



Rapport final du 11 décembre 2020

TOSA Ligne 23

Le bus électrique du futur à Genève



Source: ©Thierry Parel, TPG, 2018



Date: 11 décembre 2020

Lieu: Berne

Prestataire de subventions:

Office fédéral de l'énergie OFEN
Section Recherche énergétique et cleantech
CH-3003 Berne
www.ofen.admin.ch

Bénéficiaires de la subvention :

République et canton de Genève, soit pour elle le Conseil d'Etat, représenté par le
Département des infrastructures
Rue de l'Hôtel-de-Ville 14
1204 Genève

Transports publics genevois
Route de la Chapelle 1
1212 Grand-Lancy

ABB Sécheron Ltd
Rue des Sablières 4-6
1217 Genève

Office de Promotion des Industries et des Technologies
Chemin du Pré-Fleuri 3
1228 Plan-les-Ouates

Services industriels genevois
Chemin du Château-Bloch 2
1219 Le Lignon

Auteur(s):

Nicolas Simond, Office cantonal des transports, nicolas.simond@etat.ge.ch
Thierry Wagenknecht, Transports publics genevois, wagenknecht.t@tpg.ch
Olivier Augé, Transports publics genevois, auge.olivier@tpg.ch

Suivi du projet à l'OFEN:

Men Wirz, men.wirz@bfe.admin.ch

Numéro du contrat de l'OFEN: SI/501290-01

Les auteurs sont seuls responsables du contenu et des conclusions du présent rapport.



Zusammenfassung

Der TOSA-Bus ist ein 100% elektrischer Gelenkbus, der sich während der gesamten Fahrt, in 20 Sekunden, wenn das Fahrzeug an einem Bahnhof hält, und in 4 bis 5 Minuten, wenn sich das Fahrzeug an seiner Endstation befindet, mit der sogenannten Flash-Ladetechnik auflädt. Dies bringt dem TOSA-Bus mehrere Vorteile gegenüber einem herkömmlichen Dieselbus (er ist umweltfreundlicher und leiser) und bietet gleichzeitig mehr Flexibilität als ein trolleybus. Diese Technologie bedeutet damit das Ende der Staus in den Innenstädten und Stadtentwicklungsgebieten über Fahrleitungen.

Nach mehr als einem Jahr der Erprobung mit einem Demonstrator zwischen 2013 und 2014 ist die Technologie für den Einsatz in einer Pilotlinie des Genfers öffentlichen Verkehrs (TPG) ausgereift. Es ist die Berufung dieses Projekts "TOSA Linie 23: der Elektrobus der Zukunft in Genf", das es der Linie 23 des TPG ermöglichen wird, einen Energiewechsel von Diesel zu 100% elektrisch zu vollziehen. Es ist der Vorläufer der Energiewende im Bereich der Hochleistungsbusse.

Technisch waren einige innovationsbedingte Anpassungen notwendig, vor allem bei den Batterien und deren Einsatz in der sehr "harten" Umgebung eines Busses im Stadtbetrieb, aber auch bei den Geräten, die direkt an der Last entweder am Fahrzeug oder an den Stationen angebracht sind. An diesem letzten Punkt wurden Verbesserungen vorgenommen, um die Geräusche während des Aufladens zu reduzieren und auch, um diese Sequenz sowohl bei der Annäherung an die Station als auch bei der Verbindung zuverlässiger zu machen.

Wirtschaftlich gesehen sind die Betriebskosten nach 18 Monaten Betrieb geringer als die von Trolleybussen. Dieses Ergebnis ist nur vorübergehend, da mehrere Wartungsarbeiten noch unter Garantie laufen. Aus energetischer Sicht ist es durch das Projekt gelungen, alle Bus- und Stationsverbraucher zu identifizieren. Durch die Rückgewinnung der Bremsenergie und den Wirkungsgrad der Permanentmagnetmotoren hat der Bus eine besonders interessante Energiebilanz an der Traktion.

Résumé

Le bus TOSA est un bus articulé 100% électrique qui se recharge grâce à la technique dite du biberonnage tout au long de son trajet, en 20 secondes lorsque le véhicule s'arrête en station et en 4 à 5 minutes lorsque le véhicule est à son terminus. Cela confère au bus TOSA plusieurs avantages par rapport à un bus diesel classique (il est plus écologique et plus silencieux) tout en lui donnant plus de flexibilité qu'un trolleybus. Cette technologie signifie ainsi la fin de l'encombrement des centres-villes et des zones de développement urbain par les lignes de contact. Le bus TOSA est le précurseur de la transition énergétique dans le domaine des bus à grande capacité.

Après plus d'une année de tests à l'aide d'un démonstrateur entre 2013 et 2014, la technologie est mature pour un déploiement sur une ligne pilote des Transports publics genevois (TPG). C'est la vocation de ce projet « TOSA Ligne 23 : le bus électrique du futur à Genève » qui va permettre à la ligne 23 des TPG d'effectuer une transition énergétique du diesel au 100% électrique.

Techniquement, quelques ajustements liés à l'innovation ont été nécessaires, principalement sur les batteries et leur utilisation dans l'environnement très « dur » d'un bus en exploitation urbaine, mais aussi sur les équipements directement rattachés à la charge soit sur le véhicule ou sur les stations. Sur ce dernier point des améliorations ont été apportées pour atténuer le bruit lors de la recharge et aussi pour fiabiliser cette séquence tant dans l'approche de la station et la connexion.



Economiquement, les coûts d'exploitation après 18 mois d'exploitation sont inférieurs à ceux des trolleybus. Ce résultat est à provisoire car plusieurs opérations de maintenance sont encore sous garantie. Du point de vue énergétique, le projet a permis de recenser tous les consommateurs du bus et des stations. Le bus présente un bilan énergétique particulièrement intéressant sur la traction grâce à la récupération d'énergie de freinage et l'efficacité des moteurs à aimant permanent.

Summary

The TOSA bus is a 100% electric articulated bus that recharges itself using the so-called Flash charging technology throughout its journey, in 20 seconds when the vehicle stops at a station and in 4 to 5 minutes when the vehicle is at its terminus. This gives the TOSA bus several advantages over a conventional diesel bus (it is more environmentally friendly and quieter) while giving it more flexibility than a trolleybus. This technology thus means the end of congestion in city centres and urban development areas through contact lines. The TOSA bus is the precursor of the energy transition in the field of high-capacity buses.

After more than a year of testing with a demonstrator between 2013 and 2014, the technology is mature for deployment on a Geneva Public Transport (TPG) pilot line. It is the vocation of this project "TOSA Line 23: the electric bus of the future in Geneva" which will enable line 23 of the TPG to make an energy transition from diesel to 100% electric.

Technically, some adjustments related to innovation were necessary, mainly on the batteries and their use in the very "hard" environment of a bus in urban operation, but also on the equipment directly attached to the load either on the vehicle or at the stations. On this last point, improvements have been made to reduce noise during recharging and to make this sequence more reliable both in the approach to the station and the connection.

Economically, the operating costs after 18 months of operation are lower compared to trolleybuses. This result is only temporary as several maintenance operations are still under warranty. From an energy point of view, the project has made it possible to identify all the consumers of the bus and the stations. The bus has a particularly interesting energy balance on traction thanks to the recovery of braking energy and the efficiency of the permanent magnet motors.



Take-home messages

Etat de Genève et Transports publics Genevois

- Il n'y a pas de sujet trop technique dans une communication « grand public » dans le cadre des projets phares de transition énergétique. Les « profanes » sont au fait des enjeux liés à l'électromobilité et à l'environnement, tels que la « propreté » de la production électrique ou le recyclage des batteries.
- La grande capacité électrique confirmée : le projet de la Ligne 23, exploité en horaire régulier avec une flotte de 12 bus articulés ayant parcouru plus de 1'400'000 km fin août 2020, démontre que l'exploitation en grande capacité (bus homologué pour 132 passagers) est réalisable en 100% électrique et ceci avec une batterie de très faible capacité (72 kWh).
- Coûts de conduite identique au diesel : le principe de biberonnage au terminus et quelques arrêts a démontré sa capacité à conserver la même vitesse commerciale, les mêmes temps aux terminus et la même part des parcours haut le pied qu'en diesel. Ainsi, la transition énergétique peut être envisagée sans augmentation des coûts de conduite.
- Fiabilité et faible empreinte environnementale : l'expérience sur les 1'400'000 km parcourus, montre que la fiabilité et la disponibilité n'a pas été compromise par les objectifs très ambitieux en termes de développement durable, en particulier en ce qui concerne les batteries. En premier lieu, en phase de dimensionnement, la batterie de seulement 72 kWh permet d'utiliser très peu de matière première. Ensuite, grâce au biberonnage les cycles de recharges sont optimisés et offre une perspective de durée de vie de 10 ans, c'est-à-dire 600'000km ou 8'300 km/kWh de batterie. A ce stade, soit à environ 20% de leur vie, les performances sont conformes aux attentes.
- Une efficacité énergétique encore améliorable : côté véhicule, dans la pratique la nouvelle chaîne de traction avec moteur à aimant permanent et réducteur à rapport réduit, qui est une évolution vis-à-vis des trolleybus, confirme une amélioration des performances énergétiques en mode moteur et récupération. Des pistes d'améliorations côté confort pour le chauffage et la climatisation ont été identifiés afin d'améliorer sensiblement l'efficacité énergétique. Côté infrastructure, l'efficacité énergétique aux terminus et dépôt est très bonne et conforme aux attentes. L'efficacité des stations Flash est plus pénalisée par la climatisation que par les pertes des batteries tampons.

ABB

- La transition vers une mobilité durable dans les transports publics n'est pas juste un simple achat de bus électriques pour remplacer les bus à énergie fossile ! Il faut comprendre l'ensemble de la démarche pour que cette dernière soit viable. En effet, le coût d'investissement reste plus élevé aujourd'hui pour un bus électrique et c'est donc dans les coûts opérationnels que les économies peuvent être faites. Les bus électriques nécessitent moins de maintenance que leurs prédécesseurs pour autant que les infrastructures de recharge, les coûts de l'électricité incluant les coûts de raccord au réseaux, le vieillissement des batteries soient maîtrisés. Cela implique donc d'avoir mis en place des systèmes de supervision et de contrôle (SCADA) des équipements roulants et fixes pour mieux les gérer mais aussi d'avoir mis en place un système de la gestion de la maintenance afin de réduire et de mieux planifier cette dernière.



- Plus la gestion de la flotte sera optimisée moins de bus de réserve seront nécessaires et moins de CAPEX seront immobilisés. Les TPG ont été pionniers dans ce domaine. Fort de leur expérience avec un réseau comprenant des bus diesels, des trolleys et des Tramways, il leur a été apparu évidemment que dans le cadre de l'exploitation de la ligne 23 TOSA, un nouveau système de contrôle/commande leur serait nécessaire. Ce système permet aujourd'hui de tracer l'efficacité énergétique de la ligne entière, de comprendre les consommations en direct de chaque bus et bien sûr d'avoir les leviers nécessaires pour améliorer les coûts opérationnels de la ligne. Il est aussi donc possible de mieux contrôler le vieillissement des batteries. Cela ouvre la porte dans un futur proche d'envisager des appels d'offre avec des clauses de performance énergétiques, de disponibilité de la ligne et de maîtrise des coûts opérationnels.

Services industriels de Genève

- L'électrification est la principale résultante des enjeux de décarbonisation de notre société. En tant qu'acteur de la transition énergétique, SIG soutient l'évolution des besoins de ses clients et notamment l'ambition d'électrification de la flotte des bus de transport public sur le canton.
- Les choix techniques de TOSA imposent au gestionnaire de réseau de distribution à être innovant et à adapter son réseau afin de répondre à ces nouvelles contraintes et besoins des TPG.
- Une gestion optimisée de la charge des stations est à mettre en œuvre afin d'y minimiser les effets induits sur le réseau, notamment par un report de charge et une gestion du réactif.
- Le réseau électrique pourrait bénéficier de solutions orientées flexibilité, grâce aux infrastructures électriques de TOSA comme les batteries des stations des bus, ceci dans un but de lissage de la courbe de charge. La flexibilité générée par le biais de ces nouvelles solutions intégrées aux infrastructures ainsi que l'apport de nouvelles technologies de gestion de données, ouvriront un potentiel de valorisation de ces dernières, s'intégrant dans le cadre offert aujourd'hui par le plan directeur des Energies de l'Etat de Genève.



Table des matières

Zusammenfassung	3
Résumé	3
Summary	4
Take-home messages	5
Table des matières	7
Liste des abréviations	9
1 Introduction	10
1.1 Contexte et arrière-plan.....	10
1.2 Justification du projet.....	10
1.3 Objectifs du projet.....	11
2 Description des installations	12
2.1 Infrastructure TOSA.....	12
2.1.1 La technologie développée pour la recharge	12
2.1.2 Modifications apportées en cours de projet.....	20
2.2 Matériel roulant TOSA.....	21
2.2.1 Energy Transfer System.....	21
2.2.2 Chaîne de traction et équipements auxiliaires	26
2.2.3 Modifications apportées en cours de projet.....	28
3 Procédure et méthode	29
3.1 Structure du système d'information pour le suivi de l'exploitation de la ligne 23 TOSA	29
3.1.1 Suivi de la consommation énergétique	31
3.2 Volet sociologique	32
3.2.1 Problématique et objectifs de la démarche d'enquête sociologique	32
3.2.2 Méthodologie d'enquête déployée	33
3.2.3 Cibles atteintes	34
4 Résultats et commentaire	36
4.1 Exploitation du système TOSA.....	36
4.1.1 Comparaison de l'exploitation entre bus diesel et bus TOSA	36
4.1.2 Consommation énergétique	38
4.1.3 Suivi de la consommation énergétique	43
4.2 Comparaison des coûts complets	50
4.2.1 Coûts d'investissement.....	50
4.2.2 Coûts complets d'exploitation.....	51
4.3 Volet sociologique	52
5 Conclusions et résumé	55



6	Aperçu et mise en œuvre prochaine	57
7	Coopération nationale et internationale.....	58
7.1	Coopération nationale	58
7.1.1	Projet «Swiss Trolley plus», Zürich	58
7.2	Coopération internationale	58
7.2.1	E-Busway de Nantes - France.....	58
7.2.2	E-Busway de Brisbane - Australie	59
7.2.3	Séminaire de l'Union internationale des transports publics (UITP) sur les bus électriques à Genève	59
7.2.4	Salon "Busworld 2017" – Courtrai (B) : présentations du projet TOSA et des applications dérivées	59
7.2.5	Assises européennes de la transition énergétique à Genève.....	60
8	Communication	61
8.1	Communication mise en place préalablement la mise en service commerciale.....	61
8.2	Communication mise en place depuis la mise en service commerciale	64
9	Annexes.....	66
10	Liste des figures et tableaux	67



Liste des abréviations

CODIR	Comité directeur
COMCOM	Comité de communication
COPOL	Comité politique
COTEC	Comité technique
DFS	Stations au dépôt (Depot Feeding Station - DFS)
FFS	Stations flash (Flash Feeding Station – FFS)
LAC	Ligne aérienne de contact
MR	Matériel roulant
OCT	Office cantonal des transports
OPI	Office de promotion des industries et des technologies
SIG	Services industriels genevois
SoC	State of charge (niveau de charge d'une batterie)
STECO	Steering committee
TC	Transports collectifs
TFS	Stations terminales (Terminal Feeding Station - TFS)
TPG	Transport publics genevois
TRL (7)	Technology readiness level - Niveau 7



1 Introduction

1.1 Contexte et arrière-plan

La transition énergétique vers l'électromobilité dans le domaine des transports collectifs est un axe majeur des plans stratégiques des autorités organisatrices, des entreprises exploitantes et des fabricants de bus. Citons à ce titre la stratégie « Bus 2025 » de la Régie autonome des transports parisiens (RATP) pour un parc de bus 100% propre à l'horizon 2025 .

L'Etat de Genève et les Transports publics genevois (TPG) partagent aussi cette ambition qui se retrouve aussi bien dans le Plan d'action des transports collectifs 2020-2024 (PATC 20-24) que dans le plan stratégique « Cap 2030 » des TPG : à l'horizon 2030, toutes les lignes urbaines principales actuellement exploitée en bus thermiques devront être exploitées avec des véhicules électriques. Selon le PATC 20-24, en 2024, la part des kilomètres produits en mode électrique sera de 48% alors qu'elle n'est encore que de 36% en 2019. L'objectif à l'horizon 2030 est d'atteindre une part d'offre produite électriquement d'environ 70% .

Cependant, cette transition énergétique ne devra, dans le cas du Canton de Genève, pas se faire vers le mode trolleybus. En effet, les considérations au regard des enjeux d'aménagement et de la qualité des espaces publics ne militent pas pour la construction de nouvelles infrastructures électriques linéaires.

A ce jour l'alimentation en électricité des tramways et des trolleybus se fait par ligne de contact aérienne (LAC) positionnées à 5.8 m au-dessus de la chaussée, et ce, tout au long de l'itinéraire de ces derniers. Ce système d'alimentation connu et maîtrisé, met en avant trois principales problématiques. La première est la mise en place des LAC qui est coûteuse et complexe en termes d'installation et d'entretien. La seconde problématique rencontrée, est que le véhicule doit être en contact permanent avec les lignes aériennes. Ceci ayant pour effet une très faible modularité de l'itinéraire lors de l'exploitation (déviation liée à des travaux, modification de l'itinéraire, etc.) Finalement, les enjeux actuels de qualité d'espace public militent pour libérer le paysage urbain des mâts et câbles plutôt que d'en rajouter.

Les bus électriques avec des batteries sont apparus sur le marché international principalement sur le segment des bus de faible capacité puis moyenne (12 mètres, 50 voyageurs) et seulement plus récemment sur les grandes capacités (18-24 mètres de long, 110-150 voyageurs), qui reste encore marginal. En effet, le marché des bus électriques est déjà très investi par les constructeurs de bus à propulsion thermique mais principalement sur le segment de bus de capacité moyenne. Lors du démarrage du démonstrateur en 2011, il n'y avait aucun acteur significatif sur le segment des bus de grande capacité. C'est pour répondre à cette demande que les partenaires historiques ce sont réunis autour de cette ambition.

1.2 Justification du projet

Le présent projet a pour objectif de répondre aux enjeux de la transition énergétique des bus diesel vers les bus électriques sur le segment spécifique des bus de grande capacité exploités à forte cadence (BHNS - Bus à haut niveau de service / BRT - Bus rapid transit).

Il s'agit de démontrer qu'une technologie permet de répondre à ces schémas d'exploitation d'axes forts bus et qu'elle s'adapte aux opérations des exploitants de transports publics sans complètement changer les processus d'exploitation. En effet, à l'époque du démarrage de ce projet phare, en 2015, les quelques fournisseurs actifs sur ce segment proposaient principalement des bus avec des recharges dites « par opportunité » aux terminus en 10-15 minutes, complétées par des recharges



nocturnes de plusieurs dizaines de minutes. Cela ne permet pas une exploitation économiquement intéressante des lignes BHNS comparé aux bus diesel car cela nécessite plus de véhicules et de chauffeurs du fait du temps de recharge incompatible avec une durée de remise à l'heure de l'ordre de 5-6 minutes au terminus.

C'est la finalité de cette technologie TOSA qui doit permettre une exploitation du matériel roulant totalement comparable à celle des bus diesel, au regard de la disponibilité des véhicules et de leur souplesse d'exploitation par rapport aux horaires (temps d'arrêt en ligne et aux terminus).

1.3 Objectifs du projet

L'objectif principal de ce projet est de valider la technologie TOSA sur une ligne de transport public en exploitation commerciale, principalement dans sa composante économique, tout en intégrant les évolutions technologiques des composants, aussi bien ceux embarqués dans le bus que ceux se trouvant dans les infrastructures électriques aux stations de recharge. En effet, même si la maturité technologique du démonstrateur est déjà élevée, équivalente au niveau TRL 7, les évolutions technologiques sont encore importantes dans le domaine de certains composants, tels que dans le bras de transfert d'énergie, dans les systèmes de stockage d'énergie ou encore dans les auxiliaires de confort (chauffage, climatisation).

Concernant les coûts d'exploitation théoriques évalués jusqu'à présent, ils ont nécessité une validation pratique en exploitation commerciale afin de démontrer la viabilité économique de la technologie. Cela a passé notamment par un monitoring de la consommation énergétique d'une série complète de véhicules ainsi que des coûts de connexion et de consommation au réseau électrique.

Un second volet important est celui de la perception de la technologie TOSA et de l'effet de celle-ci sur les usagers. Une attente forte est placée sur cette technologie comme élément dynamisant de la ligne pilote. Il sera ainsi intéressant d'évaluer si cette technologie attire de nouveaux usagers et d'analyser la perception qu'en ont les usagers et les riverains.

Un troisième volet est celui de l'impact sur le réseau électrique et l'aspect Smart Grid. En effet, dans le cadre du démonstrateur entre Palexpo et l'Aéroport de Genève, les Services industriels genevois (SIG) ont participé au projet afin d'acquérir des compétences liées au stockage d'énergie pour lisser la charge et profiter d'un projet grandeur nature pour aborder les défis des réseaux intelligents (Smart Grid). En dehors des applications relatives aux transports publics, ces derniers apportent aux exploitants de réseaux électriques une réponse à l'augmentation de la part d'énergie renouvelable, non planifiée, injectée sur le réseau par les petits producteurs.



2 Description des installations

La technologie TOSA s'articule autour de deux systèmes que sont les infrastructures de recharge et les véhicules. Le cœur de l'innovation se trouve notamment dans l'interface de transfert de l'énergie entre les stations et les bus. Il s'agit de l'ETS (energy transfer system), un bras de recharge situé sur le toit du véhicule qui se déploie automatiquement à l'approche d'une station de recharge puis se positionne dans un rail de recharge grâce à un capteur laser, sans aucune intervention du conducteur et en à peine une seconde.

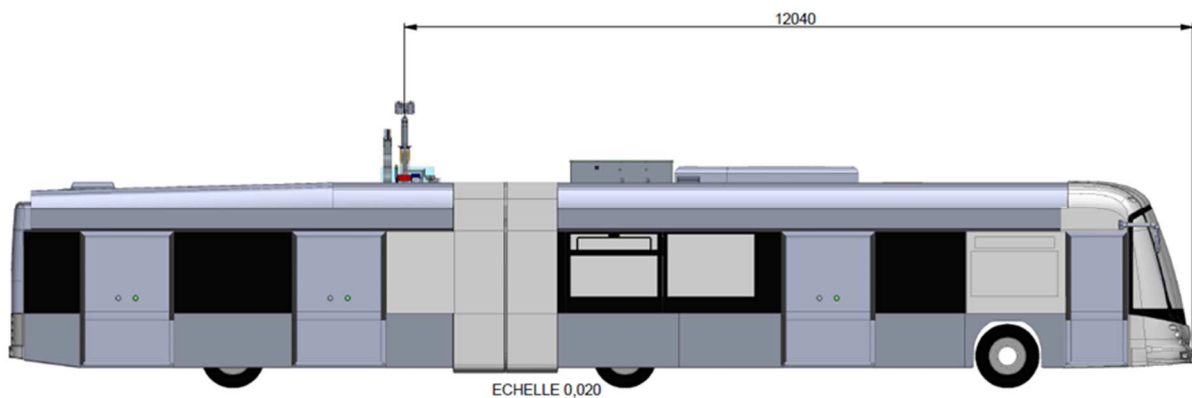


Figure 1 : Positionnement de l'ETS sur le véhicule TOSA. Source : ABB, 2014.

2.1 Infrastructure TOSA

2.1.1 La technologie développée pour la recharge

En complément du système de transfert d'énergie installé sur le toit des bus, la technologie TOSA est aussi constituée de stations de recharge localisées à certains arrêts le long du parcours qui permettent le transfert d'énergie entre le réseau électrique et les batteries des véhicules.

Il existe trois types de stations de recharge:



- Stations flash (Flash Feeding Station – FFS) - 13 exemplaires

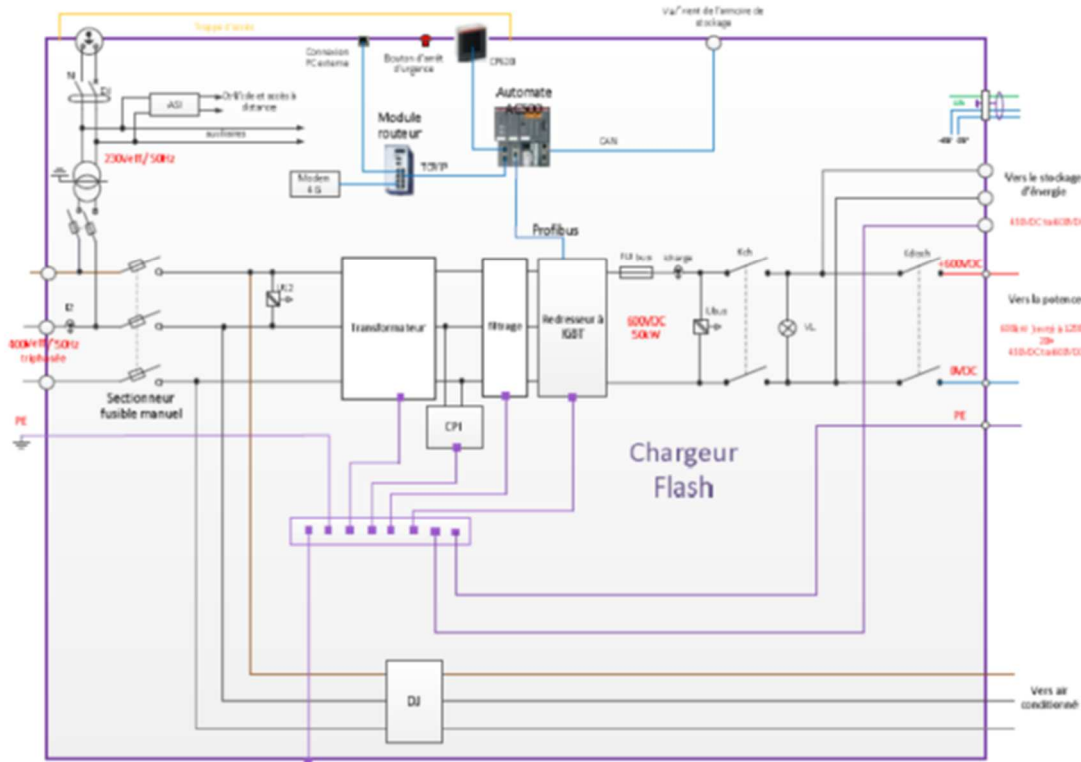


Figure 2 : Chargeur Flash à titre indicatif. Source : ABB, 2014.

- Stations terminales (Terminal Feeding Station - TFS) - 3 exemplaires

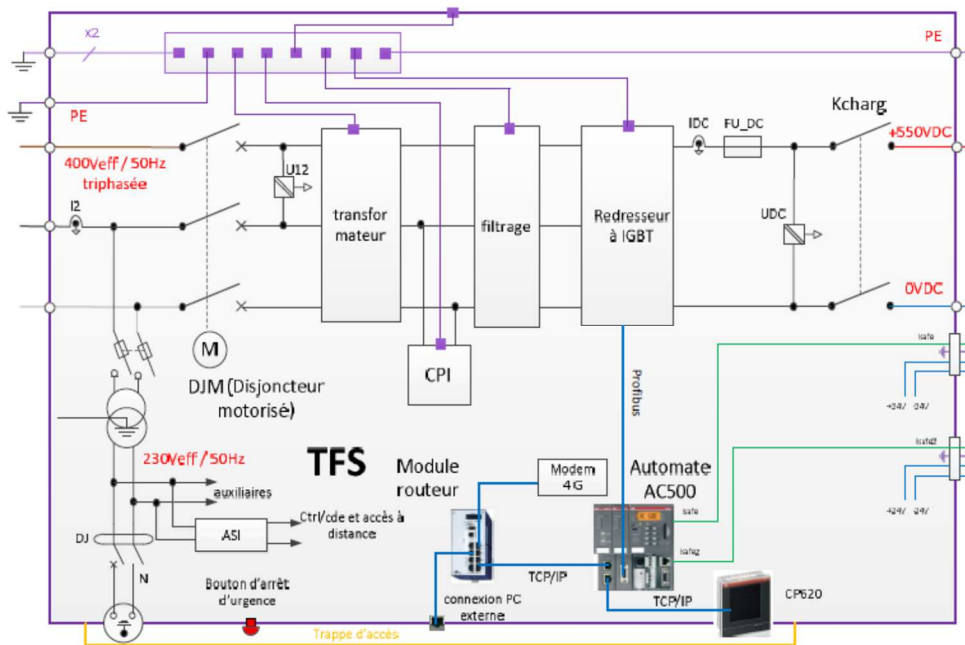


Figure 3 : Chargeur terminal à titre indicatif. Source : ABB, 2014.



- Stations au dépôt (Depot Feeding Station - DFS) - 4 exemplaires

Les **stations flash** ont pour fonction de recharger partiellement les batteries embarquées des bus en temps masqué pendant le temps de montée et descente des passagers aux arrêts, soit 20 secondes. Elles sont équipées d'un module de stockage permettant un lissage des pointes de consommation électrique.

Il s'agit de batteries Lithium-Titanate-Oxyde (LTO). Ce choix est justifié par un volume et un coût beaucoup plus faible des batteries que les supercaps. Les batteries sont dimensionnées avec une capacité de stockage de 88 kWh, ce qui est surdimensionné afin de pouvoir fournir la pleine puissance ainsi que d'avoir un réservoir nécessaire pour gérer des trains de bus (un bus qui suit l'autre).

Les calculs de la durée de vie des batteries sont basés sur les hypothèses suivantes :

- Cadence maximale de passage des véhicules : 10 minutes en heures de pointes
- Cycle de charge/décharge dimensionné en conséquence :
 - o Charge LTO : ~50 kW pendant < 6 minutes
 - o Décharge LTO : ~600 kW pendant 20 secondes

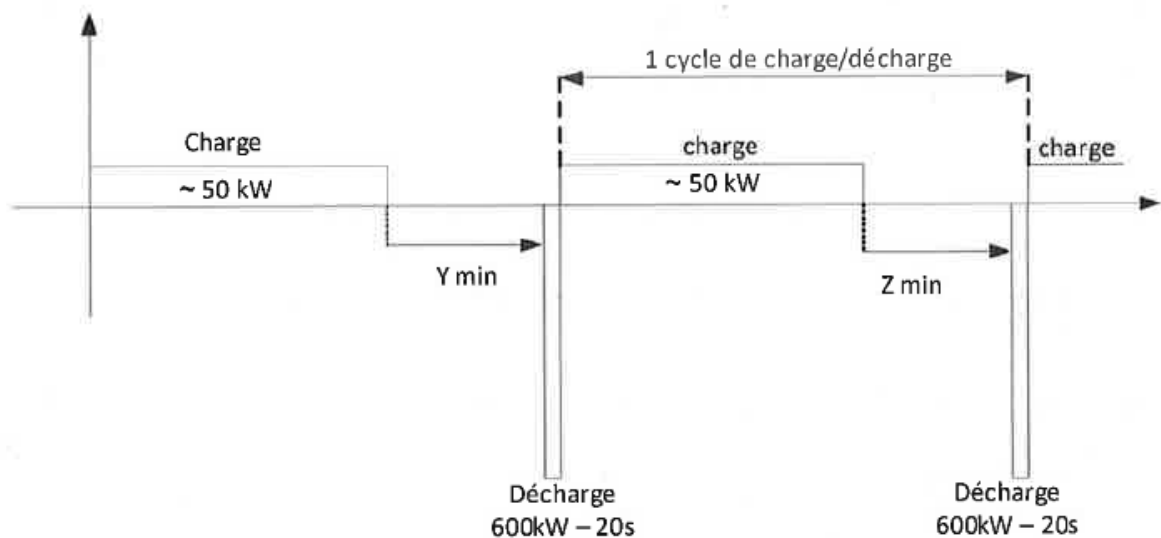


Figure 4 : Cycle de charge/décharge des modules de batteries Lithium-ion. Source : ABB, 2016.

Avec Y, Z = temps sans charge ou sans décharge

- Durée journalière d'application du cycle charge/décharge = 18h32min
- Total de cycles par an = 24'750 cycles

Ce cycle de charge/décharge permet d'estimer une durée de vie de 10 ans pour le module LTO des stations de recharge flash. Pour un fonctionnement optimal des batteries, il est nécessaire de maintenir une température inférieure à 45° dans le module de stockage d'énergie. Un refroidissement à eau a donc été étudié afin de maximiser la durée de vie des batteries.

Le bruit généré à l'extérieur de l'armoire par la climatisation, l'échangeur air/eau et les ventilations a fait l'objet d'une grande attention afin de maintenir le niveau des émissions sonores bien en deçà des limites légales de l'ordonnance sur la protection contre le bruit (OPB RS 814.41).



Une alimentation sans interruption (ASI) maintient l'alimentation automatique ainsi que le système de contrôle et d'acquisition de données (SCADA) des TPG durant quelques minutes. De plus, des éléments de sécurité (bouton d'arrêt d'urgence) et de connectivité (connexion externe type Ethernet pour raccordement d'un PC portable à des fins de maintenance et prise électrique) seront localisés derrière une trappe d'accès fermée à clé.

Les armoires des stations de recharge flash se situant à l'extérieur, en milieu ouvert, elles sont équipées d'un système de détection d'ouverture de la trappe ou de la porte principale. Une annonce est enregistrée dans le PLC.

Les **stations terminales** ont pour fonction le chargement complet des batteries des véhicules durant le temps de la remise à l'heure au terminus (4-5 minutes). Du fait du taux d'utilisation élevé (très faible intervalle de temps entre chaque recharge), ces stations ne sont pas équipées d'un module de stockage d'énergie (tel que batteries, supercapacités, etc.) qui permettraient de réduire la puissance de raccordement. Celle-ci est de 436 kVA, offrant une puissance de sortie de 400 kW environ.

Les stations terminales, étant critiques pour le fonctionnement de la ligne, sont conçues pour avoir un haut niveau de disponibilité et de fiabilité, ainsi qu'un rendement élevé.

Les études d'exploitation de la future ligne 23 ont déterminé la nécessité d'équiper également l'arrêt « Aéroport » avec une station de recharge terminale, utile notamment si l'exploitation de la ligne ne peut se faire entre l'aéroport et le terminus P+R P47 (perturbation en cas de forte fréquentation de Palexpo lors du Salon de l'automobile notamment). Le terminal « Aéroport » a été développé pour proposer les deux types de recharge suivants :

- En exploitation normale, il est utilisé comme un Flash (temps de recharge en 20 sec. – cf. ci-avant) mais avec une puissance de sortie limitée à 400 kW ;
- En exploitation dégradée (panne du terminal P+R47 ou retournement anticipé), il est utilisé comme un terminal.

Ainsi, la double fonction de cette station de recharge permet de préserver toute la souplesse d'exploitation nécessaire pour le bon fonctionnement de la ligne.

Les stations au dépôt ont pour fonction de compenser l'énergie utilisée par les véhicules pour revenir en fin de service au dépôt depuis le terminus. Ce trajet s'effectue en « haut le pied », c'est-à-dire sans passagers. Dans le cas d'une panne ne permettant pas la recharge suffisante des batteries du véhicule, ce trajet pourra s'effectuer sans les auxiliaires de confort (chauffage/climatisation), ce qui réduit au minimum la quantité d'énergie à compenser.

Deux stratégies de recharge au dépôt ont été initialement identifiées :

- A l'arrivée au dépôt : tout comme les véhicules thermiques font le plein à la station diesel avant d'entrer dans le dépôt, les bus TOSA peuvent faire une recharge à forte puissance en passant par un portique. En effet, une alimentation de type « terminale » à 400 kW permet de recharger suffisamment le véhicule en 2-5 minutes. L'avantage de cette solution est de ne pas devoir prévoir un emplacement spécifique pour les véhicules TOSA dans le dépôt. Cependant, pour le cas présent de la ligne 23, vu la taille du parc TOSA, cela ne constitue pas une contrainte dans l'immédiat mais peut le devenir à plus long terme lors de l'équipement de plusieurs lignes et avec un parc plus grand. De plus, cette solution nécessite malgré tout de conserver un chargeur de dépôt pour recharge par la prise, lors d'opérations de maintenance ou de secours (en cas de panne de la station de recharge principale) ;
- A l'emplacement de stationnement dans le dépôt : la recharge s'effectue à faible puissance, sur une plus longue durée, lorsque le véhicule est stationné à son emplacement réservé dans



le dépôt. Des voies de garage sont équipées de rail de recharge aériens, tels que ceux accrochés à la potence aux arrêts de la ligne. Ainsi, neuf des douze positions de stationnement sont équipées chacune d'un rail qui est connecté à une alimentation de dépôt dont l'intérêt est qu'elle est mutualisée pour quatre rails de recharge, afin de réduire les coûts d'investissement et les taxes de raccordement. En effet, une alimentation de dépôt est capable de gérer jusqu'à quatre bus séquentiellement, le premier bus connecté est le premier chargé. La puissance dans ce cas sera limitée à 50KW et la charge d'un bus ne devrait pas excéder 1h, ce qui signifie qu'en moins de 4h les quatre bus seront rechargés. Il faudrait donc trois alimentations dépôts (3 * 55KVA) pour assurer la recharge des douze bus. Cette solution nécessite aussi de prévoir une alimentation de dépôt pour recharge par la prise, lors d'opérations de maintenance.

Pour l'exploitation de la ligne 23 avec la technologie TOSA, c'est la deuxième stratégie de recharge qui a été choisie avec 3 prises en dernière position. La première stratégie pourra être considérée ultérieurement, lors du déploiement de la technologie TOSA sur d'autres lignes du réseau des TPG.

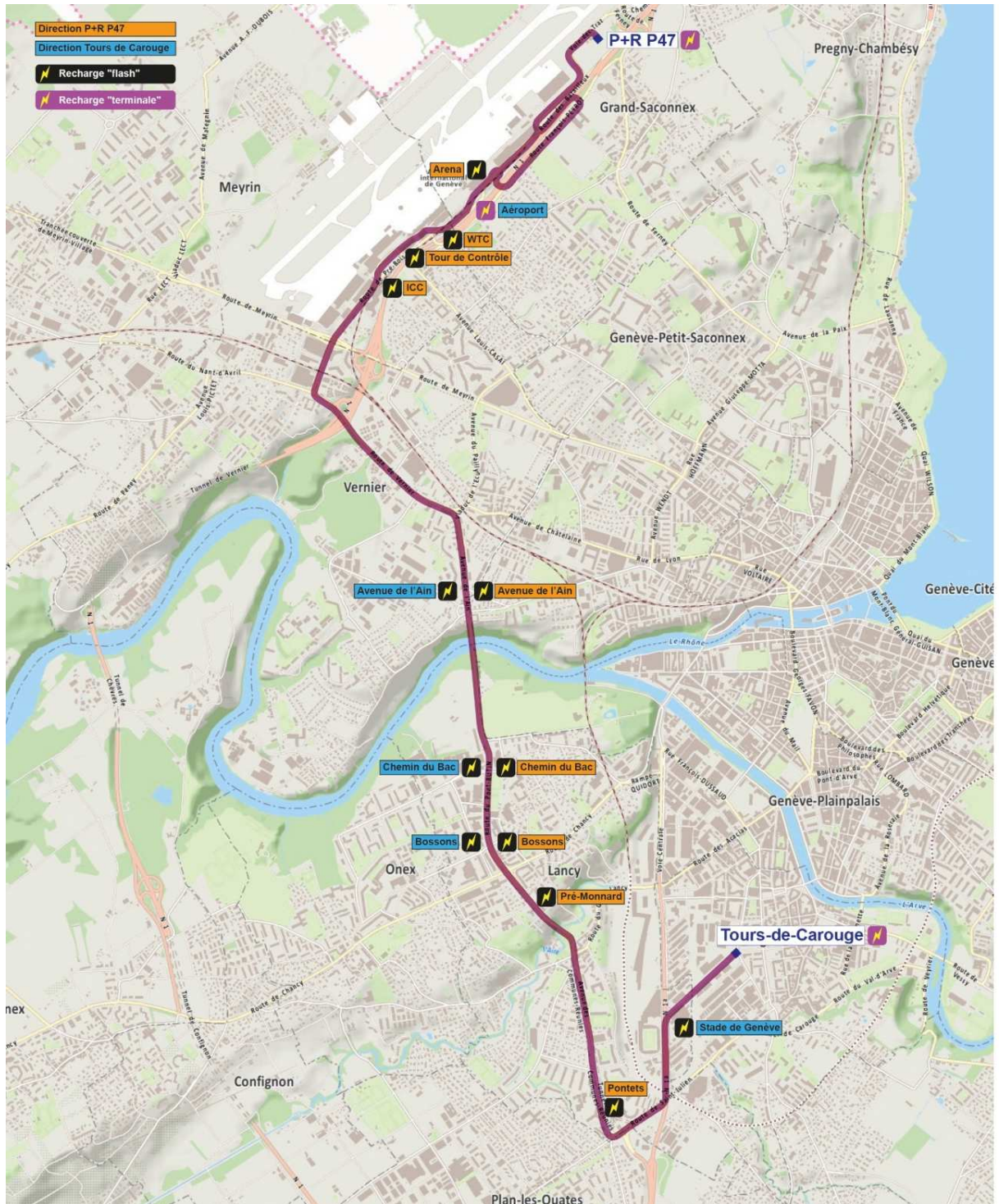


Figure 5 : Localisation des stations de recharge le long du parcours avec distinction par type et sens de circulation. Source : Nicolas SIMOND, 2015.

Une **potence de recharge** complète les infrastructures des stations flash et terminales. S'élevant à plus de 7 mètres, elle supporte un rail dans lequel vient se connecter le bras automatique articulé des véhicules. Ce rail, situé à une hauteur de 4.5 mètres au-dessus de la chaussée, permet le transfert d'énergie entre les armoires électriques et les batteries des bus. Lorsqu'aucun bras n'est connecté



dans le rail, il n'y a aucune présence de haute tension électrique dans la potence et dans le rail, pour une sécurité totale. Se faisant par contact, le transfert d'énergie ne génère qu'un champ électromagnétique très réduit, à la différence d'autres technologies de transfert d'énergie, telles que l'induction.



Figure 6 : Vues frontale et latérale de la potence de biais. Source : ABB, 2016.

L'installation des potences de recharge, dont le design devait la faciliter, s'est faite assez rapidement, en à peine une demi-journée par potence. Celles-ci étaient préassemblées à l'usine mais finalement pas précâblées, cela se faisant sur site lors de l'installation.



Figure 7 : Pose de la potence de recharge à l'arrêt Bossons, direction Carouge-Tours. Source : Nicolas SIMOND, 2017.



2.1.2 Modifications apportées en cours de projet

La production de série des potences de recharge a commencé en avril avec le prototype qui a été présenté à Turgi en juin 2017, simultanément avec le premier véhicule de série. Le prototype a ensuite été installé sur le site d'ABB Sécheron afin de permettre le déroulement des tests des véhicules et des infrastructures électriques.

Lors de ces phases de test, il est apparu que la potence de charge se déformait légèrement lors de la connexion du bras de l'ETS puis qu'un mouvement d'oscillation était induit à la déconnexion du système. Cette oscillation de +/- 4 cm sur le plan horizontal ne compromet en rien la sécurité de l'installation mais peut être visuellement interpellant.

ABB Sécheron a ainsi effectué de nouvelles mesures de la force de connexion et d'arrachage du bras de l'ETS : il est apparu que les forces étaient plus fortes que celles du démonstrateur dont les valeurs avaient été utilisées pour le calcul du dimensionnement. La pression des doigts des connecteurs sur l'intérieur du rail de recharge renforce aussi la résistance entre les deux composants au décrochage.

Du fait des délais de production de la série entière de potence par rapport à la date de mise en service et du délai supplémentaire induit par de nouveaux calculs statiques, il a été décidé de lancer malgré tout la production des potences selon le dimensionnement initial. Entre temps, les nouveaux calculs, basés sur une tolérance d'oscillation de +/- 1 cm sur le plan horizontal, ont aboutis à la nécessité d'utiliser des tubes d'acier cintrés d'un diamètre supplémentaire de 10 cm, ce qui le porterait de 17 à 27 cm. Un bureau d'architecte a représenté en 3D cette évolution.

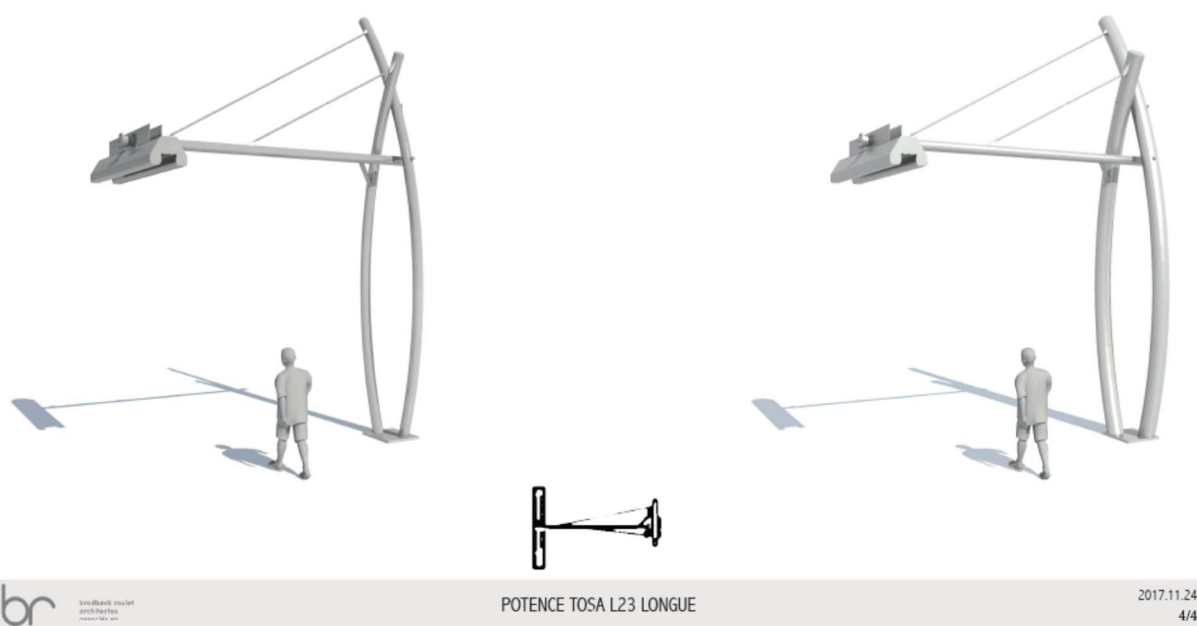


Figure 8 : Comparaison en 3D d'une potence actuelle et d'une potence renforcée. Source: Brodbeck Roulet architectes associés SA, 2017.

Ce nouveau diamètre étant conséquent, en lien avec la silhouette de la potence dans le paysage, il a été décidé de produire un nouveau prototype à taille réelle afin de bien percevoir l'impact visuel du nouveau diamètre dans l'espace. Celui-ci a été construit en octobre 2018 en vue de son installation chez ABB Sécheron pour valider l'amplitude de l'oscillation nouvellement calculée. Elle a ensuite été présentée au terminus P47 à fin 2018 pour une évaluation de l'impact visuel. Cet endroit a été préféré car il est à l'écart de l'espace public urbain, dans un milieu dégagé. Cela a permis de prendre



pleinement conscience de l'empreinte de cette nouvelle potence dans l'espace public et sur le paysage sans susciter des questionnements de la part des usagers.

Il a ensuite été procédé à une pesée des intérêts entre la réduction de l'oscillation d'un côté et une emprise plus forte sur l'espace public et le paysage d'un autre côté. La décision de remplacer l'intégralité des potences a finalement été prise et cette action s'est terminée à fin novembre 2020. Finalement, au printemps 2020, la touche finale a été mise avec une couche de peinture « gris anthracite » offrant une protection supplémentaire contre les déprédations et la corrosion et apportant une touche esthétique supplémentaire. Ce coloris est celui qui est aussi utilisé pour les nouveaux mâts des lignes aériennes de contact des tramways, ce qui les rends bien moins visibles dans le paysage urbain. Après une courte période d'adaptation des usagers de l'espace public, ni les armoires ni les potences ne font l'objet de remarques.

2.2 Matériel roulant TOSA

2.2.1 Energy Transfer System

Les bus TOSA 100% électriques sont des bus de grande capacité, actuellement développés dans une version articulée de 18 mètres permettant d'accueillir près de 110 voyageurs. Ces bus offrent le même niveau de confort qu'un autobus diesel ou un trolleybus, avec chauffage, climatisation et écrans pour l'information des voyageurs.

De plus, les véhicules TOSA de la ligne 23 sont équipés de prises USB vers les sièges en face-à-face à l'avant du véhicule, permettant ainsi la recharge des équipements mobiles personnels. Chacun peut ainsi recharger ses « propres » batteries dans les bus TOSA.

L'innovation technologique réside aussi dans le système de recharge disposé sur le toit du bus, appelé Energy Transfer System (ETS).

Le déroulé normal d'une séquence de charge de l'ETS est le suivant.

- Phase d'approche :

Chaque sous-station est identifiée par deux tags RFID (pour des questions de redondance de l'information) installés sur la potence de recharge. A l'approche de l'arrêt (moins de 10 m du lieu de recharge), le bus est capable, grâce à son antenne et lecteur RFID embarqués, d'accéder aux informations suivantes :

- Le type de la sous-station (Flash, dépôt, Terminal ...)
- La puissance maximale admissible ;
- Le courant maximal admissible ;
- Le temps de charge (999 : correspond à une charge sans limite de temps) ;
- Le tag 1 ou 2 ;
- Le nom de la sous-station ;
- La direction.

Ces informations permettront au bus de savoir quelle est la puissance maximale admissible à la charge et quel est le temps maximal de connexion. Elles permettent aussi d'anticiper la phase de connexion en prépositionnant le bras de connexion à environ 80 % de sa course verticale.

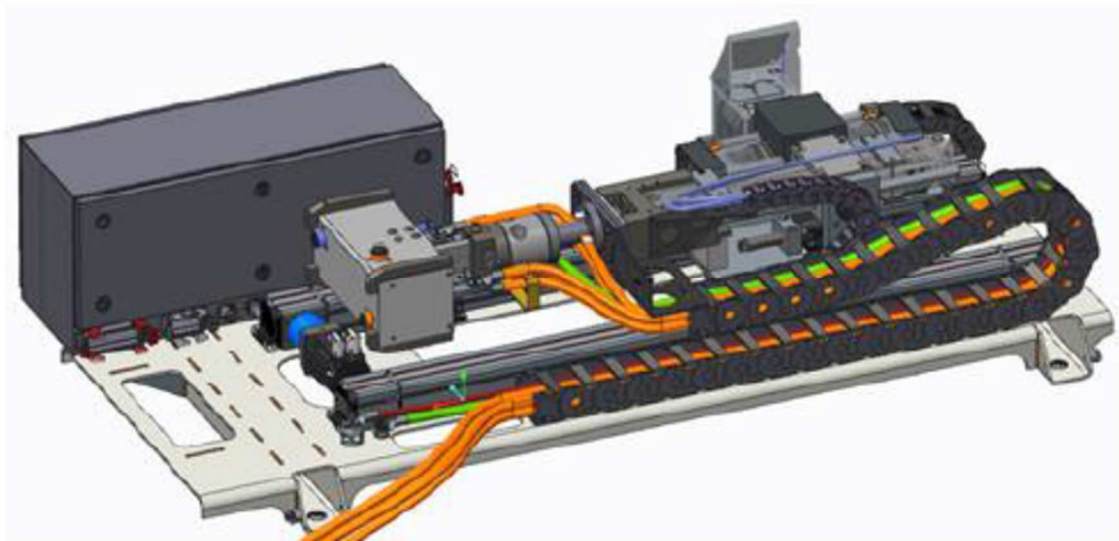


Figure 9 : ETS en position couché (Capture d'écran ligne 23 Genève). Source : ABB, 2014.



Figure 10 : Pré-positionnement de l'ETS (photo démonstrateur). Source : ABB, 2014.

Lors du mouvement rotatif (effectué par un vérin pneumatique), le capot de la boîte où se situe le laser s'ouvre (ouverture effectuée par un vérin pneumatique) aussi. Une buse située au-dessus du laser crache un flux d'air permettant une fois la boîte laser ouverte d'éviter toute pollution du laser.

- Phase d'accostage :

Le bus doit s'arrêter à plus ou moins 80 cm d'une pastille au sol afin de se positionner vis-à-vis de l'arrêt de bus. Il doit pouvoir aussi s'accoster entre 0 et 55 cm du trottoir. Afin de remplir ces critères, les contraintes suivantes ont été apportées au concept :

- La longueur du rail est de 2 mètres de long (± 1 m afin d'optimiser la vitesse d'approche) ;
- Un guidage laser avec un mouvement latéral électrique du bras permet de compenser la distance avec le trottoir (une tolérance plus grande est permise avec le système Grid eMotion Flash afin d'optimiser la vitesse d'approche et de prendre en compte les congères de neige et une arrivée non parallèle au trottoir).

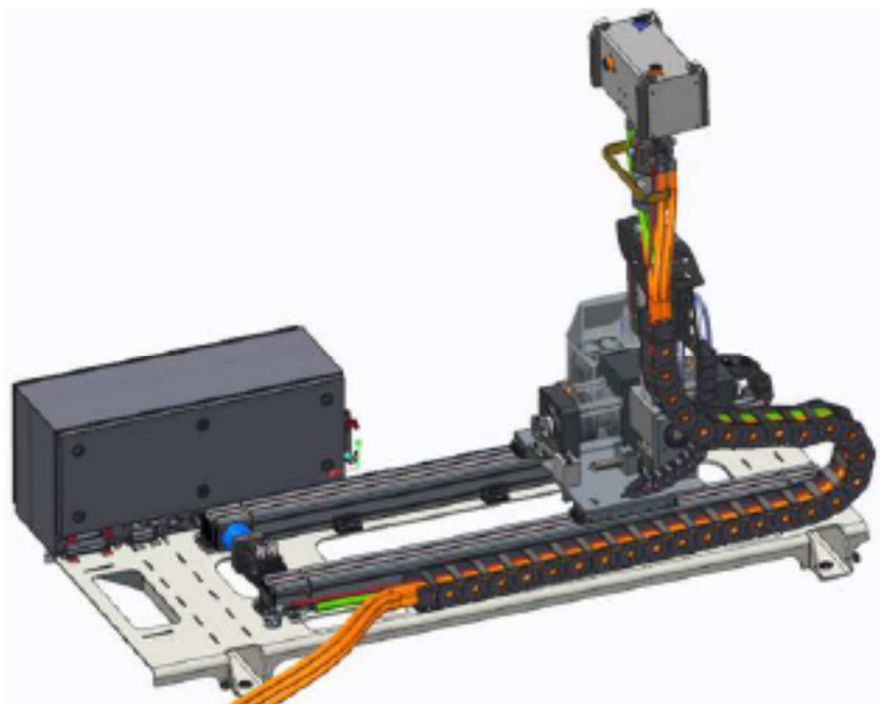


Figure 11 : Positionnement latéral de l'ETS (Capture d'écran ligne 23 Genève). Source : ABB, 2014.

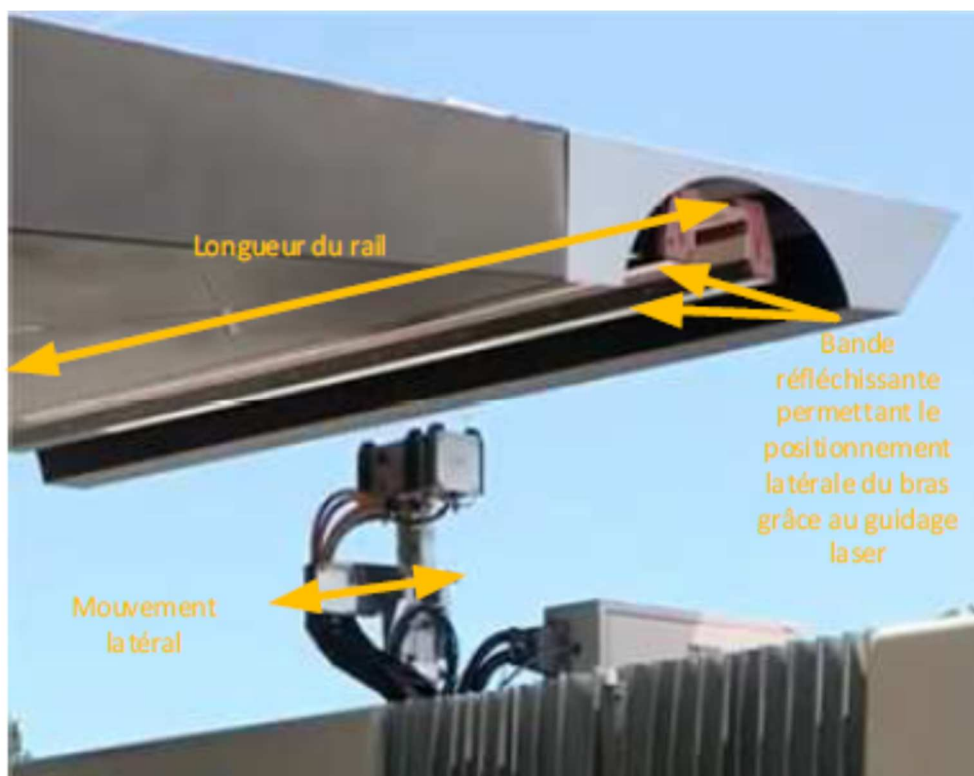


Figure 12 : Positionnement latéral de l'ETS (Capture d'écran ligne 23 Genève). Source : ABB, 2014.



Le positionnement latéral est effectué par laser. Le laser balaye de droite à gauche et lorsqu'il reconnaît le connecteur aérien (grâce aux 2 bandes réfléchissantes), il initie, par le biais d'un moteur électrique, le positionnement latéral de l'ETS.

Le positionnement latéral se fait pendant que le bus est en mouvement et jusqu'à l'arrêt du bus donc en temps masqué.

L'ETS est considéré aligné quand sa tête est positionnée au centre des 2 bandes réfléchissantes.

- Phase de connexion

Lorsque le bus est arrêté et que les freins sont serrés (permettant l'ouverture des portes du bus), le bras fait le dernier mouvement (vertical en moins de 1.5 s) pour réaliser la connexion.

La connexion se fait en temps masqué : pendant l'ouverture des portes. Le mouvement vertical dure environ 650ms. Le temps additionnel (pour aller à 1,5s) est provisionné au cas où l'ETS se positionne encore latéralement après réception de l'information « freins serrés ».

Le mouvement vertical est réalisé par un vérin pneumatique. A ce moment-là le capot de la boîte où se situe le laser se ferme (fermeture effectuée par un vérin pneumatique). Ceci permet d'éviter tout risque de pollution du laser.



Figure 13 : ETS en position haute (course 100%) (Capture d'écran ligne 23 Genève). Source : ABB, 2014.



Figure 14 : mouvement vertical final (photo démonstrateur). Source : ABB, 2014.

Un système de cylindre bloc sur le connecteur aérien, plus un système de jeu sur le système automatisé permettent de répondre au système de barraqage (kneeling) ainsi qu'aux tolérances de positionnement (pente, dévers et accostage non parallèle du bus vis-à-vis du trottoir).

Pendant la connexion, le moteur (du mouvement latéral) est relâché afin de permettre le barraqage.

- Phase de déconnexion :

Lorsque la charge est terminée (batterie rempli, défaut, information freins serrés perdue, charge interrompue...), l'ETS se déconnecte en 3 phases :

- o Descente du pantographe à environ 80% de sa course ;
- o Retour à la position latéral initiale ;
- o Retour à la position couchée.

Un bouton au tableau de bord permet d'interrompre à tout moment la phase de connexion, transfert d'énergie et entraîne la déconnexion.

Pour permettre l'enchaînement automatique de ces phases, il est fait usage du guidage laser dont les avantages sont les suivants :

- Grande tolérance de positionnement, le chauffeur peut se parquer à l'arrêt de bus à une vitesse normale sans se soucier de la précision ;
- L'ETS ne peut se connecter que si le bus est bien positionné (aucun risque que la tête ne s'insère mal ou à moitié) ;
- Le chauffeur n'a pas à se concentrer sur autre chose que les passagers, comme l'aide au stationnement. Il peut s'approcher de l'arrêt de bus comme il le ferait avec un véhicule diesel.



2.2.2 Chaîne de traction et équipements auxiliaires

Les batteries des bus TOSA sont situées sur le toit du véhicule, ce qui permet de garantir un plancher plat et bas sur toute la longueur du bus. Celles choisies pour équiper les véhicules de la ligne 23 sont de technologie LTO (Lithium Titanate Oxyde), comme celle préalablement utilisée pour le démonstrateur. Cette technologie a été choisie pour les caractéristiques suivantes :

- Forte densité de puissance : grâce à l'utilisation des nanocristaux de lithium-titanate, la surface de l'anode est de près de 100m² par gramme, comparés aux 3m² / gramme pour l'anode conventionnelle en carbone des batteries Li-ion. Cela améliore considérablement la vitesse recharge en permettant aux électrons de traverser l'anode plus rapidement ;
- Grand nombre de cycles : jusqu'à 20'000, soit 10 fois plus qu'une batterie standard à base de lithium, avec une efficacité de recharge de près de 98% ;
- Grande plage de température : grâce à la nanotechnologie utilisée, ces batteries fonctionnent mieux à basse température que les batteries Li-ion conventionnelles. Elles conservent près de 80% de leur capacité de recharge à -30°C ;
- Sécurité de la technologie : ces batteries sont exemptes de carbone ce qui évite tout risque de surchauffe, principale source d'embrasement dans les systèmes de stockage conventionnels.

La capacité de la batterie a été doublée (70 kWh versus 38 kWh sur le démonstrateur) afin :

- D'augmenter l'autonomie en prenant en compte les modes dégradés ;
- D'augmenter la puissance de charge aux terminus (cela est lié à la densité de puissance des batteries) permettant de réduire le nombre d'injections de puissance (recharge Flash) sur la route.

Elles ont un poids d'une tonne à peine. A titre de comparaison, la capacité des voitures Tesla S varient, selon le modèle, de 60 à 100 kWh. Les bus TOSA ne nécessitent pas de batteries de forte puissance puisque l'autonomie n'est pas un facteur capital. En effet, grâce à la technique du biberonnage qui permet la recharge partielle des batteries des bus en cours de trajet, les bus TOSA ont besoin de transporter beaucoup moins de batteries qu'un bus électrique qui serait chargé la nuit uniquement : il en faudrait 5 à 7 tonnes de plus. Ainsi, les bus TOSA transportent plus de passagers et moins de batteries que les bus électriques conventionnels, ce qui est positif pour l'environnement car cela représente moins de batteries à recycler.

Le refroidissement à eau a été privilégié pour des raisons de compacité et de coût.

Pour résumer, ce choix permet d'avoir une batterie de taille modérée et une longue durée de vie tout en prenant en compte les cas de mode dégradé.

Deux moteurs synchrones à aimants permanents sont montés sur 2 des 3 essieux du bus.

La technologie à aimants permanents (versus moteur asynchrone pour le démonstrateur) permet d'améliorer l'efficacité énergétique du moteur (gain entre 5 et 10% vs. moteur à induction).

De plus, une réduction du niveau sonore est escomptée grâce au refroidissement par eau :

- Sourdine par l'eau ;
- Encapsulation du moteur, permettant de :
 - o Réduire les coûts de maintenance ;
 - o D'augmenter la sécurité (classe IP65 versus IP20 sur le démonstrateur : meilleure résistance aux poussières et aux liquides).



Un autre enjeu de taille concernant les bus électriques concerne la consommation des systèmes auxiliaires, notamment ceux liés au confort des voyageurs (climatisation, chauffage).

Le système de chauffage a évolué vers un dispositif de chauffage à eau avec deux unités de dernière génération de 20 kW chacune, montées sur le toit du bus.

Ces deux appareils régulés de façon individuelle permettent une économie de consommation électrique et apporte un gain de poids substantiel (2x15 kg pour les 2 unités versus 250 kg pour le démonstrateur).

La puissance de chaque appareil varie de 12,6 à 20 kW suivant la tension. Une gestion de l'énergie est réalisée en combinant une unité ou les 2 en même temps afin d'améliorer l'efficacité thermique. Ce système de chauffage répond aux normes en vigueur telles que : ECE R100, ECE R10 compatibilité électromagnétique, R122.

De plus, les véhicules TOSA sont équipés de quatre blocs de deux prises USB, permettant aux voyageurs de recharger leurs équipements électroniques durant le trajet. Il s'agit d'offrir ce service à titre d'essai, s'agissant d'une mesure identifiée comme pouvant potentiellement augmenter l'attractivité des transports collectifs et ayant un caractère novateur, à l'image du projet. Cependant, si l'entretien d'un tel dispositif est trop coûteux à l'usage, notamment si les ports USB sont constamment obstrués par des chewing-gums par exemple, les ports USB pourront être recouverts par un cache.

L'homologation définitive des bus a été obtenue en juillet 2018. Le volet déterminant et spécifique au bus TOSA a été l'obtention de la certification de compatibilité électromagnétique selon les normes ORNI/NISV RS/SR 814.710:2016.



Figure 15 : Vue sur le toit du bus TOSA : le bras de recharge, l'électronique de puissance, les packs batterie. Source : Lumière noire, 2017.



2.2.3 Modifications apportées en cours de projet

Deux principaux problèmes ont été identifiés à fin 2017, à la suite de l'inauguration commerciale :

- Bruit émis par le bus lors des recharges en station flash qui perturbent le voisinage proche des potences. Ce bruit, émis par un boîtier ABB nommé e-box, est situé sur le toit du bus et connecté électriquement entre l'ETS et la batterie. Les 1^{ères} mesures correctives apportées par ABB n'ont pas permis de descendre en dessous des valeurs limites de l'OPB (ordonnance de protection contre le bruit). Le problème a été solutionné en 2019 grâce à plusieurs modifications des composants électroniques et de l'isolation des coffrets apportées par ABB au niveau de l'interface entre l'ETS et les batteries de traction ;
- Quatre packs de batteries de traction ont été changés en 2018, en raison d'un défaut de série que Hess a dû solutionner. Dans un premier temps, pour limiter l'immobilisation, Hess a fourni aux TPG un pack de batteries de rechange. Les causes des pannes sont principalement liées aux circuits auxiliaires de la batterie, à savoir le circuit de refroidissement ou les modules d'équilibrage de la charge. Ce problème a été traité par le constructeur allemand des batteries et il n'est pas réapparu en 2019 après l'action de remise à niveau pratiquée.



3 Procédure et méthode

La structure organisationnelle et décisionnelle du projet, telle qu'ajustée en 2016 pour répondre au mieux aux multiples besoins opérationnels et stratégiques ainsi qu'aux attentes des multiples partenaires, a été restreinte dès 2019, suite à la mise en service, aux seuls organes du CODIR et du STECO.

Pour rappel, le STECO a été mis en place dans le cadre formel des contrats de fourniture des infrastructures et du matériel roulant TOSA, entre les TPG, ABB Sécheron, ABB Turgi et Carrosserie HESS AG. Son but est de servir de forum afin d'analyser et de remédier aux éventuels questions, défaillances et problèmes qui surviendraient au cours de l'exécution du contrat.

Afin d'accompagner le pilotage du projet dans sa phase d'exploitation, les TPG ont mis en place un rapport mensuel d'exploitation de la ligne 23. Celui-ci retrace l'exploitation du mois écoulé sur les thématiques suivantes:

- L'état de disponibilité quotidien des infrastructures ainsi que des véhicules ;
- Le recensement des avaries propres au véhicule pouvant avoir un impact sur l'exploitation commerciale ;
- Un comparatif des modes de traction en exploitation sur la ligne 23 selon 3 critères ;
- Les faits marquants du mois écoulé ainsi que les objectifs d'amélioration ou de fiabilisation pour le mois suivant.

3.1 Structure du système d'information pour le suivi de l'exploitation de la ligne 23 TOSA

A fin 2019, l'ensemble des bus et des infrastructures sont connectés et visibles sur la plateforme SCADA d'ABB. Les étapes suivantes sont liées à la mise à disposition des équipes de régulation, des équipes de mise à disposition des véhicules et de maintenance des écrans de visualisation ci-dessous. La qualification des données qui permettent d'établir le rapport d'efficacité énergétique a été finalisée comme planifié à fin juin 2020.

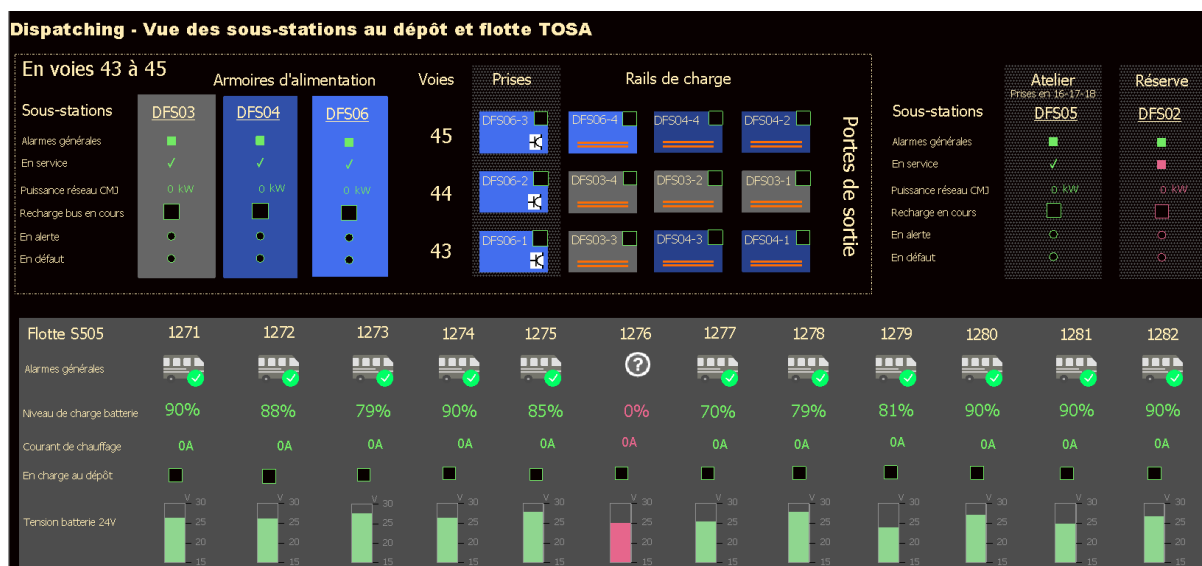


Figure 16 : Vue pour le dispatching des véhicules avec l'état des stations de recharge du centre de remisage et l'état des bus en service, hors service et niveau de charge. Source : TPG, 2019.

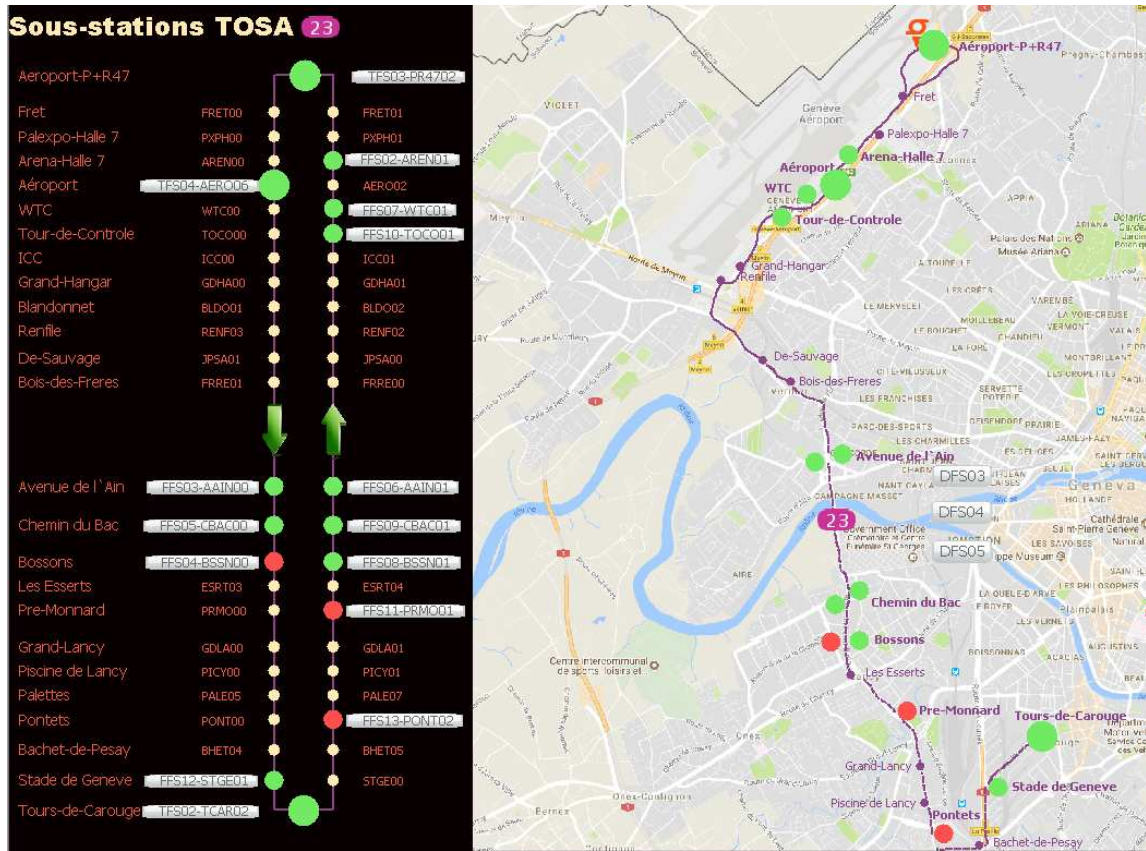


Figure 17 : Vue du réseau avec toutes les stations de recharge pour la régulation de la ligne et l'information aux conducteurs. Source : TPG, 2019.

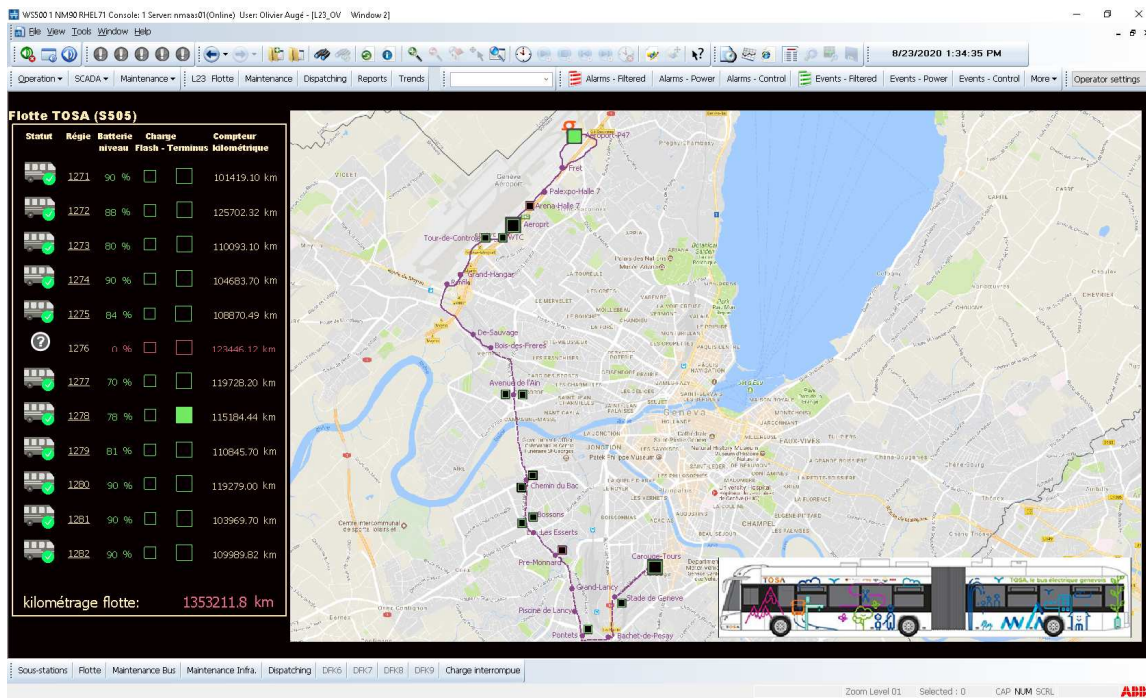


Figure 18 : Vue de l'ensemble des bus et des stations de recharge pour monitoring de la ligne en exploitation dynamique et assistance aux conducteurs. Source : TPG, 2019.



S'agissant des informations de consommation d'énergie plusieurs tableaux de bords sont à disposition et qui permettent de fournir les éléments constitutifs du rapport d'efficience énergétique. Quelques exemples sont présentés ci-dessous :

- L'état de charge de chaque bus sur une durée déterminée

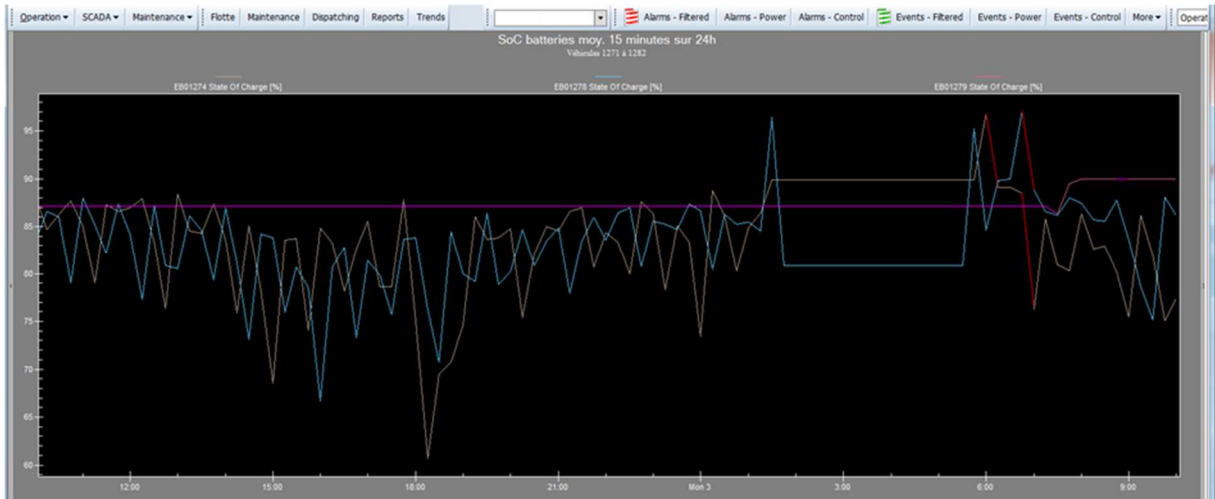


Figure 19 : Vue de l'état de charge de chaque bus sur une durée déterminée. Source : TPG, 2019.

- Le rapport mensuel des consommations d'énergie des composants du système

	OFENSUMACINKWH Sum AC kWh	OFEN_BUS_ETS_KWH Sum DC kWh	OFEN_BUS_ETS FFS+TFS DC kWh	OFEN_BUS_DEPOT_PLUG DFS DC kWh	OFEN_BUS_CONVERTER	OFEN_BUS_BATTERY	OFEN_TRACTION_MOTOR
2019-05-01 01-May - 02-May	4266.833984	3295.114506	3182.307133	112.807373	1683.554329	1628.050573	2758.106118
2019-05-02 02-May - 03-May	4743.373844	3751.875001	3439.190443	312.684571	2146.17306	2153.835207	3505.795559
2019-05-03 03-May - 04-May	4382.552737	3424.864016	3274.320803	210.543210	2682.182488	2289.785507	3840.173284
2019-05-04 04-May - 05-May	3993.593355	2912.906836	2712.516893	190.384033	1638.938762	1774.954188	2956.198984
2019-05-05 05-May - 06-May	2697.954845	1996.001786	1818.822994	95.972412	1217.793047	1339.751905	1977.418618
2019-05-06 06-May - 07-May	4965.115233	3992.213743	3574.757889	407.455994	2245.584267	2496.858992	3814.538998
2019-05-07 07-May - 08-May	4681.378998	3694.175556	3412.087889	282.087767	2093.99599	2280.80468	3799.852937
2019-05-08 08-May - 09-May	5080.978514	4100.708736	3786.740231	303.968505	2135.482682	2310.18818	3898.658958
2019-05-09 09-May - 10-May	5035.57031	4044.45288	3699.20996	354.24292	2190.117406	2368.088526	3714.121862
2019-05-10 10-May - 11-May	4676.564453	3670.579833	3411.23535	259.344483	2151.417534	2334.9982	3875.65914
2019-05-11 11-May - 12-May	3554.433591	2640.042237	2581.328127	58.77411	1434.909812	1573.380355	2612.50889
2019-05-12 12-May - 13-May	2459.935545	1893.237551	1657.576174	35.661377	1217.764536	1339.411617	2139.975265
2019-05-13 13-May - 14-May	4631.246098	3655.024275	3356.688563	298.355712	2537.31026	2643.730168	4384.051454
2019-05-14 14-May - 15-May	2916.816407	2250.654601	2151.908751	98.74585	1431.170951	1330.902363	2204.696899
2019-05-15 15-May - 16-May	2286.169927	1821.217653	1644.243044	176.974609	1176.895883	1299.128144	2199.978167
2019-05-16 16-May - 17-May	4588.998052	3570.331788	3298.52759	271.804198	1834.075068	1969.894805	3276.527243
2019-05-17 17-May - 18-May	4530.177736	3546.847653	3227.674068	319.173565	2124.716888	2293.520269	3752.446515
2019-05-18 18-May - 19-May	2935.386724	2089.659911	2009.057382	60.592529	1006.614963	1090.44297	1853.102898
2019-05-19 19-May - 20-May	2244.007914	1595.702148	1478.497285	27.243483	1181.459237	1279.89855	2122.04944
2019-05-20 20-May - 21-May	4585.681644	3550.213857	3263.811571	287.200186	1853.161477	2085.29896	3425.955243
2019-05-21 21-May - 22-May	4546.183595	3519.345213	3226.613278	286.721935	2556.923289	2389.272297	3835.753447
2019-05-22 22-May - 23-May	4692.109373	3643.542969	3361.458091	382.084559	2774.289549	2233.989443	3717.63877
2019-05-23 23-May - 24-May	4460.851567	3419.149161	3230.350991	188.79907	2098.433226	2145.940675	3655.282489
2019-05-24 24-May - 25-May	4380.794927	3364.905511	3183.575919	191.330321	1822.190387	1831.7066	3102.652507
2019-05-25 25-May - 26-May	3327.332024	2450.048334	2357.459954	92.58838	1510.404867	1453.096537	2437.879043
2019-05-26 26-May - 27-May	2429.658206	1593.129881	1478.539061	114.59082	462.730481	440.668394	668.875468
2019-05-27 27-May - 28-May	4231.834765	3235.730712	3075.934372	160.49534	2018.855357	1779.254573	3108.547853

Figure 20 : Vue du rapport mensuel des consommations d'énergie des composants du système. Source : TPG, 2019.

3.1.1 Suivi de la consommation énergétique

L'architecture technique du concept TOSA comporte en plus des bus qui ont le chargeur de batterie intégré, une infrastructure incluant des sous-stations de différents types. Afin de pouvoir identifier d'éventuelles pistes d'améliorations et de vérifier que la pratique confirme la théorie, il a été décidé de



mettre en œuvre un outil de représentation des flux d'énergie sur la base de diagramme de type Sankey.

Ainsi, nous sommes en mesure de connaître quelle part d'énergie est fournie aux terminus, d'identifier l'apport des stations Flash et de questionner le choix du principe de recharge au dépôt. Les différents consommateurs côté bus, la traction, le niveau de récupération d'énergie, le confort via le chauffage et la climatisation mais aussi les pertes sont représentés de manière synthétique afin d'orienter nos questionnements et nous aider à définir nos priorités pour les améliorations. Enfin, les effets saisonniers sont plus facilement appréhendables.

3.2 Volet sociologique

3.2.1 Problématique et objectifs de la démarche d'enquête sociologique

La perception de la technologie TOSA par les usagers et les riverains est un des trois volets du projet TOSA L23. En effet, comme pour toute innovation technologique et plus spécifiquement celles fortement adossées à des valeurs liées à la conscience environnementale, il est important d'identifier les valeurs sous-jacentes à cette technologie. L'intérêt est, d'une part, de pouvoir avoir cette démarche exploratoire qui permettant d'argumenter sur les valeurs préconçues par les initiateurs du projet, et donc communicables par la suite auprès d'autres acteurs de la branche (exploitants de transports publics, autorités organisatrice, mais aussi et surtout, d'autre part, de potentiellement modifier à posteriori les messages conçus et portés jusqu'à présent dans la démarche de communication si les buts des messages portés n'atteignaient par leur cible.

Cette problématique peut se résumer sur les deux axes suivants :

- La façon dont l'innovation TOSA est perçue et les conditions auxquelles elle est acceptée par les usagers et riverains : quels sont les bénéfices factuels des voyageurs « électrique vs diesel » mais aussi quelles sont les idées forces, et plus particulièrement environnementales, associées au projet (forces, faiblesse, crédibilité) ;
- Les éléments (et valeurs) à communiquer pour valoriser le projet auprès des utilisateurs mais aussi en interne tant qu'à l'international auprès des acteurs institutionnels et professionnels, afin qu'ils l'adoptent ou le considèrent avec bienveillance.

Les objectifs globaux de l'étude sociologique sont les suivants:

- Connaître et comprendre les éléments qui, auprès de la population, permettent de valoriser et de porter légitimement le concept de ligne électrique TOSA, tant par le Canton de Genève, en tant qu'autorité organisatrice, que par les TPG en tant qu'exploitant;
- Repérer les contenus et les supports de communication les plus pertinents y compris des éléments physiques/techniques sur la ligne/véhicules ;
- Comprendre l'expérience de transport des voyageurs ayant pratiqué le bus TOSA et comprendre en quoi les innovations technologiques sont vectrices d'adhésion;
- Pondérer ses valeurs/éléments auprès des cibles des voyageurs et des riverains de la 23.

Plus précisément, il s'agit de rechercher auprès des enquêtés:

- Image, perception, compréhension et engagement de la part de chaque cible par rapport au principe d'une ligne entièrement « TOSA ».
- Quelles sont les attentes et les espoirs qu'une telle technologie suscite ?



- Quels bénéfices/inconvénients imagine-t-on pour le voyageur ? Comment faudrait-il communiquer sur ce projet auprès des Genevois ? Des clients actuels des TPG ? Des clients potentiels ?
- Quelles valeurs sont-elles associées au projet ? (Innovation, modernisme, fierté, éthique, environnement...).
- Quel impact sur l'image des TPG et du Canton de Genève ?
- Quelles questions soulève ce concept pour le voyageur ? Le riverain ?
- Quel est l'impact de cette technologie en termes d'incitation à la fréquentation ?
- La perception de la ligne de test par les voyageurs et riverains en termes d'expérience de transport : ont-ils vu/ressenti une différence ? De quelle nature ? Quels bénéfices ou inconvénients pour eux ? Se sont-ils posés des questions ? Lesquelles ?
- Recherche de l'impact de cette technologie en termes d'incitation à la fréquentation.

3.2.2 Méthodologie d'enquête déployée

Concrètement, la méthodologie d'enquête, développée par Mauro Associés (spécialiste des études de marché) et IPSOS (spécialiste des enquêtes quantitatives et de la relation client), se fonde sur une double approche qualitative et quantitative.

L'intérêt est fort de mener ces approches en parallèle, en profitant du basculement progressif des bus diesel vers la technologie TOSA, cela afin d'identifier une éventuelle évolution qualitative et quantitative.

L'approche qualitative consiste à explorer différents types de populations et voyageurs genevois :

- Voyageurs de la ligne 23 « période diesel »
- Voyageurs de la ligne 23 « période cohabitation et expérience TOSA »
- Riverains ligne 23

La méthodologie de l'approche qualitative est fondée sur deux outils utilisés dans les sciences sociales :

- **Réunions de groupe de 6 à 7 personnes d'une durée de 2 heures.** Les groupes permettent de déceler les grands stéréotypes sociétaux et d'autre part de susciter et développer la créativité et l'imaginaire des consommateurs grâce à la dynamique de groupe;
- **Entretiens individuels de 60 min (au domicile ou en salle).** Les entretiens permettent de fouiller de façon strictement personnelle comment l'interviewé réagit et réfléchit face à une problématique. Cette méthodologie permet d'obtenir au-delà des stéréotypes, les « vraies raisons », parfois contradictoires et souvent intimes qui ne peuvent être facilement évoquées en groupe.

La méthodologie prévoyait 3 réunions de groupe et 15 entretiens individuels, permettant d'interroger au final un total de 33 à 36 personnes recrutées sur le terrain, aux arrêts et dans les bus.

L'approche quantitative vise, par le biais d'un questionnaire passé à bord des véhicules et aux arrêts, à pondérer les valeurs, freins et attentes dégagés lors de la phase qualitative et déceler les « go / no go voyageurs/riverains » (erreurs à ne pas commettre pour garder la bienveillance de usagers).



Pour rester en cohérence avec l'idée - déjà partiellement communiquée au grand public - d'innovation technologique et de conscience environnementale, la passation des questionnaires se fait à l'aide d'un dispositif « full digital » pour récolter les informations sous forme de questionnaires en ligne sur tablette ou téléphones avec des enquêteurs, dans les véhicules et aux arrêts. La conception de cet outil permet d'impliquer et d'engager le participant qui peut aussi lui-même agir sur l'écran pour faire ses choix. Un procédé qui a l'avantage d'utiliser des codes numériques et des supports socialement parfaitement assimilés et de créer ainsi une relation ludique et de proximité avec l'enquêteur incitant naturellement le participant à rester sincère et engagé lors de l'interrogation.

L'objectif fixé est de recueillir 600 questionnaires complets.

3.2.3 Cibles atteintes

Pour la 1^{ère} phase, en décembre 2017 avant la mise en service des bus TOSA :

Nous avons interrogé sur la ligne 23 :

Quali : 12 voyageurs.

- 5 femmes et 7 hommes
- Tous depuis plus de 10 ans à Genève.
- Tous habitués de la ligne.

✓ 1 groupe de discussion de 2 femmes et 5 hommes

- Valentina, 21 ans, étudiante.
- César, 21 ans, gardien de musée.
- Jordi, 24 ans, étudiant.
- Abuzar, 34 ans, enseignant.
- Cheikh, 42 ans, cuisinier.
- Frédérique, 45 ans, en recherche d'emploi.
- Javier, 74 ans, retraité.

✓ 5 entretiens individuels, 3 femmes et 2 hommes

- Megane, 18 ans, étudiante.
- Alina, 35 ans, agent aéroport.
- Pacific, 45 ans, aide soignante.
- Yves, 63 ans, retraité banque UBS.
- Mohamed, 74 ans, retraité comptable.



Quanti : 211 voyageurs.

- ✓ Un peu plus de femmes (55%) que d'hommes (45%).
- ✓ Plus de 80% des voyageurs entre 18 et 55 ans avec des tranches d'âges bien équilibrées.
- ✓ Une grande majorité qui vit à Genève et dans le canton de Genève (93%).
- ✓ Des habitués de la ligne 23 à plus de 80% (entre tous les jours et plusieurs fois par semaine).
- ✓ Majoritairement (80%) de positions socio-professionnelles plutôt modestes : employés non cadre (43%), étudiants (17%), retraités (12%) et chômeurs/apprentis (14%).
 - Directeurs cadres et indépendants sont minoritaires : 13%.

Figure 21 : Etude sociologique Phase 1 - échantillonnage. Source : Mauro Associés, 2018.



Pour la 2^{ème} phase, en mai 2019 après la mise en service commerciale complète :

TOSA
phase 2

Rappel méthodologie phase 2 : Quali-Quantitative

Quali : 24 voyageurs.

Une double réunion de groupe

- ✓ 14 voyageurs pendant 2 heures
- ✓ Maison de quartier des libellules
- ✓ Mercredi 8 mai 2019

Dix entretiens en face à face

- ✓ Voyageurs/riverains de la ligne 23
- ✓ Durée moyenne de 1 heure
- ✓ Maison de quartier les Libellules et restaurant Les Palettes
- ✓ Semaine 6 mai 2019

La passation des entretiens et l'animation du groupe ont été assurées par **Olivier Mauro**.

Quali



Quantitative



Quantitative : 360 voyageurs.

Questionnaires de 7 minutes

- ✓ En face à face
- ✓ Dans les bus et arrêts ligne 23
- ✓ Sur support numérique avec enquêteurs

Le terrain quantitative a été réalisé semaine du 29 avril 2019.

+ Recrutement In-Situ de voyageurs pour participer à la partie Quali.

Terrain réalisé par les équipes de **Mauro et Associés** +.

Figure 22 : : Etude sociologique Phase 2 - échantillonnage. Source : Mauro Associés, 2019.

L'objectif fixé en terme d'échantillonnage a ainsi été atteint.



4 Résultats et commentaire

4.1 Exploitation du système TOSA

4.1.1 Comparaison de l'exploitation entre bus diesel et bus TOSA

Comme le démontre les résultats des indicateurs d'exploitation ci-dessous, la ligne 23 en bus électrique TOSA ou en bus diesel est équivalente. La vitesse commerciale de la ligne est sensiblement la même. L'écart moyen de 0,8 km/h tend à se réduire avec la familiarisation du personnel de conduite à cette innovation technologique. Certes, les 20 secondes aux arrêts de recharge ne sont pas systématiquement équivalentes pour les bus diesel particulièrement en dehors des heures de pointe et ce d'autant plus après l'introduction des arrêts sur demande sur l'ensemble du réseau bus des TPG en 2018. A noter cependant que l'autonomie des batteries sur la 1ère année d'exploitation permet aux chauffeurs de s'affranchir de certaines recharges flash. Ce constat, mis en perspective des données techniques de charge recueillies, permet de penser que de futures lignes de bus électriques à recharge rapide pourront fonctionner avec moins de stations flash au long du parcours. Toutefois cela dépend de la longueur de la ligne de sa configuration et d'une évaluation précise du mode d'exploitation dégradé (congestion, interruption de ligne ...).

Les retards en ligne supérieurs à 4 min sont équivalents entre bus diesel et bus TOSA. En effet cette ligne est située sur un axe fort, parallèle à l'autoroute de contournement de Genève et souvent perturbée. Ceci a permis de démontrer que le système TOSA peut remplacer de manière fiable les bus diesel y compris dans un environnement où la congestion du trafic peut être très importante.

A fin 2019, ce sont environ 1'000'000 de km qui ont été réalisés sur la ligne 23 par les 12 bus et un nombre de recharge approchant les 500'000 (en moyenne une station de recharge tous les 2 km sur la ligne). Ces chiffres permettent de confirmer la réussite du projet en exploitation bien au-delà de l'expérimentation réalisée avec l'unique bus démonstrateur entre 2013 et 2014.

		mars.18	juin.18	sept.18	déc.18	mars.19	juin.19	sept.19	déc.19	mars.20
Vitesse commerciale en km/h	Vcom moyenne pondérée	17.87	18.41	18.99	18.68	17.89	18.73	18.40	18.43	19.35
	Vcom moyenne des bus Diesel	18.24	19.08	20.11	19.62	18.64	-	-	-	-
	Vcom moyenne des bus TOSA	17.72	18.18	18.92	18.53	17.87	18.70	18.35	18.43	19.35
Retard en ligne > 4min en % des courses	Retard totaux en % pondéré	11.1%	13.7%	9.5%	14.7%	13.1%	10.2%	10.5%	16.4%	3.6%
	Retard des bus Diesel	9%	6.0%	4.9%	7.4%	9.5%	-	-	-	-
	Retard des bus TOSA	18.9%	17.5%	9.9%	15.9%	13.1%	10.3%	10.8%	16.4%	3.6%
km parcourus mensuels	km totaux	46'247	48'896	48'002	47'724	48'143	47'244	47'616	47'606	46'612
	bus Diesel	33'738	13'981	3'239	6'299	1'039	1'005	1'774	825	369
	bus TOSA	12'509	34'915	44'763	41'425	47'104	46'239	45'842	46'781	46'243
	% de km TOSA / km totaux	27%	71%	93%	87%	98%	97.9%	96.3%	98.3%	99.2%
km parcourus cumulés depuis mars 2018	km cumulés totaux	46'247	191'209	328'021	475'942	618'034	762'969	901'921	1'047'787	1'190'405
	bus Diesel	33'738	103'666	131'178	151'863	171'062	172'659	175'649	177'327	177'855
	bus TOSA	12'509	87'543	196'843	324'079	446'972	590'310	726'272	870'460	1'012'550
	% de km TOSA cumulés / km totaux cumulés	27%	46%	60%	68%	72%	77%	81%	83%	85%

Tableau 1 : Principaux indicateurs d'exploitation. Source : TPG, 2021.

D'autres indicateurs ont aussi permis de mesurer la disponibilité des bus TOSA sur la ligne 23.



Le graphique suivant représente le pourcentage de véhicules disponibles nécessaires pour la sortie du matin cumulée avec celle du soir. Lorsque le pourcentage est inférieur à 100, un bus thermique est engagé à la place d'un TOSA.

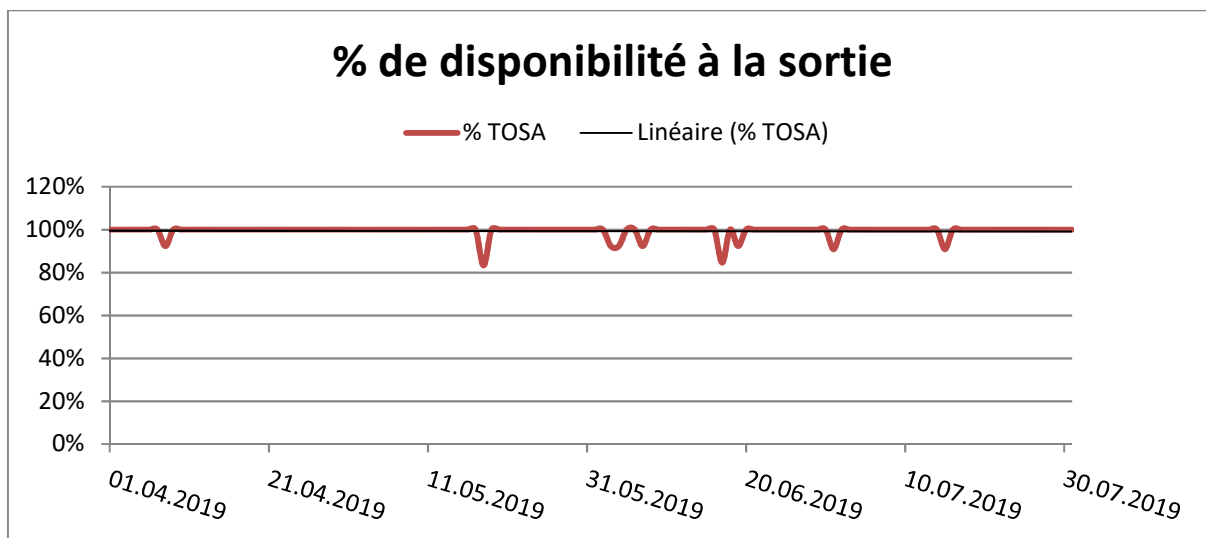


Figure 23 : Pourcentage de véhicules disponibles nécessaires pour la sortie du matin cumulée avec celle du soir Source : TPG, 2019.

Les différentes actions menées par TPG/HESS/ABB ont permis d'augmenter la disponibilité lors de la sortie des véhicules.

Le graphique ci-dessous représente le nombre de changement de véhicules en exploitation ainsi que le type du véhicule de remplacement (TOSA/DIESEL). Lorsque plus de 2 véhicules sont immobilisés, un bus DIESEL doit être introduit sur la ligne 23 afin de ne pas manquer de course.

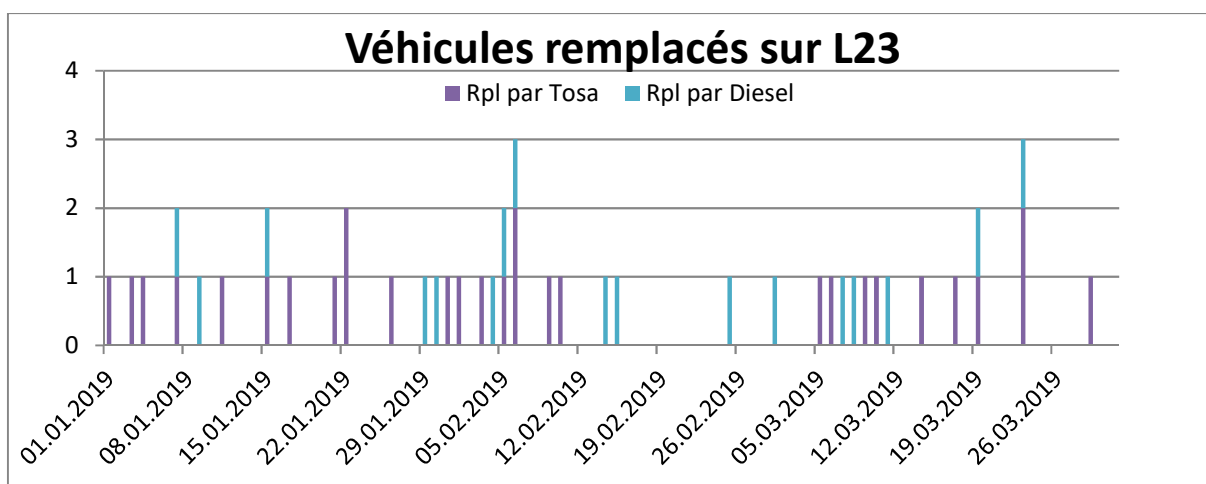


Figure 24 : Nombre de changement de véhicules en exploitation ainsi que le type du véhicule de remplacement (TOSA/DIESEL). Source : TPG, 2019.

Si on peut observer une diminution des dépannages, il est surtout intéressant de noter que les remplacements par des TOSA est de plus en plus fréquent, ce qui traduit une disponibilité accrue.



4.1.2 Consommation énergétique

Raccordement des stations de recharge au réseau de distribution électrique de SIG

Afin d'optimiser les points de raccordement des stations de recharge au réseau de distribution électrique de SIG, SIG a mis en place une méthodologie en concertation avec les acteurs concernés qui a consisté à :

- La prise de connaissance du tracé de la ligne 23, des arrêts susceptibles d'être retenus pour accueillir une station de recharge et leurs besoins de puissance (436 kVA pour un chargeur rapide et 55 kVA pour un chargeur flash) ;
- La remise à la HEIG-VD par SIG des caractéristiques techniques nécessaires permettant l'étude de faisabilité des raccordements électriques projetés, notamment le respect de la norme EN 50160 (qualité de la tension) et des règles techniques DACHCZ ;
- La réception des topographies des arrêts susceptibles d'être retenus permettant de déterminer la solution technique la plus favorable et la réalisation des estimatifs des coûts de raccordement ;
- L'établissement des offres technico-financières de raccordement ;
- L'exécution des travaux de génie civil et de raccordement des arrêts retenus sans renforcement du réseau de distribution électrique de SIG.

SIG a mis à disposition ses compétences liées au raccordement au réseau électrique et ses connaissances dans le secteur des installations électriques intérieures au TPG. En agissant en facilitateur neutre, SIG a permis au projet d'optimiser ses coûts de raccordement dans le respect des normes en vigueur.

Consommation globale

La consommation globale pour la ligne est basée sur le niveau infrastructure. Ce dernier comprend principalement les équipements (3 TFS et 12 FFS) alimentant les bus pendant l'exploitation sur la ligne et les équipements au dépôt (3 DFS) servant à assurer la mise en exploitation des bus avec leurs batteries chargées.

La consommation des infrastructures d'alimentation des bus sur la ligne 23 est donnée de manière fiable par les compteurs d'énergie utilisées pour la facturation émise par les Services industriels genevois (SIG).



Récapitulatif de consommations de l'année 2019			
Mois	Prix	Heures pleines	Heures douces
Janvier	CHF 32'313	110'807 kWh	42'173 kWh
Février	CHF 23'452	77'311 kWh	35'593 kWh
Mars	CHF 29'352	93'833 kWh	43'113 kWh
Avril	CHF 24'603	78'369 kWh	36'169 kWh
Mai	CHF 25'610	85'952 kWh	35'186 kWh
Juin	CHF 24'400	79'374 kWh	35'367 kWh
Juillet	CHF 24'374	78'253 kWh	32'719 kWh
Août	CHF 23'218	73'280 kWh	34'091 kWh
Septembre	CHF 22'834	73'198 kWh	32'886 kWh
Octobre	CHF 26'416	83'443 kWh	35'193 kWh
Novembre	CHF 32'756	96'693 kWh	41'626 kWh
Décembre	CHF 31'013	100'268 kWh	42'852 kWh
TOTAUX	CHF 320'342	1'030'779 kWh	446'968 kWh
Moyenne/Mois		85'898 kWh	37'247 kWh

TOTAL kWh	1'477'747 kWh
------------------	----------------------

Tableau 2 : Consommation sur la ligne (TFS+ FFS). Source : TPG, 2019.

Pour la consommation des infrastructures au dépôt, l'information provient directement des compteurs internes des 3 sous-stations d'alimentation (DFS).

Remarque sur la fiabilité et précision des compteurs internes des TFS, FFS et DFS :

Bien que leur précision corresponde à la catégorie mesure (à la place de comptage pour les compteurs SIG), cette dernière est suffisante pour notre application. Cependant, nous avons vécu des pertes d'information par remise à zéro de ses compteurs lors de la mise à jour du logiciel des sous-stations. Pour éviter ceci, depuis septembre 2019, ABB a mis en place une procédure spécifique à utiliser lors des mises à jour logicielle.

Sur 12 mois, l'énergie globale consommée par le système s'élève à 2.66 kWh/km pour un total de 590'902 km (haut-le-pied compris). Depuis mars 2019, la part des km réalisés en diesel est toujours restée inférieure à 3.7% avec une nette tendance à se réduire. Sur le dernier mois, cette part s'élève à 0.7%, c'est-à-dire 320 km sur les 48'758 km roulés en novembre 2019. La part de consommation des terminaux dépasse légèrement la moitié de l'énergie consommée. Avec la part au dépôt limitée à 7%, ces résultats sont très caractéristiques du système TOSA qui favorise la capacité de transport et la durée de vie des batterie en optimisant leur profil de charge.



Exploitation TOSA du 01.11.2018 au 31.10.2019	
Bus TOSA	
no 1271	47'286 km
no 1272	50'015 km
no 1273	45'822 km
no 1274	51'681 km
no 1275	49'819 km
no 1276	49'259 km
no 1277	51'330 km
no 1278	48'760 km
no 1279	44'308 km
no 1280	52'968 km
no 1281	47'987 km
no 1282	51'667 km
km totaux	590'902 km
Consommation aux terminaux (TFS)	807'319 kWh
Consommation aux terminaux (TFS)	655'747 kWh
Consommation aux terminaux (TFS)	105'863 kWh
Consommation totale	1'568'929 kWh
Consommation moyenne par km sur 12 mois	2.66 kWh/km

Tableau 3 . Consommation énergétique moyenne au niveau des stations de recharge TOSA par km pour 12 mois. Source : TPG, 2019.



Energie transférée aux bus

L'énergie transférée aux bus correspond à la consommation globale moins les pertes de l'infrastructure, c'est-à-dire les TFS, FFS et DFS.

Au niveau des TFS, la plus grande partie des pertes vient des pertes fer à vide et cuivre en charge des transformateurs. D'un point de vue rendement et sur les 8 derniers mois, 87% de l'énergie consommée par les TFS a été transférée aux bus (85% pour le TFS02 et 89% pour le TFS03).

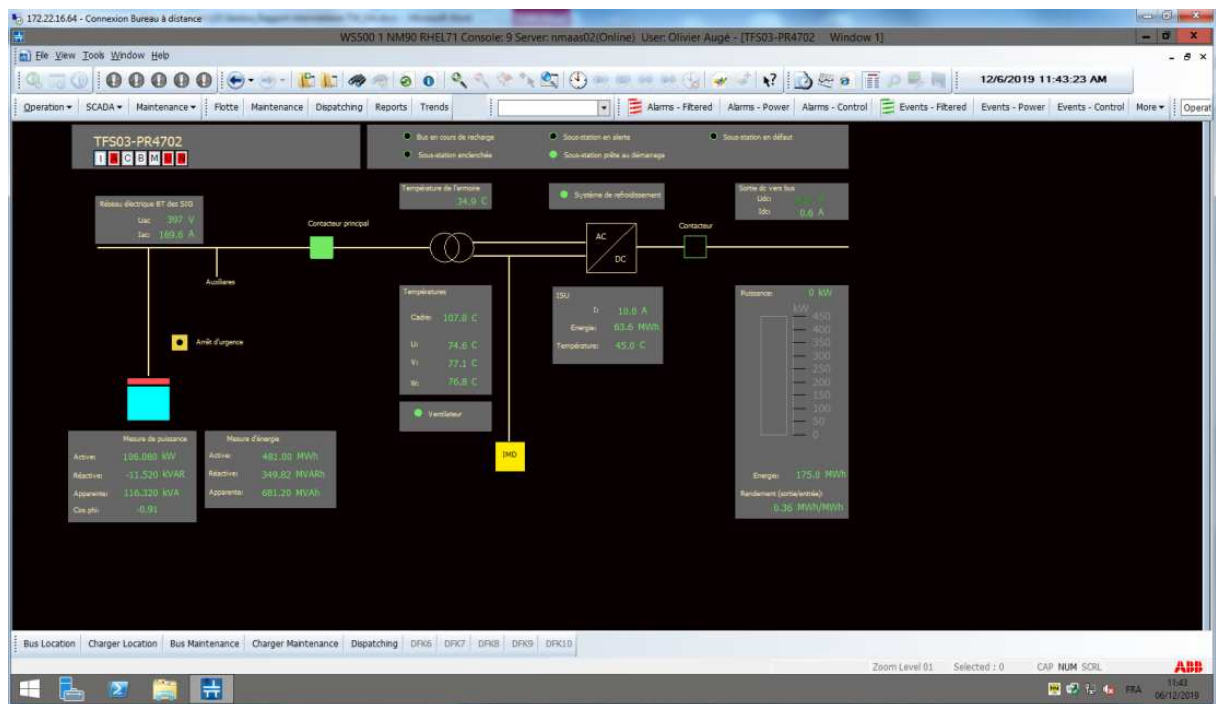


Figure 25 : Synoptique d'un TFS. Source : TPG, 2019.

Sur les FFS, les pertes viennent des pertes fer des transformateurs secs, des pertes de la batterie tampon principalement lors du processus de décharge (alimentation du bus) et de la climatisation des batteries. Afin de pallier aux pertes fer, un mode Eco est en phase de déploiement (déclenchement du disjoncteur principal par exemple aux heures creuses). Pour les FFS, le rendement énergétique est de ~71% (par ex. FFS05 : 74%, FFS06 : 68% et FFS07 : 71%).

Pour le DFS, les pertes proviennent des pertes fer des transformateurs secs et leur refroidissement par ventilation qui est importante en raison de leur température de fonctionnement élevé. Comme pour les FFS, un mode Eco a été mis en place cet été, qui déclenche et enclenche automatiquement le disjoncteur principal. En raison de leur très faible rapport cyclique (Duty cycle), ce mode est efficace. Cependant, la consommation propre du bus représente toujours un offset non négligeable pendant la charge. Ceci est le principal facteur affectant le rendement énergétique pour ce type de charge. Des optimisations seront discutées.

Ainsi, en tenant compte des rendements de l'infrastructure, nous pouvons compléter le tableau avec la part d'énergie effectivement transmise aux bus TOSA. **La consommation énergétique au niveau du bus est ainsi de 2.12 kWh/km pour ce bus articulé.**



Exploitation TOSA du 1.11.2018 au 31.10.2019	
Bus TOSA	
no 1271	47'286 km
no 1272	50'015 km
no 1273	45'822 km
no 1274	51'681 km
no 1275	49'819 km
no 1276	49'259 km
no 1277	51'330 km
no 1278	48'760 km
no 1279	44'308 km
no 1280	52'968 km
no 1281	47'987 km
no 1282	51'667 km
km totaux	590'902 km
Consommation aux terminaux (TFS)	807'319 kWh
Consommation aux terminaux (TFS)	655'747 kWh
Consommation aux terminaux (TFS)	105'863 kWh
Consommation totale	1'568'929 kWh
Consommation moyenne par km sur 12 mois	2.66 kWh/km
Energie transférée aux bus par les terminaux (TFS)	702'368 kWh
Energie transférée aux bus par les flash (FFS)	465'581 kWh
Energie transférée aux bus au dépôt	84'690 kWh
Energie totale transférée aux bus	1'252'639 kWh
Consommation moyenne au niveau du bus par km sur 12 mois	2.12 kWh/km

Tableau 4 : Consommation énergétique moyenne au niveau du bus TOSA par km pour 12 mois. Source : TPG, 2019.



4.1.3 Suivi de la consommation énergétique

Dans le diagramme ci-dessous du mois de juillet, on observe que les TFS aux terminus apportent ~48% (42750/89509) de l'énergie transmise aux bus, 45% pour les FFS aux stations Flash et 7% au dépôt.

A noter que l'énergie apportée aux FFS a permis de limiter le temps de recharge aux terminus à une moyenne journalière toujours < 5 minutes.

Par exemple :

- Le temps de charge moyen le 23.08.2020, un jour tempéré, sur 30 recharges est de 2'20" ;
- Un jour très chaud, le 20.08.2020, dans le créneau horaire 14-15h, le temps moyen de recharge est passé à 4'30" ;
- En hiver, un jour assez froid, 28.02.2020, la moyenne est montée à 4'40" sur un créneau horaire en en heure de pointe du matin.

Les pertes globales côté infrastructure s'élève à 21% de l'énergie consommé côté SIG, ramenées aux km parcourus par les bus cela représente 0.47 kW/km. A noter que les pertes batterie et auxiliaires au niveau des FFS sont supérieures aux pertes batteries.

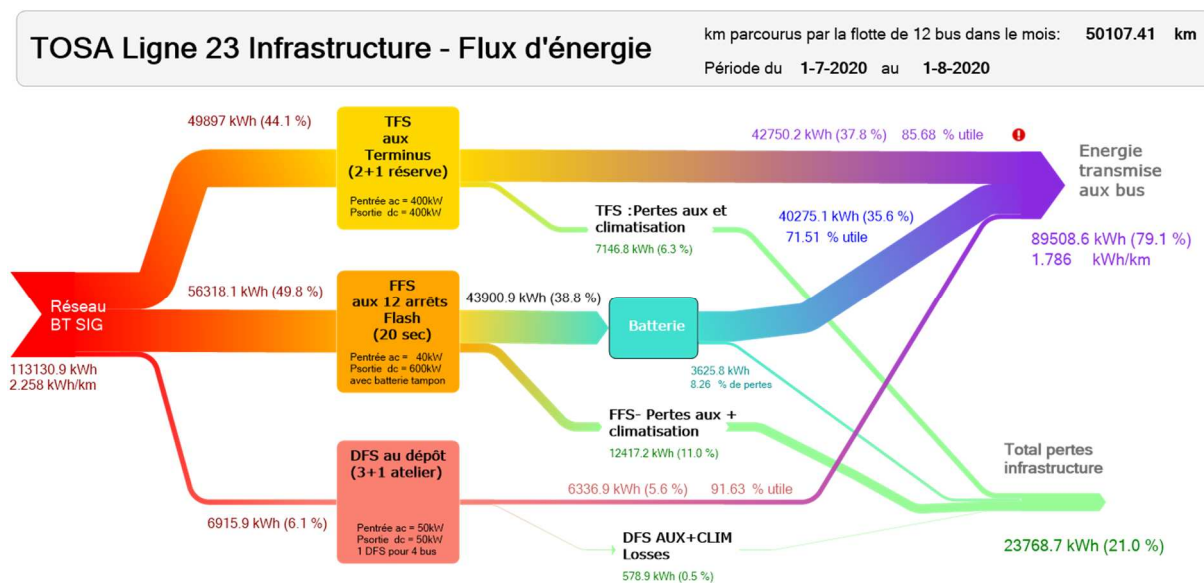


Figure 26 : Diagramme Sankey mensuel des flux d'énergie du réseau électrique aux bus. Source : TPG, 2020.



Dans le diagramme Sankey ci-dessous du mois de juillet pour les bus, on retrouve à gauche en entrée les 89'362 kWh fournis par l'infrastructure. Ce qui donne une consommation moyenne de 1.78 kWh/km sur 50'107 km parcourus.

Grâce aux moteurs à aimant permanent et au réducteur à rapport réduit, l'efficacité énergétique pour la traction est à un niveau de taux de récupération très élevé (56%), comparable aux valeurs que les tpg connaisse pour les trams (54% pour les Tango/Stadler).

Sur l'ensemble des énergies entrantes au convertisseur (210 MWh : infrastructure = 89 MWh, récupération de freinage = 41 MWh et batterie = 80 MWh), les pertes s'élèvent à 6% (13 MWh).

Les batteries restituent 91.4% de l'énergie qui leur a été confiée.

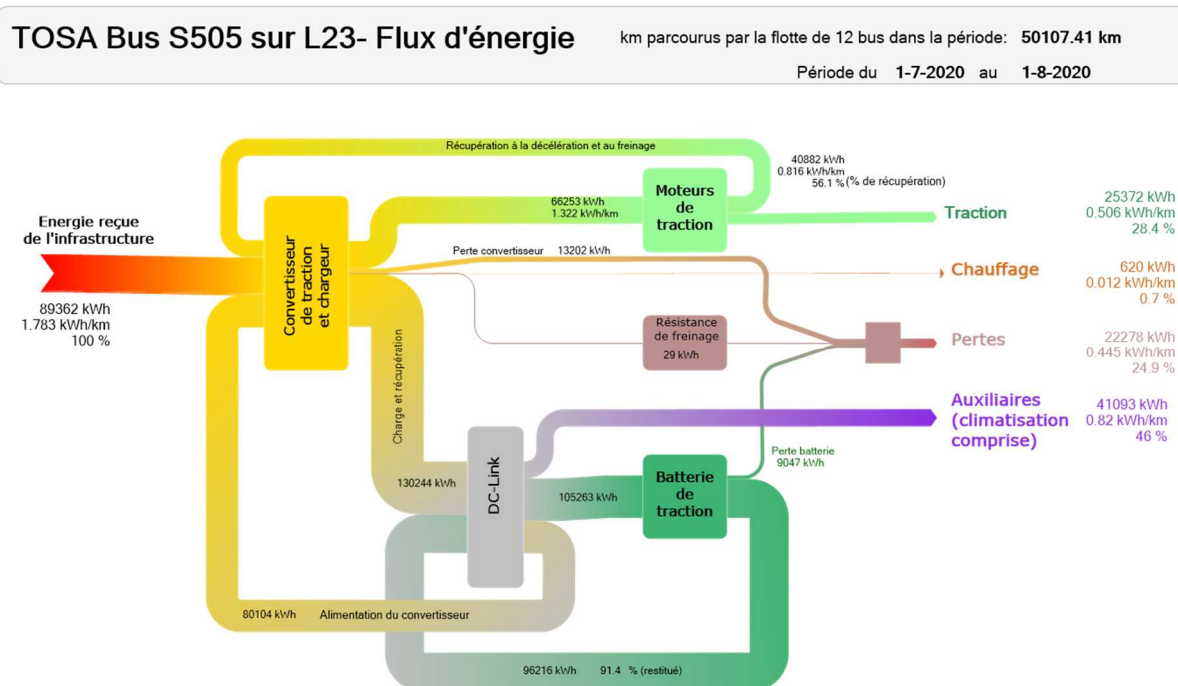


Figure 27 : Diagramme Sankey du mois de juillet 2020 des flux d'utilisation de l'énergies au niveau des bus. Source : TPG, 2020.

Journées chaudes du 08 au 12 août 2020 :

« mois précéd. Données climatiques pour Genève / Cointrin - Août 2020

Date	Température [°C]			Vent [km/h]		Ensoleillement ⁴ [h]	Précipitations totales ⁵ [mm]	Pression ⁶ [hPa]	
	Min ¹	Max. ²	Moy. ³	Moy. ³	Max.			Min	Max.
Sam. 01	21.3	34.1	27	--	48.2	9h 36min	21.9	1010.6	1017.7
Dim. 02	17.8	26.0	20.6	--	48.2	2h 30min	2.3	1012.9	1017
Lun. 03	15.7	17.3	16.2	--	25.9	0h 6min	22.8	1012.5	1015.1
Mar. 04	12.8	21.1	16.9	--	38.9	8h 0min	0.0	1014.4	1017.2
Mer. 05	13.9	24.5	18.7	--	44.4	13h 0min	0.0	1014.7	1018
Jeu. 06	11.9	27.7	20.4	--	31.5	13h 12min	0.0	1015.8	1019.6
Ven. 07	14.4	29.8	22.3	--	20.4	13h 6min	0.0	1015.9	1020.6
Sam. 08	16.3	31.9	24	--	27.8	13h 6min	0.0	1015.4	1021.3
Dim. 09	16.3	32.2	24.3	--	24.1	12h 6min	0.0	1012.1	1019.5
Lun. 10	18.6	33.2	23.6	--	31.5	8h 30min	2.3	1010.9	1017.1
Mar. 11	18.4	31.4	23.9	--	22.2	10h 24min	0.0	1013.1	1017.5
Mer. 12	18.3	34.9	25.8	--	40.7	10h 12min	0.0	1011.4	1015.9
Jeu. 13	18.1	29.3	22.4	--	79.6	5h 24min	10.1	1012.3	1018.3

Figure 28 : Relevé des températures pour Genève, 8 au 12 août 2020. Source : Prevision-meteo.ch, 2020.



Côté infrastructure, sur ces 4 journées, on note une légère augmentation de la consommation pour les auxiliaires et la climatisation sans que cela induise de grandes variations par rapport au mois de juillet.

TOSA Ligne 23 Infrastructure - Flux d'énergie km parcourus par la flotte de 12 bus dans le mois: **7828.07 km**
 Période chaude (journée > 30 degC) du **8-8-2020** au **12-8-2020**

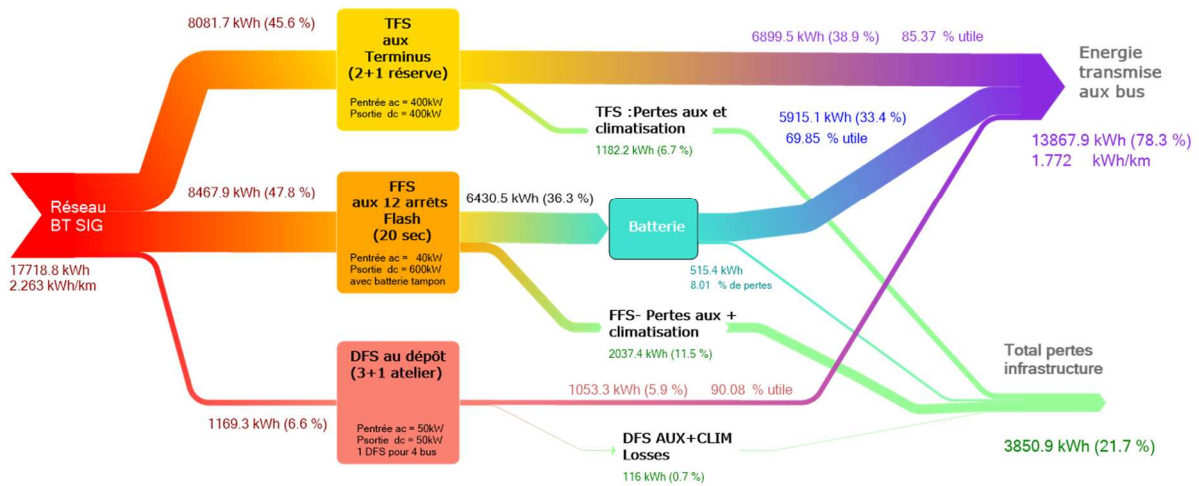


Figure 29 : Diagramme Sankey des flux d'énergie du réseau électrique aux bus lors d'une période chaude (8-12 août 2020).
 Source : TPG, 2020.

Côté bus, sur ces 4 journées, l'augmentation de la part des auxiliaires est significative en passant de 46% à 54%.

TOSA Bus S505 sur L23- Flux d'énergie km parcourus par la flotte de 12 bus dans la période: **7828.07 km**
 Période chaude (journée > 30degC) du **8-8-2020** au **12-8-2020**

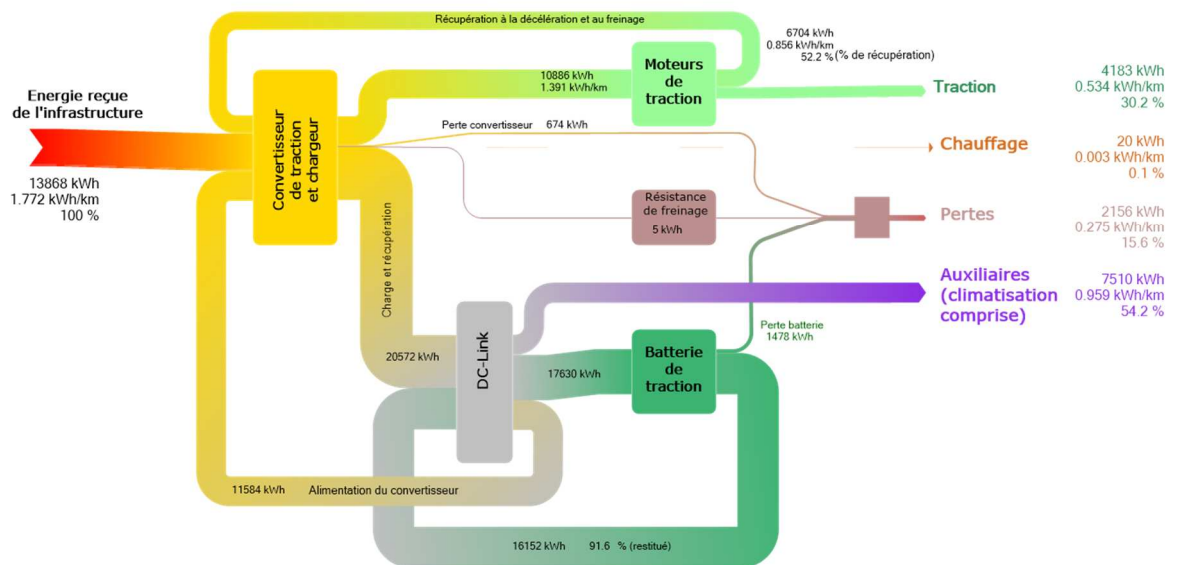


Figure 30 : Diagramme Sankey des flux d'utilisation de l'énergies au niveau des bus lors d'une période chaude (8-12 août 2020).
 Source : TPG, 2020.



Dans une journée au climat tempéré (04.08.2020), nous remarquons que l'état de charge des batteries (State of Charge - SoC) reste à des valeurs très élevées.

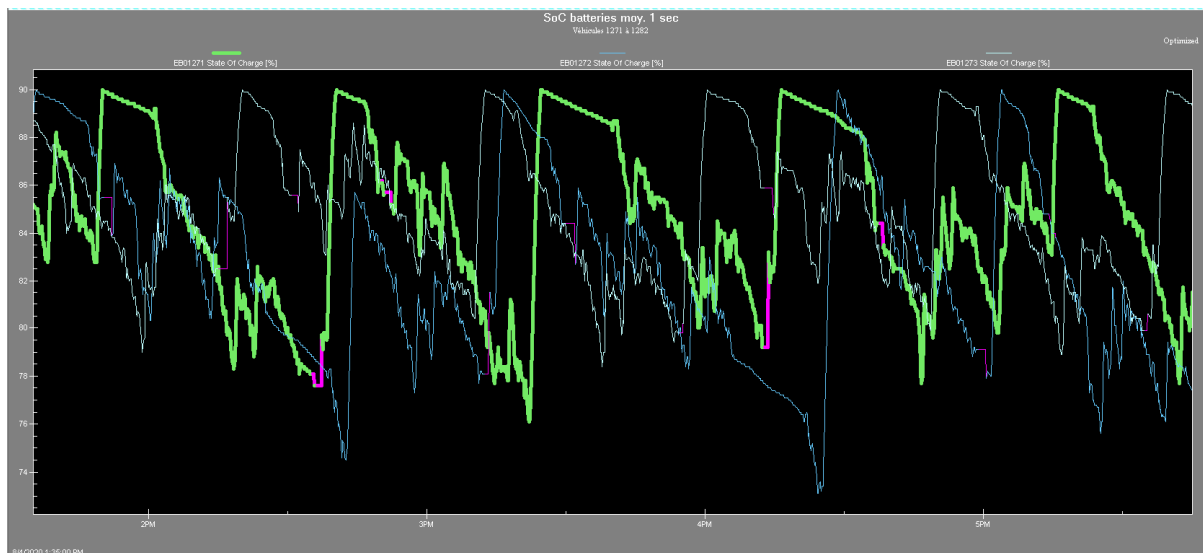


Figure 31 : Diagramme du SoC des batteries des bus lors d'une journée estivale tempérée (4 août 2020). Source : TPG. 2020.

Dans une journée très chaude (20.08.2020), nous remarquons que le SoC des batteries reste encore à des valeurs élevées.

Graphiques horaires

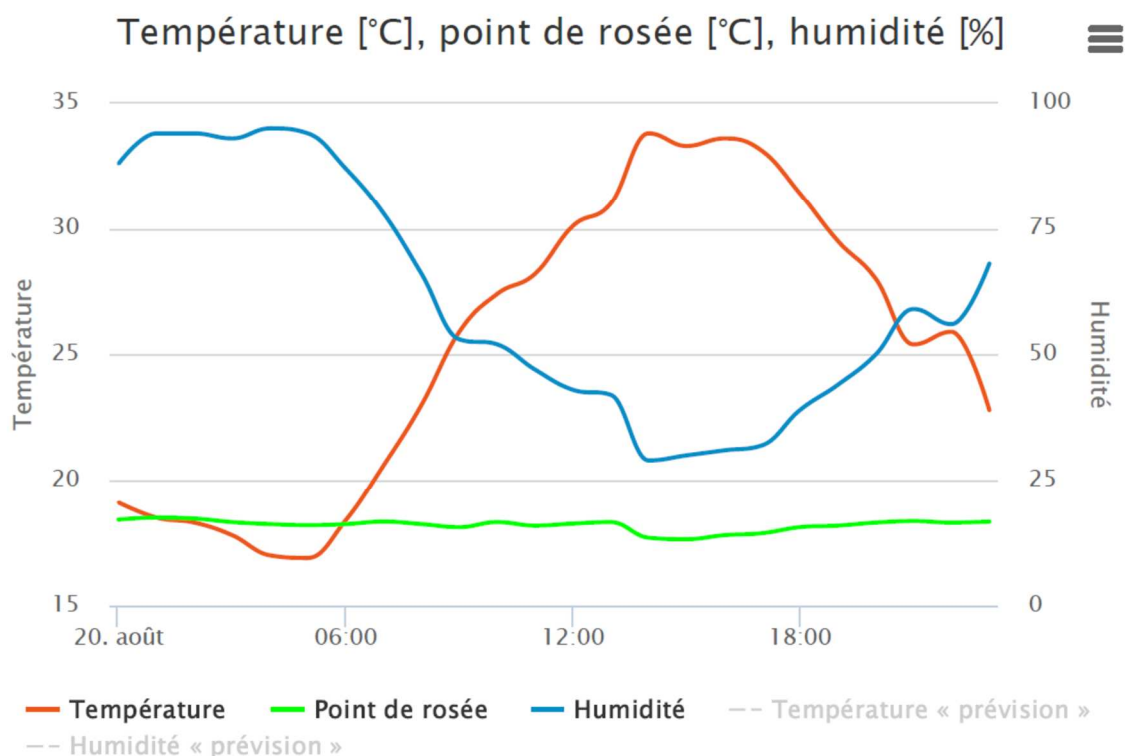


Figure 32 : Relevé horaire de la température de l'air lors d'une journée très chaude (20 août 2020). Source : prevision-météo.ch, 2020.

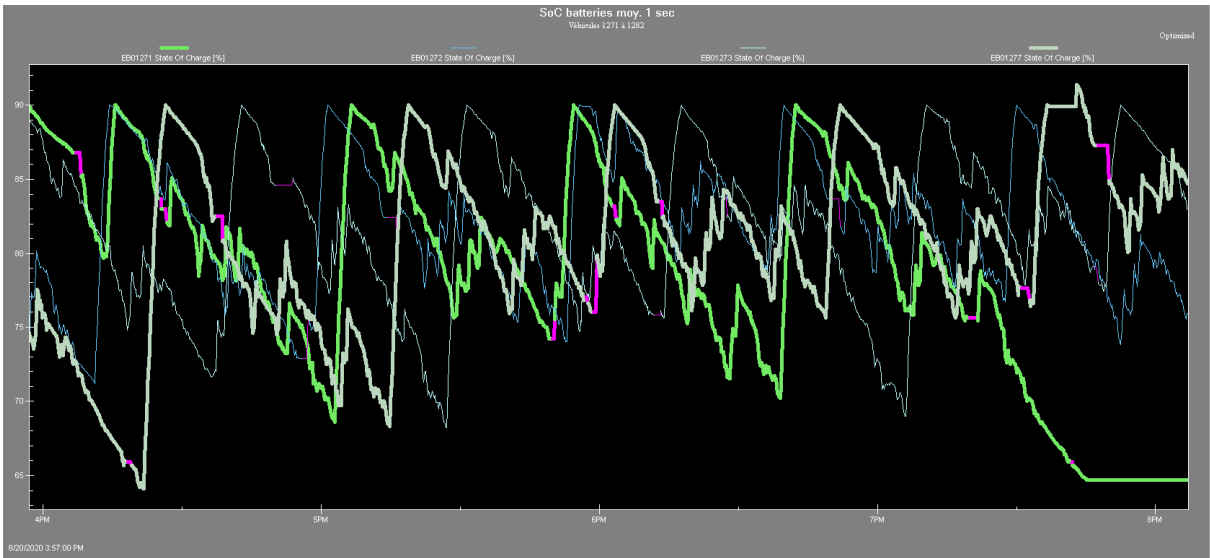


Figure 33 : Diagramme du SoC des batteries des bus lors d'une journée estivale très chaude (20 août 2020). Source : TPG. 2020.

Journées froides ou tempérées de janvier et mars 2020 :

Données climatiques pour Genève / Cointrin - Janvier 2020										Données climatiques pour Genève / Cointrin - Mars 2020									
Date	Température [°C]			Vent [km/h]		Ensoleillement ⁴ [h]	Précipitations totales ⁵ [mm]	Pression ⁶ [hPa]		Date	Température [°C]			Vent [km/h]		Ensoleillement ⁴ [h]	Précipitations totales ⁵ [mm]	Pression ⁶ [hPa]	
	Min ¹	Max. ²	Moy. ³	Moy. ³	Max.			Min	Max.		Min ¹	Max. ²	Moy. ³	Moy. ³	Max.			Min	Max.
Mer. 01	-1.4	2.1	1.7	--	13.0	0h 0min	0.0	1033.7	1035.6	Dim. 01	7.2	14.0	9.1	--	66.7	5h 12min	0.0	999.5	1007.6
Jeu. 02	9.0	2.4	6.6	--	13.0	0h 35min	0.0	1031.4	1034.4	Lun. 02	2.0	6.5	5.1	--	64.8	0h 0min	22.3	989.8	1003.6
Ven. 03	-2.3	10.4	4	--	36.2	1h 30min	0.0	1028.1	1033.1	Mar. 03	1.3	9.1	5.1	--	38.9	8h 0min	0.0	1004.2	1013.5
Sam. 04	3.0	10.2	5	--	22.2	0h 24min	0.0	1032.1	1036.9	Mer. 04	1.1	10.3	6.1	--	33.3	6h 30min	3.4	1012.4	1017.9
Dim. 05	-2.8	6.3	2	--	36.2	7h 0min	0.0	1033.6	1037.8	Jeu. 05	5.7	9.3	7.5	--	55.6	0h 0min	34.0	995.9	1011.7
Lun. 06	-3.5	6.8	6.8	--	27.6	7h 30min	0.0	1028.5	1035.1	Ven. 06	4.9	9.0	6.7	--	55.6	2h 30min	0.0	1000.9	1013.6
Mar. 07	-2.0	8.1	1.7	--	14.8	4h 12min	0.0	1029.7	1033.6	Sam. 07	1.7	9.3	5.4	--	31.5	6h 12min	0.0	1014.4	1026.7
Mer. 08	-3.2	7.5	1.3	--	13.0	5h 48min	0.0	1030.9	1036	Dim. 08	-1.6	13.4	6.1	--	33.3	8h 12min	4.8	1016.9	1026.5
Jeu. 09	-1.4	12.4	5.5	--	38.9	7h 30min	1.3	1020.3	1032.1	Lun. 09	5.3	10.3	6.4	--	40.7	3h 18min	1.0	1016.9	1024.6
Ven. 10	4.6	10.2	6.2	--	42.6	2h 0min	0.0	1022.1	1032.8	Mar. 10	6.9	6.6	5	--	25.9	0h 0min	5.3	1023	1024.8
Sam. 11	9.1	8.2	3.5	--	22.2	3h 35min	0.0	1031.9	1034.2	Mer. 11	6.4	17.0	10.4	--	30.4	4h 0min	0.0	1021.3	1024.8
Dim. 12	-0.2	9.9	3.4	--	16.7	7h 24min	0.0	1028.2	1032.6	Jeu. 12	4.0	17.8	12	--	33.3	0h 36min	0.1	1016.8	1022.2
Lun. 13	-3.6	6.2	6.6	--	13.0	2h 12min	0.0	1022	1030.1	Ven. 13	8.5	12.5	9	--	40.7	5h 30min	0.0	1020.3	1023.4
Mar. 14	-3.1	11.1	4.6	--	44.4	4h 48min	0.0	1019.6	1022.9	Sam. 14	6.3	12.5	6.4	--	24.1	8h 12min	0.0	1019.9	1023
Mer. 15	-0.3	12.7	7.2	--	57.4	6h 6min	0.0	1021	1030.1	Dim. 15	-3.1	15.2	7	--	24.1	10h 6min	0.0	1014.9	1023
Jeu. 16	-0.7	10.1	3.7	--	20.4	7h 36min	0.0	1027.1	1031.5	Lun. 16	2.4	16.6	9.6	--	24.1	8h 54min	0.0	1017.8	1029
Ven. 17	-2.3	7.1	3	--	22.2	0h 0min	6.3	1022.9	1028.3	Mar. 17	3.5	17.7	10.9	--	29.4	8h 12min	0.0	1027.7	1031.8
Sam. 18	-0.7	7.6	2.6	--	24.1	7h 12min	0.0	1027.6	1031.4	Mer. 18	4.1	18.7	10.9	--	22.2	10h 24min	0.0	1023.8	1030.9
Dim. 19	-2.3	5.6	3.1	--	74.1	7h 36min	0.0	1029.2	1037.5	Jeu. 19	4.7	19.3	11.5	--	20.4	10h 36min	0.0	1020.1	1026.7
Lun. 20	1.3	4.3	2.1	--	74.1	8h 36min	0.0	1037.8	1042.1	Ven. 20	4.7	19.1	11.7	--	29.0	7h 36min	0.0	1016.9	1022.8
Mar. 21	-2.9	4.3	9.4	--	29.6	7h 0min	0.0	1037.5	1043	Sam. 21	4.2	18.5	10.1	--	48.2	8h 36min	0.0	1011.8	1019.7
Mer. 22	-3.7	5.0	-0.2	--	20.4	0h 30min	0.0	1032.5	1038.1	Dim. 22	5.4	6.7	6.1	--	48.2	0h 0min	0.0	1017.1	1024.3
Jeu. 23	-4.0	6.9	-0.7	--	20.4	0h 0min	0.0	1028.4	1034.1	Lun. 23	2.6	7.7	4.4	--	40.7	4h 6min	0.0	1024.6	1027.3
Ven. 24	-0.8	2.3	6.8	--	13.0	0h 0min	0.0	1025.5	1029.8	Mar. 24	6.1	8.4	4	--	48.2	8h 42min	0.0	1020.9	1027.5
Sam. 25	1.0	3.6	2	--	13.0	0h 0min	0.0	1022.8	1025.7	Mer. 25	6.1	9.1	4.6	--	46.3	8h 30min	0.0	1014	1023.8
Dim. 26	9.5	4.3	2.3	--	13.0	0h 0min	2.3	1021.8	1023.5	Jeu. 26	-5.7	10.0	5.2	--	42.6	8h 42min	0.0	1012.1	1015.2
Lun. 27	-1.0	8.5	4.7	--	51.9	1h 42min	3.1	1011.4	1022.7	Ven. 27	-6.3	12.6	6	--	40.7	7h 30min	0.0	1013.1	1017.8
Mar. 28	6.4	9.7	6.7	--	77.8	0h 0min	7.4	1007.7	1014.5	Sam. 28	1.2	16.8	9.4	--	22.3	8h 36min	0.0	1013.9	1018.8
Mer. 29	-4.6	7.4	5.6	--	50.0	0h 18min	3.5	1014.3	1023.2	Dim. 29	6.2	14.7	8.3	--	53.7	1h 54min	0.0	1014.7	1019.9
Jeu. 30	-1.9	7.8	4	--	24.1	0h 30min	4.9	1017.8	1023.2	Lun. 30	3.9	4.5	3.8	--	59.3	0h 0min	0.0	1018.4	1021.7
Ven. 31	6.1	14.0	8.9	--	22.2	2h 48min	0.1	1017.6	1021.1	Mar. 31	2.1	10.6	5.6	--	59.3	8h 54min	0.0	1020	1023
Total	-4.6	14.0	3.1	0	77.8	114h 24min	28.9	1007.7	1043	Total	-1.8	19.3	7.4	0	66.7	182h 30min	77.7	989.8	1031.8

Figure 34 : Relevés de la température de l'air à Genève en janvier et mars 2020. Source : prevision-meteo.ch, 2020.

Dans les courbes de l'état de charge (SoC) des batteries sur une journée hiver (28.02.2020) nous constatons que les cycles de SoC reste dans la zone la plus favorable pour la durée de vie des batteries. A de très rares exceptions, le SoC descend à 55%.

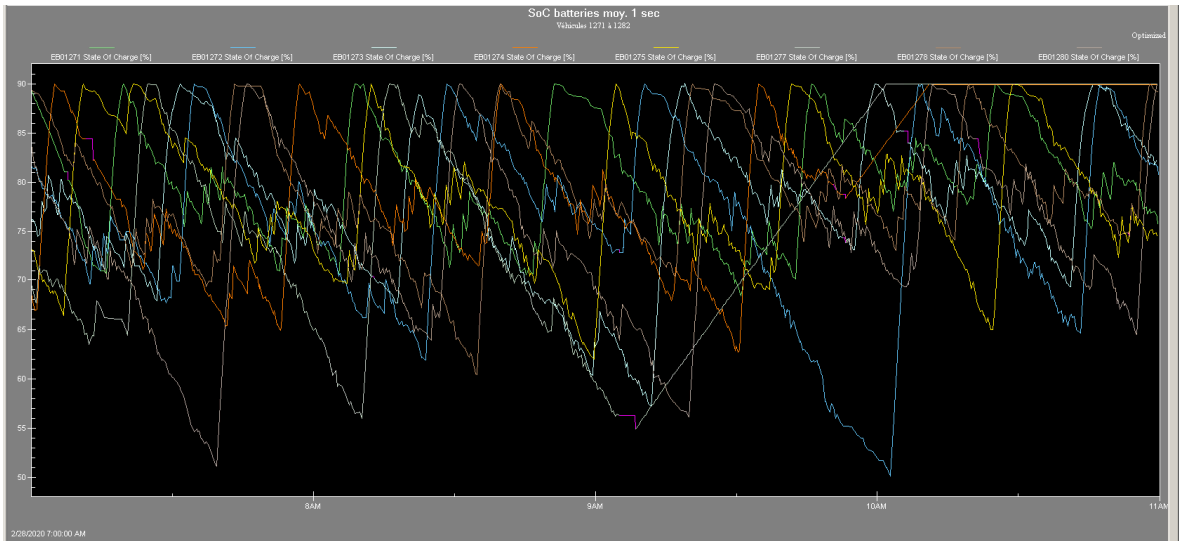


Figure 35 : Diagramme du SoC des batteries des bus lors d'une journée hivernale (28 février 2020). Source : TPG. 2020.

Pour janvier, regardons seulement le diagramme de la partie infrastructure, qui nous renseigne aussi sur les bus. La part transmise (85.6%) au bus est plus élevée de 6% qu'en été, principalement par l'augmentation (de 48% à 59%) de la part provenant des TFS aux terminus et dans une moindre mesure par la réduction de l'énergie nécessaire au refroidissement des équipements. Cependant, nous remarquons que la consommation par km est de 2.38 kWh/km côté bus.

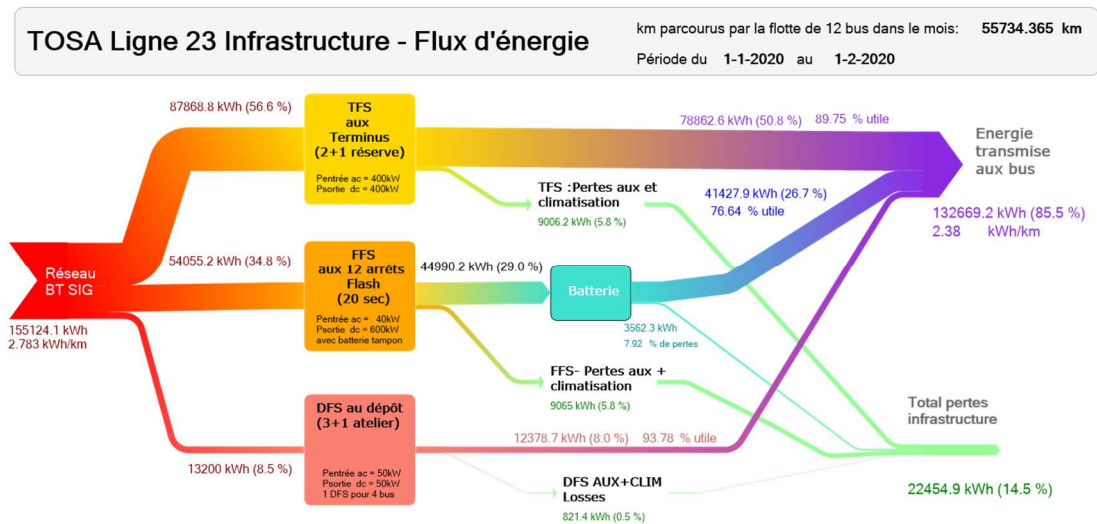


Figure 36 : Diagramme Sankey des flux d'énergie du réseau électrique aux bus lors d'une période froide (janvier 2020). Source : TPG, 2020.



Pour mars :

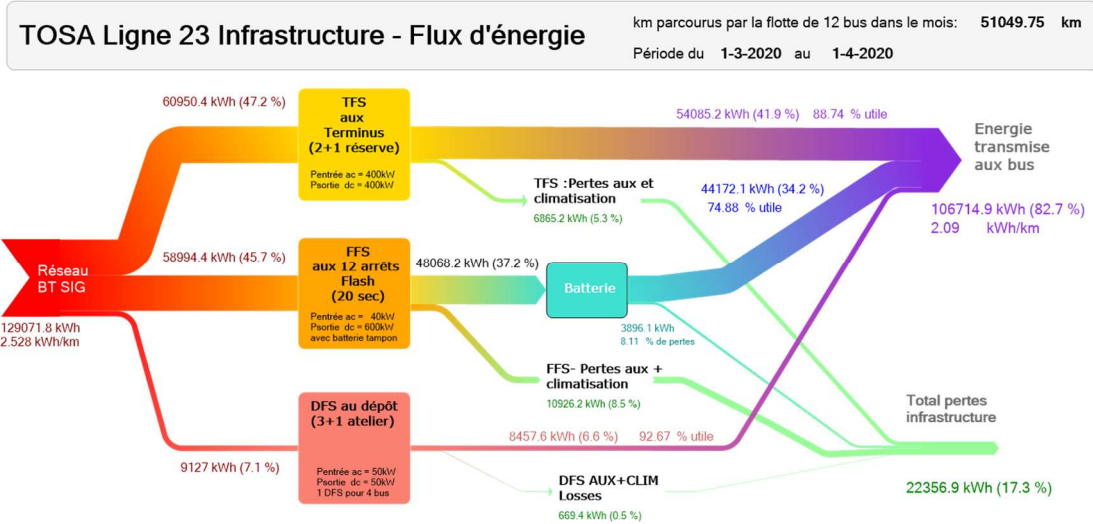


Figure 37 : Diagramme Sankey des flux d'énergie du réseau électrique aux bus lors d'une période peu fraîche (mars 2020).
Source : TPG, 2020.

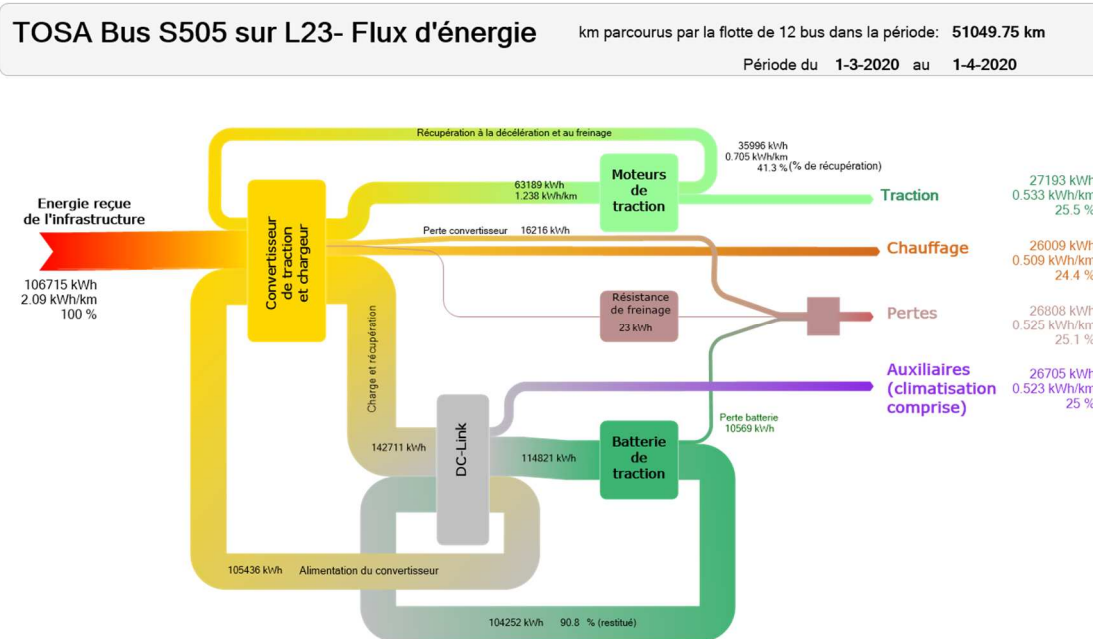


Figure 38 : Diagramme Sankey des flux d'utilisation de l'énergies au niveau des bus lors d'une période fraîche (mars 2020).
Source : TPG, 2020.



4.2 Comparaison des coûts complets

Cette comparaison des coûts a pour but d'effectuer un premier contrôle des hypothèses présentées dans la Loi 11720 validée par le Grand Conseil du Canton de Genève.

4.2.1 Coûts d'investissement

A fin 2019, sans autres dépenses sur 2020, le tableau ci-dessous présente le détail des dépenses d'investissement du projet. Le budget global est respecté. Sur l'ensemble des postes pris individuellement, ces coûts ont été dimensionnés correctement et ont été maîtrisés par l'équipe de projet.

Les coûts d'acquisition des bus électriques sont identiques à ceux des trolleybus et avoisinent 1 million de francs suisses. Il s'agit de petites séries. Ces valeurs restent toutefois très élevées en rapport avec les autobus diesel. Le ratio est environ de 2 à 2,5 suivant les configurations.

Ces coûts d'acquisitions devraient diminuer progressivement dans les 10 prochaines années pour tendre vers ceux des autobus diesel. Toutefois cela dépendra fortement de la production en grande série de ces bus électriques et la baisse du coût des batteries.

Les investissements en infrastructures, selon le tableau ci-dessous sont composés de 13 stations de recharge flash, 3 terminus dont un intermédiaire, de 4 stations de dépôt mais aussi tous les coûts liés à l'installation des stations telles que les taxes de raccordement, les travaux de génie civil. Ces coûts devraient aussi subir dans les prochaines années une baisse importante. Celle-ci proviendra essentiellement de la diminution importante de nombre de stations flash. L'optimisation du dimensionnement de l'exploitation d'une ligne va probablement aller progressivement vers une limitation des infrastructures à des stations terminus et quelques stations intermédiaires de recharge, couvrant le risque en cas d'exploitation dégradée. Cette optimisation va de pair avec l'amélioration technologique des batteries et de l'augmentation de leur capacité.

PROJET TOSA L11720 Situation au 31.12.2019	Budget HT selon L11720	Factures payées	Ecart budget réel
12 autobus Hess	14'087'352	14'090'594	-3'243
Infrastructures	13'890'000	13'807'284	82'716
Equipements électriques ABB	10'130'000	10'130'000	-
Génie civil	1'600'000	1'510'886	89'113.91
Taxes de raccordements	900'000	932'488	-32'488.10
Honoraires - Analyses	600'000	498'179	101'820.95
Communication	400'000	366'435	33'565.00
Imprévus	260'000	369'296	-109'295.89
Total projet HT	27'977'352	27'897'879	79'473.09

Figure 39 : Synthèse des coûts d'investissement à la fin du projet. Source : TPG, 2020.



4.2.2 Coûts complets d'exploitation

Prévisions de coûts complets d'exploitation selon la Loi 11720

La comparaison des coûts complets d'exploitation est basée sur les estimations reprises dans la Loi 11720 de 2015 et les coûts des comptes analytiques par ligne.

Il faut relever comme le montre le tableau ci-dessous, que la part des coûts variables identiques aux 3 modes d'exploitation : conduite, logistique roulement, infrastructure client, et administratifs, représente 63% du montant total des coûts d'exploitation.

Les valeurs d'amortissement des véhicules sont respectivement de 15 ans pour les bus diesel, 20 ans pour les trolleybus et les bus TOSA. Les infrastructures elles sont amorties sur une durée de 20 ans pour les lignes aériennes des trolleybus et les stations de recharge TOSA.

Coûts propres	PL11720		
	Diesel	Trolleybus	TOSA
Amortissement véhicules	450'000	600'000	660'000
Amort. infrastructures électriques - y.c. taxes de raccordement	-	789'200	717'500
Amort. gestion de projet		4'900	7'600
Sous-total amort. (hors intérêts)	450'000	1'394'100	1'385'100
Energie	355'100	362'700	445'500
Détaxe			
Maintenance	485'600	1'509'200	953'200
Sous-total énergie et maintenance	840'700	1'871'900	1'398'700
Coûts propres totaux	1'290'700	3'266'000	2'783'800
Coûts identiques			
Conduite (salaires chauffeurs)	3'642'000	3'642'000	3'642'000
Logistique roulement (centre de conduite)	728'400	728'400	728'400
Infrastructure client (distributeurs billets)	546'300	546'300	546'300
Administratifs	546'300	546'300	546'300
Coûts identiques totaux	5'463'000	5'463'000	5'463'000
TOTAL	6'753'700	8'729'000	8'246'800
Comparaison Réf. Diesel 100%	100%	129%	122%

Figure 40 : Synthèse des coûts complets d'exploitation théoriques chiffrés en 2015 pour le projet de loi d'investissement 11720 en 2015.
Source : Etat de Genève, 2015.

Coûts complets d'exploitation pour l'année 2019

Les coûts d'exploitation présentés sur l'année 2019 représentent bien une comparaison des 3 modes d'exploitation car la ligne 23 a été sur cette période entièrement couvertes par les bus électriques TOSA.

Les coûts de maintenance des véhicules et infrastructures sont ceux pour la période concernée qui présentent la plus grande incertitude car contractuellement avec Hess et ABB, les travaux de maintenance pièces et main d'œuvre sont garantis 2 ans et les pièces 3 ans de plus.

Nous relevons aussi sur les coûts d'énergie, l'impact de la rétrocession des droits de carburant sur le diesel et le coût du kWh plus bas appliqué aux trolleybus qu'aux TOSA à consommation égale. En effet, il résulte de l'alimentation par les sous-stations 18 kV des trolleybus, un tarif préférentiel par de distribution d'énergie selon les tarifs en vigueur sur le canton de Genève.



Ces deux points ne favorisent pas le projet TOSA. L'exploitation de la ligne en bus électrique en remplacement de bus diesel a permis d'obtenir toutefois une indemnité de 112'000 CHF sur une année par le programme My Climate / CO2. De cette manière, le coût total de la consommation énergétique est avantageux pour TOSA par rapport au diesel et aux trolleybus. Ceci démontre l'importance des encouragements à la transition énergétique.

Partant de ces constats, les premiers résultats confirment les tendances estimées en 2015. **Sur une base 100% pour le diesel, TOSA a un surcoût de 114% et le trolleybus de 124%**. Tout au long des années à venir, l'exploitation intégrale de la ligne 23 en TOSA et les différentes analyses d'exploitation mais aussi des coûts permettront d'affiner ces premières indications.

Coût d'exploitation 2019

Coûts propres	Diesel	Trolleybus	TOSA
Amortissement véhicules y.c. frais financiers	484'414.00	1'115'976.00	1'117'699.00
Amort. infrastructures électriques - y.c. taxes de raccordement		789'200.00	717'500.00
Sous-total amort. (hors intérêts)	484'414.00	1'905'176.00	1'835'199.00
Energie	513'201.00	239'282.00	328'408.00
Détaxe : RTC-Diesel, MyClimate-TOSA	-207'383.00		-112'000.00
Maintenance véhicules matières et main d'œuvre	1'370'138.00	1'657'829.00	1'007'254.00
Maintenance des infrastructures matières et main d'œuvre		366'923.00	250'000.00
Sous-total énergie et maintenance	1'675'956.00	2'264'034.00	1'473'662.00
Coûts propres totaux	2'160'370.00	4'169'210.00	3'308'861.00
Coûts identiques			
Conduite (salaires chauffeurs)	4'031'790.00	4'031'790.00	4'031'790.00
Logistique roulement (centre de conduite)	841'965.00	841'965.00	841'965.00
Infrastructure client (distributeurs billets)	627'599.00	627'599.00	627'599.00
Administratifs	538'849.00	538'849.00	538'849.00
Coûts identiques totaux	6'040'203.00	6'040'203.00	6'040'203.00
TOTAL	8'200'573.00	10'209'413.00	9'349'064.00
Comparaison Réf. Diesel 100%	100%	124%	114%

Figure 41 : Estimation des coûts complets d'exploitation une année après la mise en service. Source : TPG, 2019.

4.3 Volet sociologique

A l'issue de la 1^{ère} phase, un rapport intermédiaire a été produit (annexe A). Sans entrer dans les détails de ce rapport très complet, il apparaît que le projet TOSA L23 est spontanément mal connu; le « concept produit » testé est quant à lui très bien reçu et accepté par les voyageurs, globalement tous sensibles aux questions environnementales et ayant tous adopté des gestes écologiques au quotidien dans leur vie privée comme le tri, l'économie d'eau de lavage ou le choix de la marche ou du vélo plutôt que le bus diesel ou l'auto...

Le projet TOSA fédère fortement ces voyageurs écologiquement éduqués, autour de la valeur principale de respect de l'environnement, perçue selon deux approches simultanées :

1. **Une évidence** : l'électricité motrice apparaît comme une énergie moderne et écologique (propre) qui s'inscrit inéluctablement dans le sens de l'Histoire et remplacera inexorablement les énergies fossiles sur la planète.



2. **Un engagement** : la responsabilité environnementale des TPG, incarnée par TOSA en tant que "preuve" donne au voyageur le sentiment d'être accompagné par une compagnie engagée dans ses mêmes visions et efforts écologiques de citoyen.

La technologie mise en avant dans le projet TOSA est moins perçue par les voyageurs comme prouesse technologique que comme une preuve de l'engagement des TPG.

Cet engagement environnemental des TPG crée avec le voyageur une relation émotionnelle nouvelle qui dépasse l'attente primaire d'une mission de transport d'un point A à un point B : le voyageur se sent en symbiose avec une institution historique qui, avant le projet TOSA apparaissait plutôt lointaine, inaccessible.

A ce titre, la technologie et l'innovation valorisent et crédibilisent l'engagement des TPG tout en renforçant la relation émotionnelle entre le transporteur et ses clients/citoyens.

Mais, aujourd'hui, le concept TOSA testé ne parvient pas à clairement communiquer et expliquer cette innovation technologique au voyageur. Les interrogations les plus importantes des voyageurs concernent le mode de recharge, la nature et le type de batterie. Ces éléments sont par ailleurs considérés par les voyageurs comme le cœur de l'innovation TOSA.

Ce manque de clarté sur le fonctionnement central et concret du projet réactive des craintes de risques technologiques pour le voyageur et des doutes sur la nature de l'électricité.

La 2^{ème} phase d'étude a été lancée en mai 2019, une fois les problèmes de sifflement à la recharge résolus (cf. chapitre 2.2.3), avec les objectifs suivant :

- Explorer et comprendre l'expérience de transport et le niveau de satisfaction des voyageurs ayant expérimenté le bus TOSA.
- Découvrir et comprendre les forces et les faiblesses du TOSA.
- Faire émerger les axes de communication et leur optimisation.
- Pondérer ses valeurs/éléments auprès de la cible des voyageurs de la 23.

Il ressort des enquêtes et entretiens menés lors de la 2^{ème} phase que le TOSA, bien apprécié par tous, offre une expérience unique à travers deux valeurs différentes qui se complètent :

1. **Une nouvelle valeur d'usage** : le voyageur voit sa relation basique d'aller de A à B, enrichie par le **plaisir** de profiter d'un véhicule étonnant, confortable, moderne et innovant.
2. **Une nouvelle valeur d'image** : TOSA permet au voyageur d'être *facilement* en accord avec ses **convictions environnementales** et l'implique plus émotionnellement dans sa relation aux TPG.

Des résultats portent aussi sur l'identité TOSA ainsi que sur le renforcement de la relation entre le client et l'exploitant de transports publics.

Concernant la dimension écologique, les auteurs de l'étude relèvent que le TOSA fabrique des voyageurs impliqués car il est pour tous un catalyseur du sentiment écologique qui permet de concilier facilement la posture éco-responsable du citoyen-voyageur avec son besoin primaire de se transporter :

- Les plus impliqués par la valeur environnementale de TOSA sont les voyageurs éduqués qui ont une certaine appétence pour l'innovation technique et la chose environnementale. Ils assument la fierté d'utiliser un moyen de transport de pointe écologiquement responsable. Aux arrêts, certains attendraient un TOSA plutôt que de prendre un diesel...



- Les autres voyageurs, soumis à leurs besoins impétueux de transport entre un point A et un point B, restent néanmoins positivement sensibles à la valeur écologique du TOSA, même si plus passivement.

Cette étude révèle cependant une faiblesse dans la démarche de sensibilisation des voyageurs, celle des enjeux du projet qui sont malheureusement mal connus. En effet, excepté pour les quelques voyageurs éduqués qui s'informent activement, le projet TOSA L23 apparaît comme un essai isolé dont les enjeux sont inconnus de la plupart des voyageurs.

Ce manque de clarté des autorités sur l'implémentation du réseau dans son entier, vs un « coup marketing sur la ligne de l'aéroport », affaiblit la valeur aspirationnelle d'engagement écologique véhiculé par le TOSA et laisse place au doute du *green washing* et à la résurgence fantasmagorique du *côté obscur de la force électrique*.

Les principales recommandations qui émergent du rapport de l'étude portent sur le positionnement du TOSA qui doit être plus fort et légitimé :

3. **Accentuer la spécificité du véhicule TOSA** pour ne pas le banaliser dans le flot de la flotte TPG : renforcer les différences visuelles, maintenir la pression de communication « en abyme », innover en termes de prises USB et services spécifiques à bord.
4. **Enrichir la valeur symbolique du TOSA** en communiquant fortement et clairement sur les champs suivants :
 - Réassurances pour lever les doutes issus du côté « obscur » de la propulsion électrique : origine, risque technologique, autonomie.
 - « Made in Suisse » et succès assumés de l'innovation : technologie déjà vendue à Nantes.
 - Périmètre du projet et implication des TPG et/ou de l'état : expérience limitée à la ligne 23 ou expansion au réseau complet ?

Le rapport complet de la 2^{ème} phase détaille les différentes dimensions étudiées et propose une analyse par type de répondants. Il est en annexe B du présent rapport.



5 Conclusions et résumé

« N'oubliez pas qu'il s'agit d'un projet d'innovation » : telle est la phrase souvent répétée au fil des années, depuis le démarrage du projet en 2015 jusqu'à sa mise en service complète en 2019. Cette piqure de rappel était nécessaire, non seulement du fait du caractère « phare » de ce projet mais surtout de par son exposition à un large spectre d'acteur, aussi bien à l'interne des institutions partenaires de projet qu'à l'externe, s'agissant d'un projet de transport public, visible dans l'espace public.

En effet, comme toute innovation technologique et bien qu'ayant atteint un niveau TRL7 avant le démarrage du présent projet, le projet a considérablement évolué depuis le démonstrateur mis en service en 2013. Il y a eu d'une part les évolutions propres aux multiples composants techniques qui compose la technologie mais aussi d'autre part des adaptations/modifications en fin de développement, suite à diverses pannes et anomalies. Ces dysfonctionnements ont affecté en premier lieu les voyageurs de la ligne et les conducteurs, c'est pourquoi ils ont eu une certaine « publicité » hors du cercle restreint du projet. Sur ce point et à la différence d'un projet d'innovation qui ne concernerait pas un si large spectre de bénéficiaires, le premier enseignement à tirer est qu'il faut absolument prévoir une période suffisante pour la marche à blanc, ce que le calendrier d'inauguration n'a pas permis. Ce n'est qu'après la mise en service commerciale avortée en décembre 2017 du fait du problème sur les batteries que les marches à blanc ont pu réellement être menées au 1er trimestre 2018.

Concernant le grand public, les voyageurs, les riverains, l'enseignement principal à retenir est que ces groupes sont intéressés par les questions de transition énergétique, notamment dans le domaine de la mobilité. Les problématiques liées à cette transition sont déjà largement partagées et les questions éclairées ne peuvent et ne doivent pas être éludées. Elles portent sur la propreté de la source énergétique, sur la fabrication et le recyclage des batteries mais aussi sur le risque technologique lié à leur usage. Il est ainsi primordial de développer une communication axée sur la réassurance pour lever les doutes issus du côté « obscur » de la propulsion électrique : origine, risque technologique.

S'agissant de l'exploitation de la ligne 23 avec 12 bus électriques, le bilan des 2 dernières années démontre la nécessité et la pertinence de faire des expérimentations en conditions et dimensions réelles et quotidiennes. Les efforts importants consentis pour y arriver nous permettent aujourd'hui de préparer l'avenir du bus électrique à Genève à grande échelle. En effet, bien que l'analyse des coûts complets sur 2019 montre que le TOSA reste plus cher que le diesel, des économies d'échelles inhérentes à un passage du mode « ligne » au mode « réseau » sont à escompter.

En effet, le coût d'investissement reste plus élevé aujourd'hui pour un bus électrique et c'est donc dans les coûts opérationnels que les économies peuvent être faites. Les bus électriques nécessitent moins de maintenance que leurs prédécesseurs pour autant que les infrastructures de recharge, les coûts de l'électricité incluant les coûts de raccord au réseaux, le vieillissement des batteries soient maîtrisés. Cela implique donc d'avoir mis en place des systèmes de supervision et de contrôle (SCADA) des équipements roulants et fixes pour mieux les gérer mais aussi d'avoir mis en place un système de la gestion de la maintenance afin de réduire et de mieux planifier cette dernière. S'agissant des coûts de fonctionnement, les coûts de conduite sont eux identiques à ceux des bus diesel. Le principe de biberonnage au terminus et quelques arrêts a démontré sa capacité à conserver la même vitesse commerciale, les mêmes temps aux terminus et la même part des parcours haut le pied qu'en diesel. Ainsi, la transition énergétique peut être envisagée sans augmentation des coûts de conduite.

Un élément clé étant la rétrocession de la taxe sur les huiles minérales qui renforce l'attractivité du mode diesel. Les contributions My Climate ne peuvent compenser cela, d'autant plus lors du passage



à une logique de réseau. Des pistes de subvention à l'électrique devraient être portées à l'échelle fédérale. Il est clair que cette transition énergétique et les surcoûts qu'elle engendre doivent s'inscrire dans un contexte plus large qui touche d'autres politiques publiques telles que la santé de la population ou la protection de l'environnement.

L'exploitation de bus de grande capacité électrique est confirmée. Le projet de la Ligne 23, exploité en horaire régulier avec une flotte de 12 bus articulés ayant parcouru plus de 1'500'000 à fin 2020, démontre que l'exploitation en grande capacité (bus homologué pour 132 passagers) est réalisable en 100% électrique et ceci avec une batterie de très faible capacité (72 kWh).

L'expérience montre que la fiabilité et la disponibilité n'a pas été compromise par les objectifs très ambitieux en termes de développement durable, en particulier en ce qui concerne les batteries. En premier lieu, en phase de dimensionnement, la batterie de seulement 72 kWh permet d'utiliser très peu de matière première. Ensuite, grâce au biberonnage les cycles de recharges sont optimisés et offre une perspective de durée de vie de 10 ans, c'est-à-dire 600'000km ou 8'300 km/kWh de batterie. A ce stade, soit à environ 20% de leur vie, les performances sont conformes aux attentes.

L'efficacité énergétique est encore améliorable. Côté véhicule, dans la pratique la nouvelle chaîne de traction avec moteur à aimant permanent et réducteur à rapport réduit, qui est une évolution vis-à-vis des trolleybus, confirme une amélioration des performances énergétiques en mode moteur et récupération. Des pistes d'améliorations côté confort pour le chauffage et la climatisation ont été identifiées afin d'améliorer sensiblement l'efficacité énergétique. Côté infrastructure, l'efficacité énergétique aux terminus et dépôt est très bonne et conforme aux attentes. L'efficacité des stations Flash est plus pénalisée par la climatisation que par les pertes des batteries tampons.

Les TPG possédant une flotte importante de trolleybus dont une partie grandissante de véhicules avec des batteries pour la marche autonome, la maintenance des bus électriques TOSA n'a pas posé de difficulté particulière. Le dispositif de suivi de la consommation d'énergie va bien au-delà de ce simple aspect informatif et permet d'envisager un monitoring et des actions à distance propres à simplifier et à étendre la maintenance des véhicules et des stations de recharge.

Le système de recharge par biberonnage est adapté aux lignes urbaines pour des véhicules de grande capacité de 18 m. et plus. L'évolution technologique continue dans le domaine des chargeurs et des batteries et les connaissances accumulées avec TOSA permettront le dimensionnement des prochaines lignes avec probablement moins de stations de recharge intermédiaires, des investissements en infrastructures plus faibles.

Une gestion optimisée de la charge des stations est à mettre en œuvre afin d'y minimiser les effets induits sur le réseau, notamment par un report de charge et une gestion du réactif.

Le réseau électrique pourrait bénéficier de solutions orientées flexibilité, grâce aux infrastructures électriques de TOSA comme les batteries des stations des bus, ceci dans un but de lissage de la courbe de charge. La flexibilité générée par le biais de ces nouvelles solutions intégrées aux infrastructures ainsi que l'appoint de nouvelles technologies de gestion de données, ouvriront un potentiel de valorisation de ces dernières, s'intégrant dans le cadre offert aujourd'hui par le plan directeur des Energies de l'Etat de Genève.

Grâce à TOSA, c'est vers une conception et un dimensionnement de réseau de bus électriques et non plus d'une simple ligne vers lequel nous nous dirigeons pour relever le défi de la transition énergétique et le remplacement de l'entier de la flotte des bus diesel des TPG en bus électriques à horizon 2030.



6 Aperçu et mise en œuvre prochaine

Le succès de ce projet phare pousse tant le Canton de Genève, en tant qu'autorité organisatrice des transports urbains, que les TPG à vouloir poursuivre la transition énergétique des bus thermiques vers les bus électriques.

Le renouvellement de l'actuelle flotte thermique débutera dès 2026 mais les premières réflexions sur l'accroissement de la flotte des bus électriques ont déjà démarré, en prenant notamment comme fondement que le réseau genevois de trolleybus ne serait pas développé. Cette transition vers l'électromobilité se fera donc par acquisition de bus à batteries qui seront articulés (18 mètres) et bi-articulés (24 mètres), à l'instar des bus TOSA fournis par Hess à Nantes.

Il est ainsi prévu de lancer un appel d'offre ouvert à différentes technologies, même s'il n'y a que peu de constructeurs aptes à fournir des bus électriques de grande capacité, notamment sur le marché des 24 mètres.

Le principal enjeu à venir réside dans le passage d'un projet qui porte sur une ligne unique (avec une technologie de recharge - « une prise électrique ») à une logique de réseau. Cela sous-entend notamment une problématique de compatibilité entre des technologies de recharge qui, bien que correspondant à du « biberonnage », seront certainement différentes car retenues à l'issue de plusieurs appels d'offre. Cet enjeu d'interface est clairement identifié par les industriels mais pour l'instant ne donne lieu à aucune norme ou standardisation.

A ce titre, la technologie TOSA a l'avantage d'avoir les chargeurs embarqués dans les véhicules, ce qui simplifie l'architecture électrique des infrastructures de recharge et permet une moins grande dépendance à une interface (type d'ETS) spécifique.

De plus, il restera primordial que la technologie retenue, tout comme pour TOSA, soit complètement automatisée et permette une exploitation sans l'assistance du chauffeur.



7 Coopération nationale et internationale

Les partenaires du projet ont largement contribué à l'information et à la transmission des bonnes pratiques auprès des autres opérateurs suisses et à l'étranger.

7.1 Coopération nationale

7.1.1 Projet «Swiss Trolley plus», Zürich

Le projet «Swiss Trolley plus» vise à augmenter l'autonomie et l'efficacité des trolleybus afin de pouvoir opérer commercialement sur des tronçons de plusieurs kilomètres sans lignes de contact, cela grâce à un pack batterie embarqué de haute performance, à la place des traditionnels groupes moteur auxiliaire thermiques. Ce projet, porté notamment par l'EPFL, Carrosserie HESS AG et les VBZ bénéficie du soutien de l'OFEN.

Dans le cadre de ce projet, ABB a développé la chaîne de traction ainsi que les nouveaux moteurs de traction à aimants permanents, dont bénéficient les véhicules de la nouvelle série TOSA.

Ainsi, les TPG ont suivis attentivement les développements du projet «Swiss Trolley plus» afin de valider le choix technologique pour l'équipement des bus TOSA, à travers notamment des visites de terrains et de nombreux échanges techniques.

7.2 Coopération internationale

7.2.1 E-Busway de Nantes - France

A relever en particulier la collaboration étroite avec la Société d'économie mixte des transports en commun de l'agglomération nantaise (SEMINTAN). Il s'agit d'une entreprise à capitaux publics et privés qui exploite en grande partie le réseau de transports en commun de l'agglomération nantaise sous le nom commercial « TAN », en délégation de service public pour le compte de Nantes Métropole. Elle exploite ainsi l'intégralité des lignes de tramway, la ligne de Busway, une grande partie des lignes de bus de l'agglomération.

La ligne de Busway, longue de 7 km et desservant 15 stations, a été inaugurée en novembre 2006. Dès son ouverture, cette ligne a connu un succès grandissant et elle arrive à saturation dix ans plus tard, avec près de 38'000 voyageurs par jour en 2016. Ainsi, la flotte composée de 23 véhicules de 18 mètres, bien que poussée à une cadence de 3'30, ne pourra bientôt plus satisfaire la demande. Le choix politique a été fait de renouveler le parc avec des véhicules de plus grande capacité et 100% électriques.

C'est dans ce contexte que des élus de Nantes Métropole, accompagné de dirigeants de la SEMINTAN et de leurs techniciens, sont venus à Genève le 12 avril 2016 pour rencontrer les partenaires du projet TOSA Ligne 23. Les participants genevois ont exposé à la délégation nantaise les grandes lignes du projet, les atouts de la technologie ainsi que les motivations ayant conduit à faire le pas vers l'électromobilité sur cette ligne.

Cette visite a été fructueuse, répondant ainsi aux attentes de la délégation et permettant par la suite à la SEMINTAN de confirmer son choix de déployer pour fin 2018 des bus 100% électriques bi-articulés de 24 mètres se rechargeant à certains arrêts par la technique du biberonnage.

En effet, la SEMINTAN a fait l'acquisition de la technologie TOSA pour l'électrification de sa ligne 4 de busway. HESS, en partenariat avec ABB, a ainsi remporté l'appel d'offre. Cette commande porte sur 22 bus bi-articulés de 24 mètres de long et sur 4 stations de recharge aux terminus. La logique est



donc quelque peu différente de celle de la ligne 23 puisqu'il n'y a pas de recharge Flash intermédiaire. En effet, la distance de la ligne est de 7 km sur un profil presque plat ce qui ne rend pas opportun l'installation de recharge Flash intermédiaires. Cependant, les contraintes d'exploitation de busway électrique (cadence de la ligne proche de 2.5 minutes en heure de pointe et nécessité de bus bi-articulés pour plus d'offre) ont permis à HESS et ABB de placer la technologie TOSA comme étant la solution technique la plus aboutie. Le système de transfert d'énergie par bras mécanique et complètement automatique permettra ainsi d'exploiter au maximum l'infrastructure et le faible temps de recharge au terminus à disposition.

Ainsi, la SEMITAN a proposé à l'OCT et aux TPG la mise en place de rencontres régulières pour partager sur les avancées respectives des deux projets. L'intérêt pour Nantes réside évidemment dans le fait que Genève met en place la première ligne commerciale et l'intérêt pour Genève se trouve dans les bus bi-articulés développés pour Nantes, sachant que ce type de véhicules pourrait être déployé dans une prochaine étape dès 2025 à Genève.

7.2.2 E-Busway de Brisbane - Australie

Ce sont 60 bus de technologie TOSA de 24m qui ont été achetés par la 3^{ème} ville d'Australie. Les premiers essais se dérouleront en 2021 pour une mise en exploitation de la ligne en 2023. <https://www.brisbane.qld.gov.au/traffic-and-transport/public-transport/brisbane-metro/brisbane-metro-vehicle>.

7.2.3 Séminaire de l'Union internationale des transports publics (UITP) sur les bus électriques à Genève

Ce séminaire s'est déroulé à Genève du 26 au 28 septembre 2016 sous l'égide de l'UITP, avec le soutien des TPG.

Les objectifs de ce séminaire étaient de proposer un tour d'horizon des principales solutions de propulsion électrique pour les réseaux de bus urbains, en suivant les différentes étapes de l'élaboration d'une stratégie pour une ville, le choix de la technologie et son implémentation puis l'exploitation du système. En plus des séances plénières, le travail s'est fait sous forme de petits groupes et le séminaire s'est terminé par la présentation du projet TOSA Ligne 23 et d'une démonstration sur site.

Ce sont ainsi près de quarante participants, représentant des exploitants, des autorités organisatrices et des équipementiers, venus des cinq continents, qui se sont retrouvés au dépôt trolleybus TPG de la Jonction.

7.2.4 Salon "Busworld 2017" – Courtrai (B) : présentations du projet TOSA et des applications dérivées

Cette édition du salon "Busworld 2017", qui s'est tenue à Courtrai (B) du 20-25 octobre 2017, s'est déroulée exceptionnellement conjointement avec l'UITP. Il y avait ainsi deux journées de conférences donnant une place prépondérante au thème des bus électriques ainsi qu'une journée spécifique sur le projet ZeEUS, the Zero Emission Urban Bus System, cofinancé par la Commission européenne et dans lequel le projet TOSA L23 est référencé. Le projet TOSA a ainsi été présenté en conférence plénière par Thierry Wagenknecht (TPG) mais aussi sur le stand ABB dans le salon.



7.2.5 Assises européennes de la transition énergétique à Genève

Fin janvier 2018, les assises européennes de la transition énergétique se sont tenues à Palexpo. Le 30 janvier 2018, les tpg par l'intermédiaire de Thierry Wagenknecht ont participé à un Speed Dating sur le thème : Transports publics genevois Le bus électrique TOSA, un partenariat public-privé exemplaire pour un projet innovant.



8 Communication

8.1 Communication mise en place préalablement la mise en service commerciale

Le volet communication du projet a été affiné en 2016, sur la base du plan de communication initial présenté dans le dossier de requête déposé auprès de l'OFEN. Le document de formalisation du positionnement et recommandations stratégiques en vue du déploiement du projet TOSA est en annexe C.

La gouvernance de la communication s'est concrétisée par la mise en place d'un comité de communication (COMCOM), piloté par l'Office cantonal des transports, dans lequel chaque partenaire, y compris l'OFEN, est représenté. Ce COMCOM s'est retrouvé pour une 1^{ère} séance le 16 mars 2016 et a décidé d'inviter trois agences de communication à proposer une identité graphique, une signature et un univers de communication pour le projet. Le COMCOM a affiné et présélectionné les travaux de deux agences qui ont été soumis au COPOL du 3 mai 2016.

Le COPOL a retenu le travail de l'agence de communication Blossom, sise à Genève, tout en demandant notamment que les visuels soient retravaillés.

Cette nouvelle identité visuelle, tout d'abord composée d'un logo et d'une baseline, a été présentée officiellement lors de l'évènement organisé en juillet 2016 pour la signature des contrats d'acquisition.



Figure 42 : Logo et baseline sélectionnés pour le projet. Source : Blossom Communication, 2016.

Pour poursuivre le travail du détail du plan de communication, Blossom Communication a été mandaté pour formaliser le positionnement et les recommandations stratégiques. Cette démarche a débouché sur la réalisation d'un document de synthèse (cf. annexe C), adopté au COPOL du 22 novembre 2016

De plus, à l'occasion du voyage de presse le 6 juin 2017 à Turgi, pour la présentation du premier bus TOSA, un film commémoratif de l'évènement a été produit et mis en ligne :

<https://www.ge.ch/actualite/premier-bus-tosa-devoile-usines-abb-turgi-6-06-2017>

Le site web (tosa.ge.ch) a aussi été publié à cette même occasion. Le contenu du site est disponible en anglais, afin de faciliter la promotion internationale du projet. Il est la vitrine du projet et retrace son histoire, ses actualités et les caractéristiques de la technologie.

L'année 2017 a vu la concrétisation des outils de communication permettant l'accompagnement du projet TOSA L23, aussi bien à l'interne qu'à l'externe.

Les messages ont été synthétisés et affinés afin de pouvoir promouvoir simplement et de manière ludique les atouts de la technologie TOSA et ce aussi en langue anglaise. De plus, ils ont été produits sous forme de GIF animés qui défilent sur les écrans embarqués dans les bus TOSA ainsi que sur le site web.



Figure 43 : Déclinaison des messages clés. Source : Blossom Communication, 2017.



Figure 44 : GIF animés diffusés dans les bus TOSA. Source : Stéphane Gros, Lumière Noire, 2017.



En plus des messages clés, un document de présentation complet, sous forme d'un dépliant double-face français/anglais en format 3xA5 a été édité (cf. annexe D). Il est voué à être distribué dans les véhicules TOSA ainsi que lors de manifestations, salons et visites de délégations.

Ces messages et graphismes ont été déployés sur les bus et les infrastructures de recharge, relais du projet sur le terrain auprès du grand public.

En "extérieur", sur les véhicules, le graphisme a été développé sur la base de la charte graphique du projet. Il a été décidé que, sur les 12 bus TOSA, 2 sont intégralement pelliculés à l'image du projet (1 en français et 1 en anglais) et que les 10 autres sont aux couleurs des TPG, tout en laissant les crêtes de bus libres pour identifier les véhicules comme étant des TOSA.

HABILLAGE DU BUS

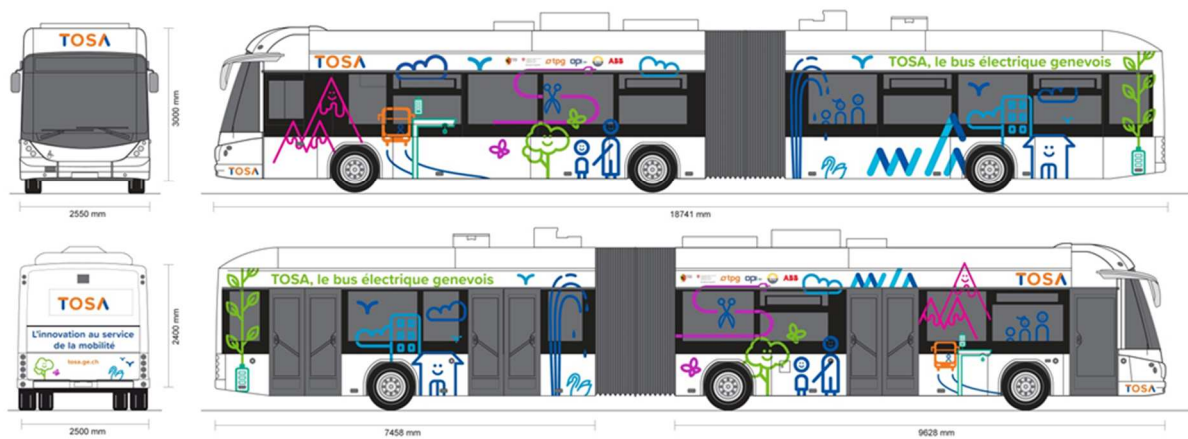


Figure 45 : Version finale de l'habillage intégral en français. Source : Blossom Communication, 2017.



Figure 46 : Véhicule TOSA n°2 intégralement habillé en version anglaise. Source : Stéphane Gros, Lumière Noire, 2017.

Les 2 premiers véhicules de la flotte ont été intégralement décorés avec une livrée adaptée de la charte graphique du projet. Le troisième véhicule a été intégralement pelliculé avec une charte graphique spécifique pour ABB, qui a loué toute la surface pendant plusieurs mois. Les 9 autres véhicules ont été préparés avec la livrée tpg extérieure, à laquelle a été ajoutée une crête "TOSA" pour bien marquer la spécificité du véhicule.



Figure 47 : Livrée finale de la flotte TOSA L23. Source : Blossom, 2018.

L'intérieur des 9 véhicules avec la pelliculage TOSA standard a aussi fait l'objet d'une démarche de communication car aucun espace de publicité commerciale n'est vendu par la régie publicitaire. Les messages clés du projet ont ainsi été déclinés à l'intérieur, aussi bien sous forme de textes en français/anglais sur les parties hautes que sous forme de visuels sur les parties basses.

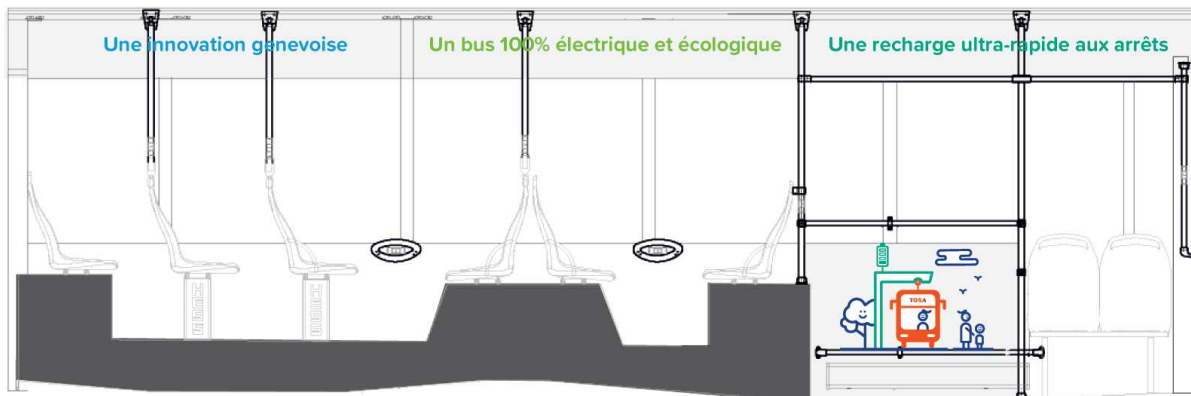


Figure 48 : Extrait de l'habillage intérieur des véhicules. Source : Blossom, 2018.

Les véhicules n'étant qu'une partie visible et tangible du projet, l'autre étant les infrastructures de recharge aux stations, il a été décidé dès le début du projet d'utiliser aussi les surfaces des armoires électriques comme support de communication. L'idée de base était de raconter le projet en présentant des explications techniques notamment. Le comité de communication a réorienté cette vision en proposant que les chargeurs TOSA (FFS et TFS) mettent en avant les messages clés du projet et que les armoires des batteries permettent aux 7 acteurs du projet d'exprimer de quelle manière ils sont liés au TOSA. A cela s'ajoute une station qui reprend les 5 messages clés en français et anglais ainsi que 3 armoires véhiculant des messages techniques ludiques, en français et en anglais, permettant de mieux comprendre quelques facettes du projet TOSA Ligne 23. Un portfolio de toutes les stations est en annexe E.

8.2 Communication mise en place depuis la mise en service commerciale

Depuis la mise en service commerciale complète à mi-2018, les activités de communication ont porté sur la transmission d'information et d'un premier retour d'expérience auprès des cercles spécialisés, sur 3 axes :

1. Congrès/colloques :
 - Intervention de la Présidente des tpg lors de la conférence bus internationale de l'Union internationale des transports publics (UITP), en marge du salon Busworld 2019 à Bruxelles. Lors de la séance plénière sur le thème *Clean Bus and Energy Transformation*, Mme Anne



HORNUNG-SOUKUP a notamment présenté les principaux enseignements du projet TOSA pour les TPG en tant qu'exploitant de transports publics.

2. Transmission de bonnes pratiques auprès d'acteurs externes :

- Participation des tpg au *UITP Study Tour on Electric Buses* qui s'est déplacé à Bruxelles, Namur, Paris et Genève du 25 au 27 septembre 2019. Présentation par les TPG du projet TOSA sur le terrain.

3. Communication médias :

- Sur mandat de l'OFEN, les partenaires du projet ont contribué à la rédaction d'un article visant à faire un retour d'expérience sur la première année d'exploitation de la ligne 23 avec la technologie TOSA. Cet article ouvre aussi les perspectives sur le futur de cette technologie. Il a été publié en français et en allemand dans les revues suivantes :
 - o Swiss Engineering RTS (env. 11'000 lecteur-trices)
 - o Fachbuch Strassenverkehr (env. 14'000 lecteurs-trices)
 - o Handelszeitung (env. 75'000 lecteurs-trices)
 - o Article spécialisé sur le site web de l'OFEN

La revue de presse globale se trouve en annexe F.



9 Annexes

- A. Etude sociologique : rapport phase 1
- B. Etude sociologique : rapport phase 2
- C. Plan stratégique de communication
- D. Dépliant recto-verso
- E. Portfolio de l'habillage des stations
- F. Revue de presse globale



10 Liste des figures et tableaux

Figure 1 : Positionnement de l'ETS sur le véhicule TOSA. Source : ABB, 2014.	12
Figure 2 : Chargeur Flash à titre indicatif. Source : ABB, 2014.	13
Figure 3 : Chargeur terminal à titre indicatif. Source : ABB, 2014.	13
Figure 4 : Cycle de charge/décharge des modules de batteries Lithium-ion. Source : ABB, 2016.	14
Figure 5 : Localisation des stations de recharge le long du parcours avec distinction par type et sens de circulation. Source : Nicolas SIMOND, 2015.	17
Figure 6 : Vues frontale et latérale de la potence de biais. Source : ABB, 2016.	18
Figure 7 : Pose de la potence de recharge à l'arrêt Bossons, direction Carouge-Tours. Source : Nicolas SIMOND, 2017.	19
Figure 8 : Comparaison en 3D d'une potence actuelle et d'une potence renforcée. Source: Brodbeck Roulet architectes associés SA, 2017.	20
Figure 9 : ETS en position couché (Capture d'écran ligne 23 Genève). Source : ABB, 2014.	22
Figure 10 : Pré-positionnement de l'ETS (photo démonstrateur). Source : ABB, 2014.	22
Figure 11 : Positionnement latéral de l'ETS (Capture d'écran ligne 23 Genève). Source : ABB, 2014.	23
Figure 12 : Positionnement latéral de l'ETS (Capture d'écran ligne 23 Genève). Source : ABB, 2014.	23
Figure 13 : ETS en position haute (course 100%) (Capture d'écran ligne 23 Genève). Source : ABB, 2014.	24
Figure 14 : mouvement vertical final (photo démonstrateur). Source : ABB, 2014.	25
Figure 15 : Vue sur le toit du bus TOSA : le bras de recharge, l'électronique de puissance, les packs batterie. Source : Lumière noire, 2017.	27
Figure 16 : Vue pour le dispatching des véhicules avec l'état des stations de recharge du centre de remisage et l'état des bus en service, hors service et niveau de charge. Source : TPG, 2019.	29
Figure 17 : Vue du réseau avec toutes les stations de recharge pour la régulation de la ligne et l'information aux conducteurs. Source : TPG, 2019.	30
Figure 18 : Vue de l'ensemble des bus et des stations de recharge pour monitoring de la ligne en exploitation dynamique et assistance aux conducteurs. Source : TPG, 2019.	30
Figure 19 : Vue de l'état de charge de chaque bus sur une durée déterminée. Source : TPG, 2019.	31
Figure 20 : Vue du rapport mensuel des consommations d'énergie des composantes du système. Source : TPG, 2019.	31
Figure 21 : Etude sociologique Phase 1 - échantillonnage. Source : Mauro Associés, 2018.	34
Figure 22 : Etude sociologique Phase 2 - échantillonnage. Source : Mauro Associés, 2019.	35
Figure 23 : Pourcentage de véhicules disponibles nécessaires pour la sortie du matin cumulée avec celle du soir Source : TPG, 2019.	37
Figure 24 : Nombre de changement de véhicules en exploitation ainsi que le type du véhicule de remplacement (TOSA/DIESEL). Source : TPG, 2019.	37
Figure 25 : Synoptique d'un TFS. Source : TPG, 2019.	41
Figure 26 : Diagramme Sankey mensuel des flux d'énergie du réseau électrique aux bus. Source : TPG, 2020.	43
Figure 27 : Diagramme Sankey du mois de juillet 2020 des flux d'utilisation de l'énergies au niveau des bus. Source : TPG, 2020.	44
Figure 28 : Relevé des températures pour Genève, 8 au 12 août 2020. Source : Prevision-meteo.ch, 2020.	44
Figure 29 : Diagramme Sankey des flux d'énergie du réseau électrique aux bus lors d'une période chaude (8-12 août 2020). Source : TPG, 2020.	45
Figure 30 : Diagramme Sankey des flux d'utilisation de l'énergies au niveau des bus lors d'une période chaude (8-12 août 2020). Source : TPG, 2020.	45



Figure 31 : Diagramme du SoC des batteries des bus lors d'une journée estivale tempérée (4 août 2020). Source : TPG. 2020.	46
Figure 32 : Relevé horaire de la température de l'air lors d'une journée très chaude (20 août 2020). Source : prevision-météo.ch, 2020.....	46
Figure 33 : Diagramme du SoC des batteries des bus lors d'une journée estivale très chaude (20 août 2020). Source : TPG. 2020.	47
Figure 34 : Relevés de la température de l'air à Genève en janvier et mars 2020. Source : prevision-meteo.ch, 2020.....	47
Figure 35 : Diagramme du SoC des batteries des bus lors d'une journée hivernale (28 février 2020). Source : TPG. 2020.....	48
Figure 36 : Diagramme Sankey des flux d'énergie du réseau électrique aux bus lors d'une période froide (janvier 2020). Source : TPG, 2020.	48
Figure 37 : Diagramme Sankey des flux d'énergie du réseau électrique aux bus lors d'une période peu fraîche (mars 2020). Source : TPG, 2020.	49
Figure 38 : Diagramme Sankey des flux d'utilisation de l'énergies au niveau des bus lors d'une période fraîche (mars 2020). Source : TPG, 2020.	49
Figure 39 : Synthèse des coûts d'investissement à la fin du projet. Source : TPG, 2020.	50
Figure 40 : Synthèse des coûts complets d'exploitation théoriques chiffrés en 2015 pour le projet de loi d'investissement 11720 en 2015. Source : Etat de Genève, 2015.	51
Figure 41 : Estimation des coûts complets d'exploitation une année après la mise en service. Source : TPG, 2019.	52
Figure 42 : Logo et baseline sélectionnés pour le projet. Source : Blossom Communication, 2016....	61
Figure 43 : Déclinaison des messages clés. Source : Blossom Communication, 2017.	62
Figure 44 : GIF animés diffusés dans les bus TOSA. Source : Stéphane Gros, Lumière Noire, 2017.	62
Figure 45 : Version finale de l'habillage intégral en français. Source : Blossom Communication, 2017.	63
Figure 46 : Véhicule TOSA n°2 intégralement habillé en version anglaise. Source : Stéphane Gros, Lumière Noire, 2017.....	63
Figure 47 : Livrée finale de la flotte TOSA L23. Source : Blossom, 2018.....	64
Figure 48 : Extrait de l'habillage intérieur des véhicules. Source : Blossom, 2018.....	64
Tableau 1 : Principaux indicateurs d'exploitation. Source : TPG, 2021.	36
Tableau 2 : Consommation sur la ligne (TFS+ FFS). Source : TPG, 2019.	39
Tableau 3 . Consommation énergétique moyenne au niveau des stations de recharge TOSA par km pour 12 mois. Source : TPG, 2019.....	40
Tableau 4 : Consommation énergétique moyenne au niveau du bus TOSA par km pour 12 mois. Source : TPG, 2019.....	42