de chargeurs OPC qui permet d'électrifier 2 lignes à la place d'une seule. À 600 kW, aucun changement n'est effectué vu que le prix est considéré comme identique au chargeur en 450 kW et que la ligne x n'est toujours pas électrifiable. Il en découle qu'une augmentation de la puissance de recharge n'est actuellement pas nécessairement avantageuse. Les lignes x, x, x et x sont les plus impactées. Une réduction du prix des chargeurs OPC a une influence non négligeable sur le plan d'électrification du réseau. Un soin particulier à l'évaluation de ce prix est donc avantageux.

Les variations du prix des véhicules impactent fortement les scénarios de déploiement des technologies. Dans le cas d'une augmentation de 10%, 5 lignes sont concernées, ce chiffre monte même à 11 si une réduction de 10% est prévue. Ces deux scénarios partagent 1 changement en commun : la ligne x électrifiée une année plus tard. En incluant le scénario de base, seules 7 lignes continuent à avoir la transition en commun. La réduction du prix permet d'électrifier 5 lignes plus de 2 ans plus tôt et 6 lignes un an plus tard : le cas de la ligne x substituée par les lignes x et x en x se reproduit par exemple. Il est donc fortement utile de réduire les imprécisions sur le coût des bus.

Les fluctuations du coût des chargeurs ONC ne présentent aucun changement sur le plan, la seule ligne de bus qui passe à cette technologie étant desservi par uniquement un véhicule, possédant donc qu'un unique chargeur au dépôt. Quant au prix du mât OPC, s'il est réduit de 20%, le scénario de déploiement est modifié : 13 lignes voient leur moment de transition évoluer. La chute du coût du chargeur OPC ouvre la voie à une électrification plus rapide du réseau. 8 lignes sont électrifiées 2 ans plus tôt contre 5 lignes électrifiées une année plus tard. Les lignes 12, 38, 42 et 64 sont particulièrement touchées. Le prix du chargeur se montre donc à nouveau un paramètre très influent sur le plan d'électrification du réseau.

La fin de la rétrocession ne change pas le plan de déploiement. Elle requiert toutefois d'augmenter le financement annuel prévu pour l'exploitation du réseau. Son influence n'est donc pas directement utile au tl. Elle augmentera toutefois les coûts annuels actuels, encourageant potentiellement l'acceptation d'un plan qui est en comparaison à court terme plus cher que le statu quo.

En conclusion, les prix des véhicules et des mâts de recharge OPC ont la plus forte incidence sur le plan de déploiement des bus. Plus leur évaluation est précise, plus le plan peut être précis. Les lignes x, x, x, x, x présentent les plus grands risques de changement pluriannuels de la date de transition.

D'autres paramètres non testés risquent de se montrer plus impactant comme l'évolution du prix de l'électricité ou du diesel ou encore une lenteur imprévue dans la livraison des bus électriques aux tl ou une augmentation du nombre de personnes empruntant le réseau de bus. Ce rapport tente de prendre en considération les divers risques : 16 scénarios ont ainsi été développés, sans pour autant inclure tous les cas raisonnablement envisageables.

Un autre facteur qui va nécessairement évoluer et qui n'a pas été pris en considération et qui ne peut malheureusement pas être évalué actuellement est l'évolution du réseau et des horaires. Il est sûr que de nouvelles routes apparaîtront ou disparaîtront du réseau d'ici 2030 et que les horaires actuels changeront pour suivre l'évolution de la demande et assurer les correspondances. Le modèle développé et implémenté est d'ailleurs capable de gérer des horaires et des lignes nouvelles.

5.3 Limitations et recherches ultérieures

Les résultats ainsi obtenus peuvent être améliorés ou nuancés.

D'abord, le modèle développé pourrait être mieux adapté grâce à des données réelles d'arrêts aux noeuds routiers et aux embouteillages. Ceci permettrait d'améliorer le modèle de prédiction des accélérations pour mieux prédire la consommation des bus.

Deuxièmement, le modèle trapézoïdal d'accélération avec consigne d'accélération maximale est facilement modifiable. Des données réelles peuvent être utilisées afin d'améliorer le résultat. Elles rendraient possible

des variations de cette consigne en forme et en valeur, rendant le modèle de prédiction de la consommation plus fidèle à la réalité.

Ensuite, la consommation de confort thermique pourrait être améliorée par la création d'une modélisation de transfert de chaleur, qui permettrait d'avoir un modèle scientifiquement plus robuste. Des données telles que le réfrigérant utilisé, son débit et sa température ainsi que le coefficient de performance de la pompe à chaleur sont nécessaires et suffisantes pour être intégrées dans le modèle présenté dans la section 3.

De plus, diverses améliorations plus ou moins mineures du modèle d'optimisation peuvent être faites. Elles permettraient notamment d'inclure la possibilité d'avoir un seul mât par ligne ou même de prendre en considération le cas de lignes à plus que deux terminus, comme la ligne 32 par exemple.

Puis, le modèle d'optimisation peut introduire d'autres objectifs, comme une minimisation des émissions équivalentes de gaz à effet de serre ou encore la minimisation du nombre d'années où les bus diesel ne sont pas utilisés, afin de profiter de la flotte existante. Une telle optimisation multi-objectifs fournirait par simulation un front de Pareto de solutions plutôt qu'une unique solution optimale. Elle permettrait que le choix économique se fasse en connaissance des alternatives qui favorisent d'autres aspects comme l'aspect environnemental sans pour autant négliger l'aspect économique.

Enfin, le modèle peut être testé avec un horaire plus favorable au bus ONC. Ceci inclurait un travail en amont de l'horaire. Cette modification mènerait à une nécessité d'inclure le coût des heures de travail des chauffeurs et de l'extension requise du dépôt pour accueillir ces nouveaux véhicules dans la fonction objectif actuelle.

6 Conclusion

Le réseau de bus urbain lausannois est à l'aube d'une électrification intégrale à l'horizon 2030 grâce aux technologies de chargement au dépôt (ONC), de chargement au terminus (OPC) et de chargement dynamique par ligne de contact (IMC).

Ces technologies sont actuellement matures et commercialisées. Elles présentent leurs avantages et faiblesses. La technologie ONC est la moins onéreuse et ne requière pas des travaux sur la chaussée, mais ne présente que de faibles autonomies, la technologie OPC permet des autonomies beaucoup plus élevées et a besoin de batteries plus petites, mais demande des travaux aux terminus et est plus sensible à la stabilité des horaires, la technologie IMC permet une autonomie presque infinie grâce à une assez faible batterie au prix d'une installation très lourde et non souhaitable sur la chaussée.

Les trois innovations en jeu présentent des points similaires comme des batteries lithium-ion qui sont principalement catégorisées en batterie optimisée énergie (énergétiquement dense, recharge jusqu'à 150 kW) et batterie optimisée puissance (énergétiquement peu dense, recharge jusqu'à 600 kW). Elles sont rechargées de manière stationnaire par conduction (borne de recharge, station de recharge ou ligne de contact) ou induction ou encore dynamiquement par ligne de contact. La climatisation se fait en électrique avec un appoint thermique pour le chauffage notamment pour les véhicules ONC.

L'exploitation de ces véhicules requiert souvent des modifications aux dépôts (recharge, incendie), sur la chaussée (recharge) et aux ateliers de maintenance (protection électricité et incendie).

Actuellement, diverses villes en Suisse et dans le monde mènent des programmes d'électrification et prévoient des réseaux plus ou moins entièrement électriques. La méthodologie utilisée dans cette étude rejoint la littérature scientifique et technique sur plusieurs aspects, tels que l'utilisation d'un modèle de prédiction newtonien. La particularité de ce projet réside dans l'utilisation d'un modèle d'optimisation qui fournit une possibilité de varier l'année de transition et la technologie électrique pour chaque ligne de bus.

Une stratégie d'électrification du réseau de bus urbain lausannois à l'horizon 2030 est clairement envisageable. Elle se confronte particulièrement à deux aspects contraignants : d'une part, l'installation nécessaire de mâts de recharge pour presque toutes les lignes, si aucun changement d'allocation des bus n'est fait ; d'autre part, une nécessité d'élargissement de la flotte et d'une révision de l'allocation des bus, si les travaux de génie civil sur la chaussée veulent être évités. Une seule ligne requiert un changement de son horaire pour qu'au moins une technologie soit faisable.

En conservant l'horaire actuel, l'électrification du réseau fait surtout recours à la technologie OPC. Un recours à la technologie ONC (1-2 ligne de bus) fait nonobstant partie intégrante de la solution. Les variations en fonction du prix des bus, des bornes de recharge, du diesel ou encore de la capacité des batteries ou de la température de dimensionnement n'affectent que peu les technologies choisies, mais modifient plus ou moins intensément les années de transition. Le prix des bornes de recharge surtout, mais aussi des véhicules impacte le plus le plan d'électrification. Les estimations les plus précises possibles de ces paramètres sont donc fort utiles. Néanmoins, plus de 60% des scénarios choisissent la même année de transition pour chaque ligne, révélant la stabilité des résultats.

Le plan ainsi proposé électrifie l'intégralité du réseau entre 2020 et 2032 grâce à la technologie OPC. Seule la ligne 29 est exploitée en ONC et la ligne x n'est pas électrifiée. Les lignes de midibus présentent des véhicules ONC exploités en OPC grâce à un chargement manuel au terminus.

Certaines améliorations futures peuvent concerner une modification des horaires pour avantager les bus ONC ou une inclusion d'objectifs environnementaux dans le modèle donnant une optimisation multi-objectif.

Le recours à ces technologies conserve toutefois un lot d'incertitudes et d'investigations supplémentaires requises, nommément encore la provenance des matériaux, la fabrication et le recyclage des batteries. De par le manque de savoir-faire et de standards éthiques actuellement, la stratégie d'électrification risque de se transformer en un simple et malheureux déplacement des problèmes écologiques et sociaux vers d'autres contrées.

Remerciements

Je remercie les Transports Lausannois pour l'opportunité de faire un projet de master en industrie. La réactivité et l'intérêt de M. Philippe Seydoux et de M. Laurent Mudry, ainsi que les données fournies par les tl qui ont été d'une saisissante exemplarité.

Je remercie aussi le laboratoire Transp-or de l'EPFL, en particulier le Prof. Michel Bierlaire qui a rendu possible ce projet de Master, ainsi que les multiples commentaires constructifs fournis. Un remerciement spécial revient à Mme Janody Pougala et M. Nicola Ortelli pour leur encadrement, encouragement et suivi exceptionnel de ce projet.

Je remercie enfin mon très cher colocataire et ami Lucas David Meier pour l'aide fournie afin de déboguer le code Python et pour le développement du code d'acquisition du type de route à proximité de chaque arrêt.

Documentation annexe

Ce projet a développé trois modèles.

D'abord, le modèle évalue la consommation des véhicules et la faisabilité technique des lignes de bus en ONC, OPC et IMC. Il peut être utilisé avec n'importe quel réseau de bus moyennant quelques modifications. Pour le réseau tl, seule la modification des documents d'horaire est requise. Ce code développé en Python comme classeur Jupyter est commenté et organisé en sections. Son usage est libre.

Ensuite, un modèle acquiert le type de route à proximité des arrêts. Sa sortie est utilisée dans le modèle de consommation précédemment cité. Ce code est développé dans l'écosystème ox d'Anaconda Navigator sur VS Code et est aussi libre. Pour un usage hors de l'agglomération lausannoise, la carte correspondante doit être téléchargée avec les coordonnées adaptées.

Enfin, le modèle d'optimisation est codé sur IBM CPLEX, ce qui requiert une installation de logiciel propriétaire. Le code peut être facilement modifié avec les sorties de la section 5 du modèle de consommation, et les prix de tout élément peuvent être modifiés dans les définitions de variables.

Les trois codes ici cités sont mis à disposition.

Références

- [1] IBM ILOG CPLEX. V12.10 : User's Manual for CPLEX. *International Business Machines Corporation*, 2019.
- [2] André-Gilles Dumont and Micaël Tille. *Voies de circulation*, volume 25 of *Traité de génie civil de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, première édition, 2017.
- [3] Transports Lausannois. Réseau et flotte, Février 2020. URL : <https://www.t-l.ch/a-propos-des-tl/entreprise/reseau-et-flotte>.
- [4] PricewaterhouseCoopers. E-bus Radar. Wie Elektrisch wird der öffentliche Nahverkehr, Août 2019.
- [5] INFRAS. Verkehrsverbund Luzern - E-Bus-Strategie Schlussbericht, Avril 2019.
- [6] Office Fédéral des Transports. Stratégie énergétique 2050 dans les Transports Publics, Novembre 2018. URL : <http://www.bav.admin.ch/energie2050>.
- [7] litra. Voici des alternatives aux bus diesel, Mai 2019.
- [8] VerkehrsConsult Dresden-Berlin GmbH. Elektrifizierung von Bussflotten in der Schweiz. Leitfaden zur Flottenelektrifizierung, Novembre 2019.
- [9] RBS BSU. Vom Dieselbus zum Elektrobus - wo ist die Gebrauchsanweisung?, Janvier 2020.
- [10] Verkehrsbetriebe der Stadt Zürich (VBZ). Erfahrungsbericht : Elektrisch in die Zukunft : Batteriebusse im Test bei den VBZ, 2019. URL : <https://www.stadt-zuerich.ch/vbz/de/index/mobilitaet-der-zukunft/elektromobilitaet/probebetriebe-mit-batteriebussen/probebetriebe/ergebnisbericht-probebetriebe-batteriebusse.html>.
- [11] VoeV-Arbeitsgruppe KTBB in Zusammenarbeit mit dem Schweizerischen Feuerwehrverband. Behelf für die Einführung von batteriebetriebenen Bussen im Linienverkehr.
- [12] U.S. Department of Transportation (DoT) Federal Transit Administration. Peak Demand Charges and Electric Transit Buses, Janvier 2014. URL : <https://calstart.org/wp-content/uploads/2018/10/Peak-Demand-Charges-and-Electric-Transit-Buses.pdf>.
- [13] UITP. UITP Project E-Sort. Cycles for electric vehicles, Juillet 2017. URL : <https://www.uitp.org/news/E-SORT-addendum>.
- [14] Aurélien Lièvre. *Développement d'un système de gestion de batterie lithium-ion à destination de véhicules "mild hybrid" - Détermination des indicateurs d'état (SoC, SoH et SoF)*. PhD thesis, Université Claude Bernard - Lyon I, 2015.
- [15] Verkehrsbetriebe STI. Analyse verschiedener Batterietechnologien, Mars 2016.
- [16] Paul Scherrer Institute. La mobilité de demain, Janvier 2020. URL : https://www.psi.ch/sites/default/files/2020-02/5232_1-2020_F.pdf.
- [17] OppCharge. OppCharge - Fast charging and electric vehicles, Mai 2020. URL : <https://www.oppcharge.org/>.
- [18] Siemens AG. Charging systems for e buses, Mai 2020. URL : <https://new.siemens.com/global/en/markets/transportation-logistics/electromobility/ebus-charging.html>.

- [19] ABB. Connector charging solutions for electric bus and e-truck, Mai 2020. URL : <https://new.abb.com/ev-charging/products/depot-connector-charging>.
- [20] Verkehrsbetriebe Schaffhausen. Die ÖV-Zukunft für Schaffhausen beginnt jetzt ! Schaffhausen stellt um auf Elektrobusse, 2017.
- [21] Stadt Schaffhausen. Stadt Schaffhausen : Alle drei städtischen Vorlagen angenommen. Die Stimmberechtigten der Stadt Schaffhausen haben alle drei städtischen Vorlagen gutgeheissen. News, Novembre 2019. URL : http://www.stadt-schaffhausen.ch/News.316.0.html?&tx_ttnews%5Btt_news%5D=2634&cHash=a797a0d0bcc81367baa75f4836ded338.
- [22] Verkehrsbetriebe Zürich. eBus VBZ Elektrisch in die Zukunft, 2017.
- [23] Union des transports publics. Interview de Ralf Eigenmann, directeur des transports publics de St-Gall, Septembre 2019. URL : https://www.voev.ch/fr/Services/content_index.php?section=downloads&download=16933&usg=AOvVaw3f144UkUCGq1xN8p9_UZ4b.
- [24] Transports publics genevois. Rapport annuel de gestion 2018, 2019. URL : <https://www.tpg.ch/sites/default/files/2019-11/Rapport%20annuel%20de%20gestion%20tpg%202018.pdf>.
- [25] Riccardo Scarinci, Alessandro Zanarini, and Michel Bierlaire. Electrification of urban mobility : the case of catenary-free buses, Octobre 2018.
- [26] ABB Suisse. TOSA-Animation FR, Novembre 2016. URL : <https://www.youtube.com/watch?v=TSZczkW7n5Q>.
- [27] Tomáš Robenek, Jianghang Chen, Bilge Atasoy, and Michel Bierlaire. Tactical Design of Electric Bus Network using Optimization Tools. 26th European Conference on Operational Research, Juillet 2013. URL : https://infoscience.epfl.ch/record/195941/files/Robenek_EURO_2013.pdf.
- [28] trolley :motion. City-News, Avril 2020. URL : <https://www.trolleymotion.eu/trolleynews/>.
- [29] Stadtbus Winterthur. Elektromobilität : Interessante Aspekte aus Sicht von Stadtbus Winterthur, Juin 2019.
- [30] Union des transports publics. Des mesures fortes pour des transports respectueux du climat, Juin 2019.
- [31] UITP Europe. Clean Vehicles directive : Assessment of the Final Text, Juin 2019.
- [32] Dirk Sauer. Aktueller Stand der Entwicklungen von Batterietechnik und Batteriemarkt, Février 2019. doi:10.13140/RG.2.2.21154.48326.
- [33] Union des transports publics. Umfrage : Elektrobusse 2019-2016, 2018.
- [34] UITP. Public transport leaders forum's declaration. One Planet, one Plan, Septembre 2019. URL : <https://www.uitp.org/sites/default/files/Leaders%20Forum%20-%20Declaration%20One%20Planet,%20One%20Plan.pdf>.
- [35] Union des villes suisses et Union des transports publics. Elektromobilität/Umweltfreundliche Busse im Strassen-öV, Décembre 2018.
- [36] Alexander Kunith, Roman Mendelevitch, Anne Kuschmierz, and Dietmar Göhlich. Optimization of fast charging infrastructure for electric bus transportation – electrification of a city bus network, Juin 2016.

- [37] Alexander Kunitz, Dietmar Göhlich, and Roman Mendelevitch. Planning and optimization of a fast-charging infrastructure for electric urban bus systems, Novembre 2014.
- [38] Jari Vepsäläinen, Klaus Kivekäs, Kevin Otto, Antti Lajunen, and Kari Tammi. Development and validation of energy demand uncertainty model for electric city buses. *Transportation Research Part D : Transport and Environment*, 63 :347–361, Août 2018. doi:10.1016/j.trd.2018.06.004.
- [39] Yajing Gao, Shixiao Guo, Jiafeng Ren, Zheng Zhao, Ali Ehsan, and Yanan Zheng. An Electric Bus Power Consumption Model and Optimization of Charging Scheduling Concerning Multi-External Factors. *Energies*, 11, Juillet 2018. doi:10.3390/en11082060.
- [40] Mariana Teixeira Sebastiani, Ricardo Lüders, and Keiko Verônica Ono Fonseca. Evaluating Electric Bus Operation for a Real-World BRT Public Transportation Using Simulation Optimization. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 17 :1–10, Février 2016. doi:10.1109/TITS.2016.2525800.
- [41] Philipp Sinhuber, Werner Rohlf, and Dirk Uwe Sauer. Study on power and energy demand for sizing the energy storage systems for electrified local public transport buses. *2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Octobre 2012. doi:10.1109/VPPC.2012.6422680.
- [42] Maria Xylia, Sylvain Leduc, Piera Patrizio, Semida Silveira, and Florian Kraxner. Developing a dynamic optimization model for electric bus charging infrastructure. *Transportation Research Procedia*, 27 :776–783, 2017. doi:10.1016/j.trpro.2017.12.075.
- [43] Valentina Conti, Silvia Orchi, Maria Pia Valentina, Marialisa Nigro, and Raffaella Calò. Design and evaluation of electric solutions for public transport. *Transportation Research Procedia*, 27 :117–124, 2017. doi:10.1016/j.trpro.2017.12.033.
- [44] Ran Wei, Xiaoyue Liu, Yi Ou, and Kiavash Fayyaz. Optimizing the spatio-temporal deployment of battery electric bus systems. *Journal of Transport Geography*, 68 :160–169, Avril 2018. doi:10.1016/j.jtrangeo.2018.03.013.
- [45] Malin Andersson. Energy storage solutions for electric bus fast charging stations : Cost optimization of grid connection and grid reinforcements, 2017.
- [46] Yusheng Wang, Yongxi Huang, Jiuping Xu, and Nicole Barclay. Optimal recharging scheduling for urban electric buses : A case study in Davis. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, 100 :115–132, April 2017. doi:10.1016/j.tre.2017.01.001.
- [47] Matthias Rogge, Evelien Van der Hurk, Allan Larsen, and Dirk Uwe Sauer. Electric bus fleet size and mix problem with optimization of charging infrastructure. *Applied Energy*, 211 :282–295, Février 2018. doi:10.1016/j.apenergy.2017.11.051.
- [48] Lucien Borel and Daniel Favrat. *Thermodynamique et énergétique*, volume 1, De l'énergie à l'exergie. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, deuxième édition, 2011.
- [49] Office Fédéral des Transports. Arrêts des transports publics (id 98.2), 2019. URL : <https://www.bav.admin.ch/bav/fr/home/themes-a-z/geoinformation/geodonnees-de-base/arrets-des-transports-publics.html>.
- [50] Office Fédéral de la Statistique. Poids moyen (en kg) (enquête suisse sur la santé), 2019. URL : <https://www.bfs.admin.ch/bfs/fr/home/statistiques/sante.assetdetail.7586020.html>.

- [51] Office Fédéral de météorologie et climatologie MétéoSuisse. Normes climatologiques Pully : Période de référence 1981 - 2010, 2020. URL : https://www.meteosuisse.admin.ch/product/output/climate-data/climate-diagrams-normal-values-station-processing/PUY/climsheet_PUY_np8110_f.pdf.