



CTEB 05/2023: Stratégie d'électrification des lignes de bus aux tpg

Olivier Augé
Responsable Ingénierie

σtpg

GED #709487

Commission Technique et d'Exploitation Bus
Genève, 23 mai 2023 à En Chardon

Agenda



1. transports publics genevois
2. Transition énergétique – Innovation
3. Transition énergétique – L23
4. Transition énergétique – Le réseau de 6 lignes
5. Benchmarks techniques
6. Projet eBus: Configurations
7. CAP2030: Le réseau 100% électrique
8. Perspectives énergétiques

1

tpg

transports publics genevois en chiffres

Chiffres clés – Rapport annuel de gestion 2022

- 32'391'000 km Kilomètres-convoi totaux parcourus
(~ 88'742 km/jour)
- 507 millions passenger.km/an
(~1'389'000 passenger.km/jour)
- 2'210 Collaborateurs (2'145 ETP)
 - Exploitation: 1'566
 - Technique: 342
 - Administration: 304
- 478 véhicules
(tramways, trolleybus et bus hors sous-traitance)
- 77 lignes



Flotte en 2023

Tramways, trolleybus et bus

126 Trams



104 Trolleybuses



12 Electric Buses



232 Diesel Buses



4 Navettes autonomes

2

Transition énergétique: 1^{ère} phase d'innovation

Les défis de la transition énergétique:

Le prototype

Historique et Innovation

Partenariat Public-Privé : 2010 à 2015



- Première mondiale de bus articulé électrique (132 passagers)
- Une batterie de 38 kWh
- La recharge Flash en 20 secondes

- Transporter des passagers pas des batteries
- Inauguration pendant le Congrès Mondial UITP 2013 à Genève



3

Transition énergétique: La ligne 23

Le projet «Phare»

Le retour d'expérience de 2018 à 2023

Déploiement sur L23 – Véhicule

Ligne 23 – Aspects développement durable

- Très grande capacité (toute la technologie est en toiture)
- Pas de coûts de conduite additionnels
 - temps aux terminus identiques aux bus diesel
 - pas de retour aux dépôts en journée (recharge)
- Matières premières: Taille (72 kWh) et longévité de la batterie (10 ans)
 - 500'000 km → ~10'000'000 passenger.km
 - Ainsi avant recyclage, chaque kWh de la batteries (72 kWh) aura permis de transporter > **140'000 passenger.km**
- Durée de vie de 20 ans pour le véhicule (comme les trolleybus aux tpg)
- Haute efficacité énergétique
 - moteurs à aimants permanents et bus léger
 - Convertisseur de traction réalisant la recharge des batteries
 - Montée en charge très rapide 0 to 400 kW en moins de 2 secondes

Déploiement sur L23 – Infrastructure



Ligne 23

- Recharge à haute puissance
 - 400 kW
 - 600 kW at Flash (20 sec)
- Indépendance de système de communication
 - pas besoin de CCS2 ou autres protocoles de charge
- Infrastructure légère et sûre aux dépôts.
 - Recharge à faible puissance (50 kW - 15-30 min)
 - Concept de sécurité incendie facilité par la faible taille en kWh de la batterie et la sûreté de la technologie LTO
- Connexions au réseau électrique distribuées et usage d'énergie renouvelable
 - Recharge en journée pendant l'exploitation. Ainsi, l'énergie solaire peut être utilisée directement.
 - tpg a un contrat d'énergie 100% renouvelable avec les SIG

Déploiement sur L23 -REX

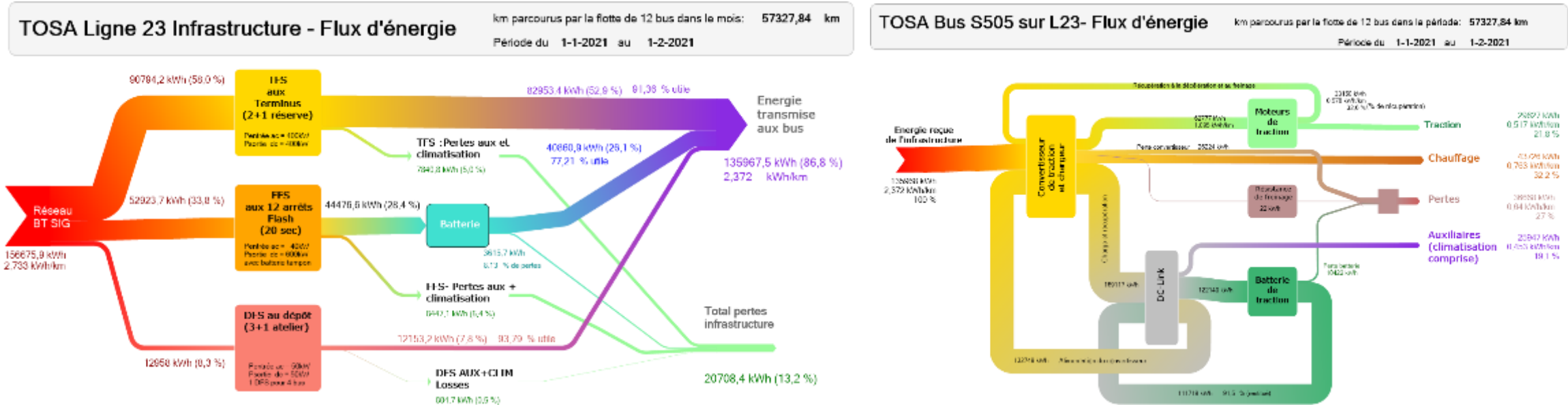
Ligne 23 – Le retour d'expérience

- Adoption rapide et positive par les conducteurs
- Il est possible de faire de la grande capacité (18m75, 132 passagers) avec une très faible capacité de batterie (72kWh) sur une ligne importante.
- Faire circuler l'information. C'est un système !
 - Importance des relations entre les équipes d'Ingénierie et de Maintenance en charge des infrastructures et des véhicules
- Comme tout projet innovant, maintenir une relation régulière, franche et ouverte avec les fournisseurs
- Les système SCADA, remontant les informations des véhicules et des infrastructures a permis d'optimiser le système.

Déploiement sur L23 – 3'000'000 km

La ligne 23 – Une expérience unique après 5 ans

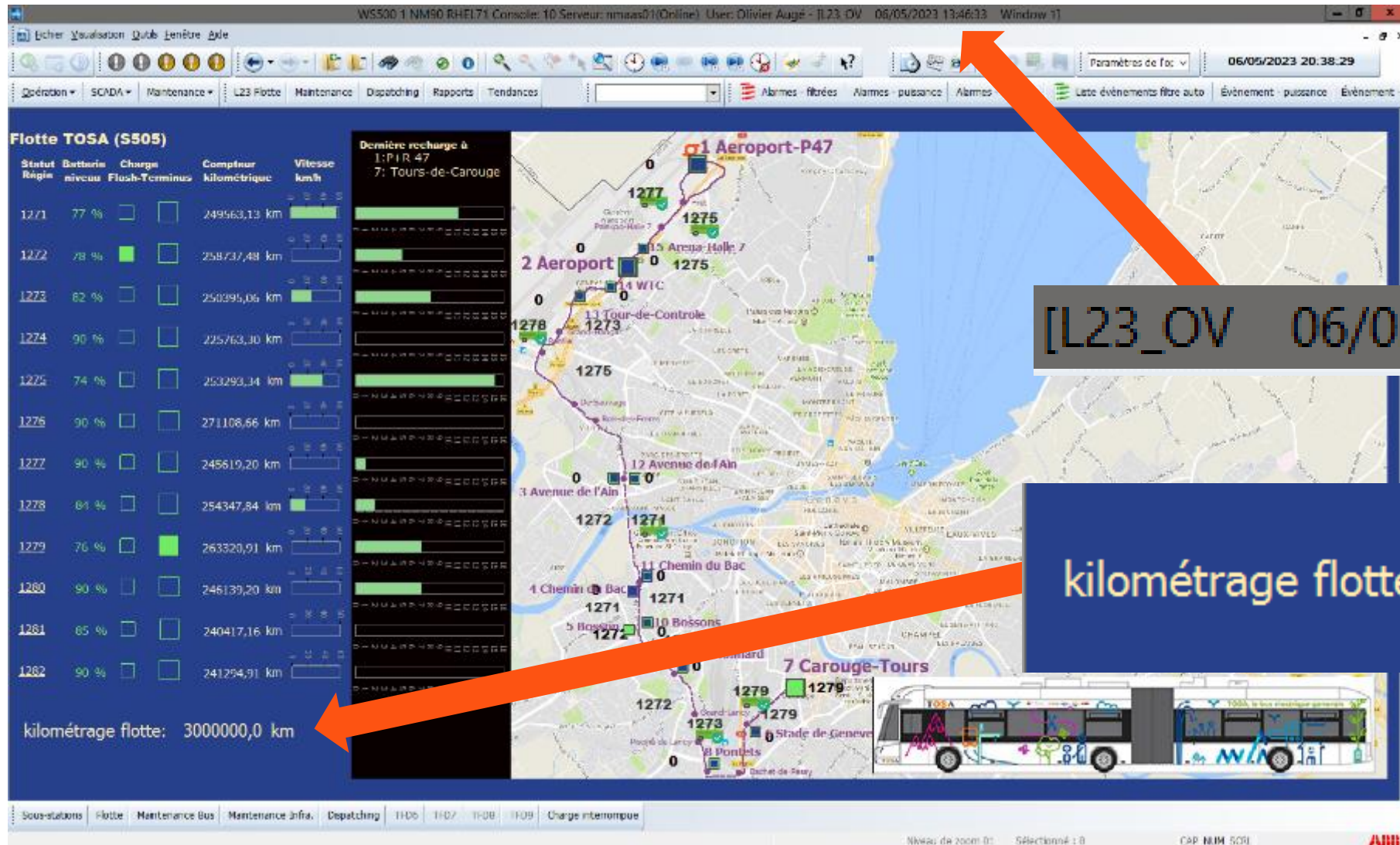
- 3.0 Mkm parcourus depuis mars 2018
- Disponibilité >98.7%
- ~60'000'000 passagers.km effectués
- Retour d'expérience avec véhicules et infrastructures communicants



Jour J, l'heure H: 6 mai 2023 13h46'33"

σtpg

La barre des 3'000'000 km franchie par la flotte TOSA



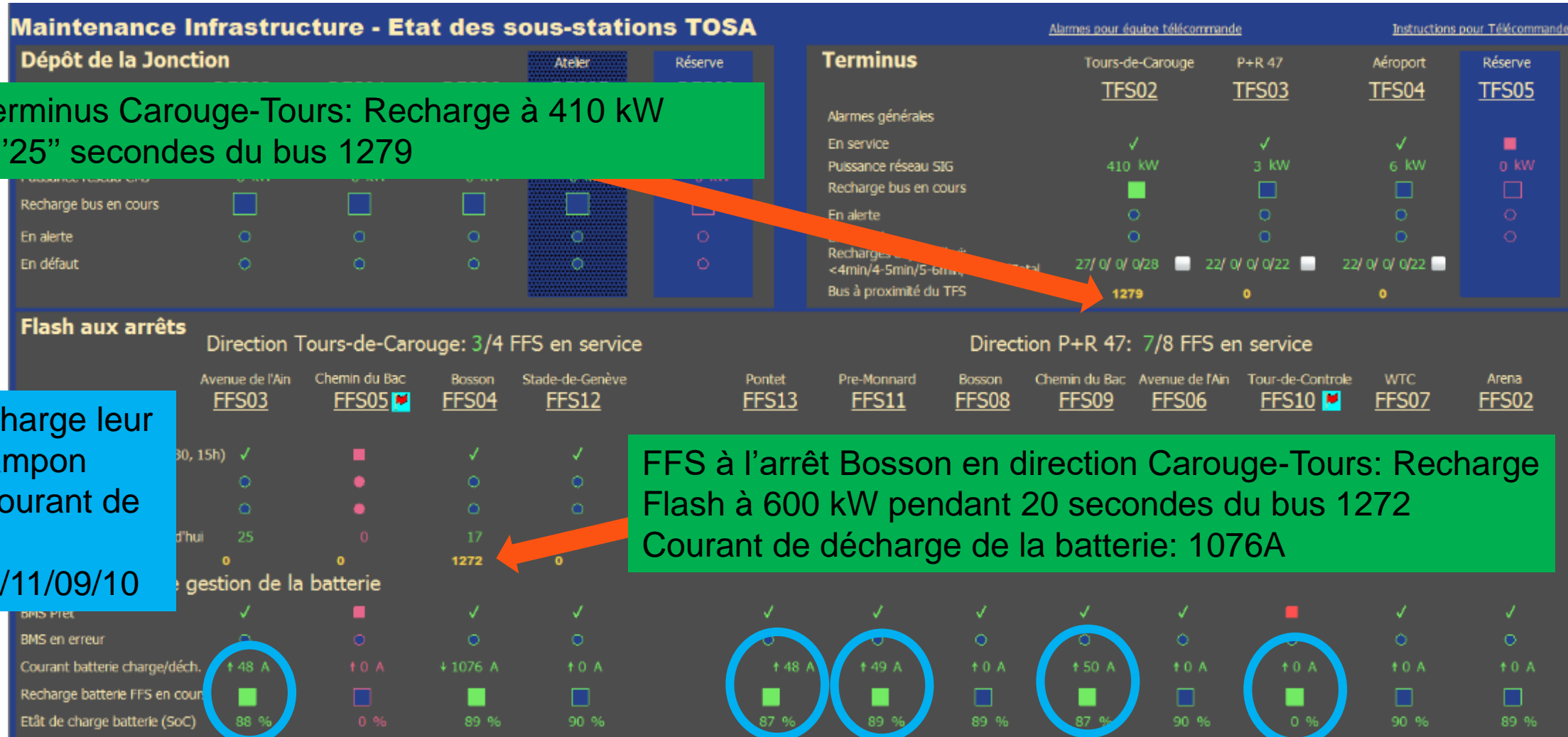
[L23_OV 06/05/2023 13:46:33

kilométrage flotte: 3000000,0 km

Et côté infrastructures à 13h46'33" ?

σtpg

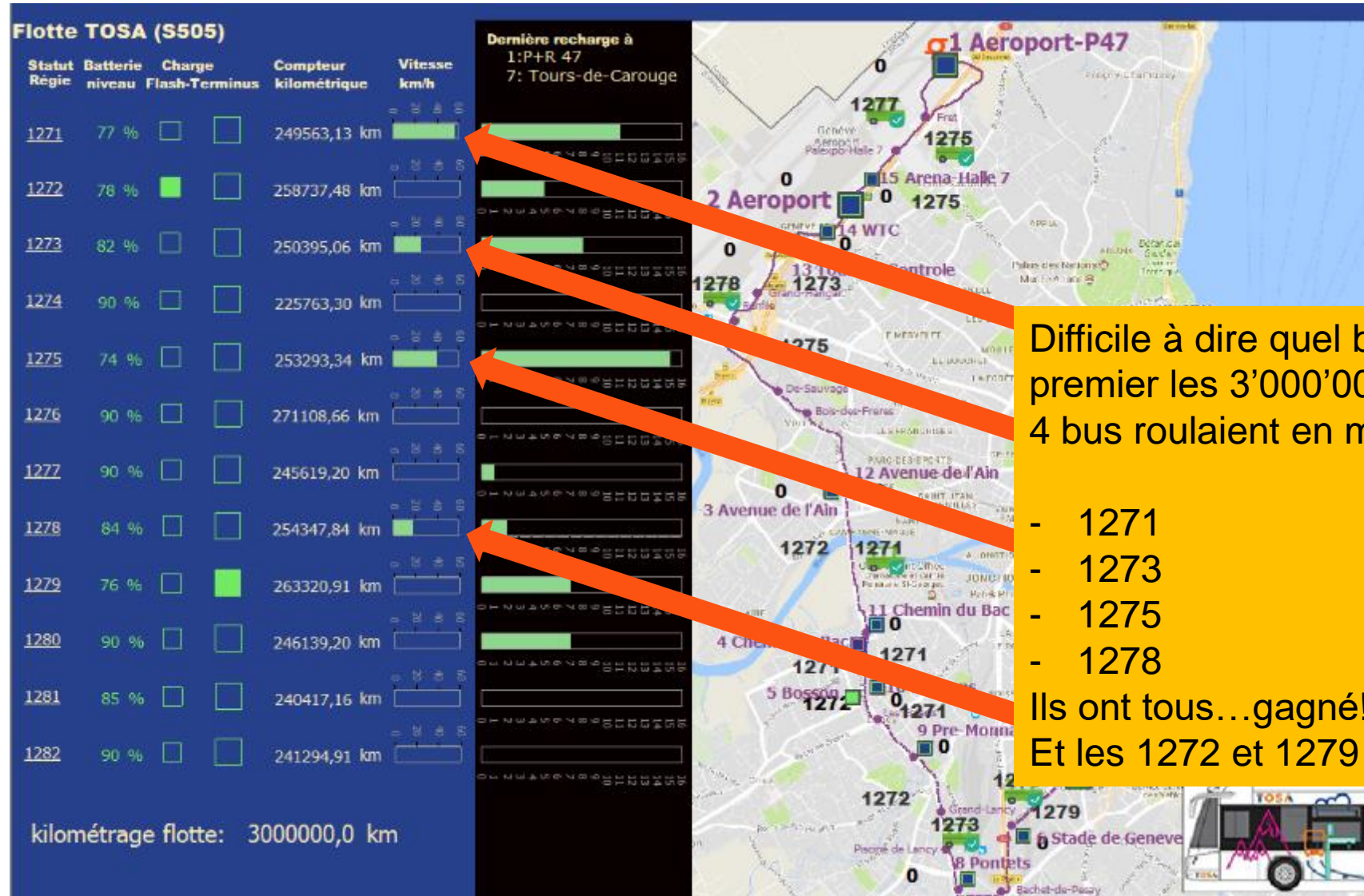
Elles alimentaient les bus. What else ?



Quel bus a franchi les 3'000'000 km ?

σtpg

La devinette de «La poule et l'œuf ...» est plus simple.



Difficile à dire quel bus a franchi le premier les 3'000'000 km.
4 bus roulaient en même temps!

- 1271
- 1273
- 1275
- 1278

Ils ont tous...gagné!
Et les 1272 et 1279 aussi?

Qu'a fait l'Infrastructure depuis 2018

Elle charge, charge, charge...

- Les 3 sous-stations TFS ont alimenté 278'000 recharges
 - Le TFS du terminus Tours-de-Carouge effectue 23'070 recharges par an
 - ~465 recharges par semaine pour chaque Terminus en horaire normal.
- Les 12 sous-station Flash ont alimenté 957'780 recharges
 - Soit avec 3 kWh par recharge → 2.9 GWh dans la batterie des bus
 - Le FFS06 de l'Av. de l'Ain effectue 18'900 recharges par an
 - ~ 320 recharges par semaine pour chaque Flash en horaire normal.
- Chaque DFS (dépôt) a fait en moyenne ~10'000 recharges
 - Entre 30 à 50 recharges par semaine par DFS en horaire normal.

Qu'a fait la conduite depuis 2018?

Ça roule ! Même la nuit et le week-end.

- Les conducteurs ont roulé 19.98 ans à bord des TOSA
 - ~175'000 h au volant des TOSA à la vitesse moyenne de 19.3 km/h en 2021
 - ~ 240'000 aller simple sur la L23
 - Chaque bus TOSA a en moyenne parcouru 250'000 km
 - Les bus ont parcouru entre 225'763 et 271'108 km
- Les conducteurs ont permis de réaliser ~38'000'000 passager-km
 - Ainsi ~13'000'000 passagers ont été transporté avec les bus TOSA

4

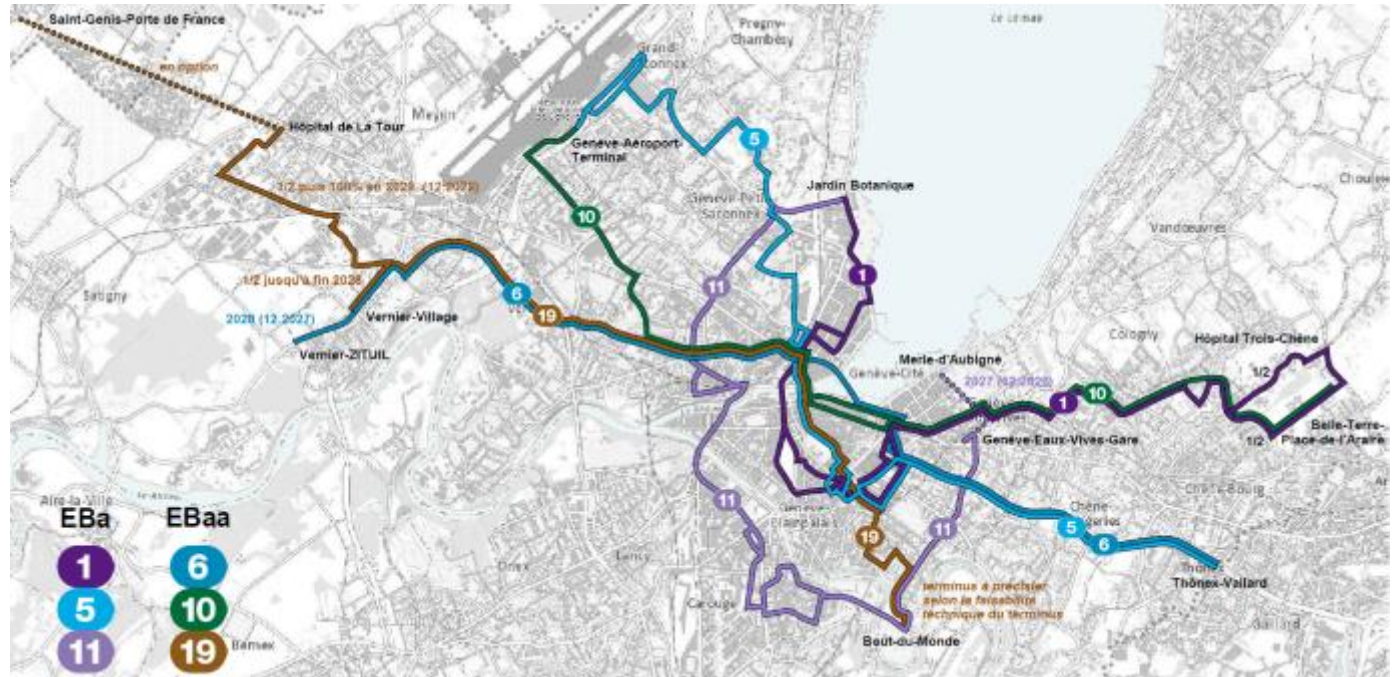
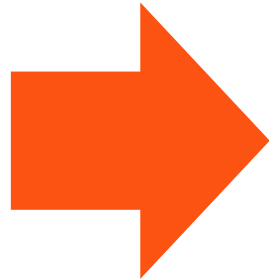
Transition énergétique: Le réseau de 6 lignes

2025-2027

CAP2030 1^{ère} étape : Projet de 6 lignes σtpg

Après la ligne, le réseau.

- Une approche réseau
- 6 lignes, 56 bus articulés et 65 bus double-articulés
- Un concept optimisé basé sur notre expérience et les évolutions technologiques



Objectifs et Contraintes du cahier des charges

- Objectifs en déclinaison avec stratégie CAP 2030
 - Conversion des lignes diesel en lignes électriques (mesure du PATC)
 - > 103 véhicules modernes, **orientés clients et conduite**
 - Evoluer vers des véhicules communicants
 - Avis de maintenance en temps réel, SCADA & GMAO, monitoring infra.
 - Dépasser 50% d'équipements embarqués conformément aux exigences **ITxPT**
 - Viser **15% de réduction** de consommation d'énergie pour le chauffage et la climatisation
 - Laisser ouvert le 2^{ème} appel d'offres ebus ouvert à horizon 2025 – bus à autonomie ?
- Contraintes de l'appel d'offres
 - Réaliser la transition énergétique sans augmenter les autres coûts (conduite, nombre de véhicules)
 - Acquisition de véhicules de grande et très grande capacité
 - Efficacité énergétique, énergie renouvelable, quantité et cycle de vie des matériaux (batteries)
 - Mettre en service les véhicules dans les délais
 - Financement selon PATC et CP avec participation au financement de l'Etat par PL dès 2022
 - Compatibilité avec nos infrastructures (dépôts, profils...)

Bénéfices environnementaux attendus

- Efficacité énergétique globale
 - Bus-Energie de traction: Bus léger avec faible quantité de batterie et moteur à haut rendement
- Améliorer l'efficacité énergétique des systèmes auxiliaires (climatisation et chauffage) dans les véhicules
 - Pompe à chaleur à place de chauffage électrique
 - Capteurs CO₂ pour réguler la ventilation
- Fluides frigorigènes à moindre impact écologique
 - Utilisation du R-744a (PRG=1*) à la place du R-407C/Trolleybus (PRG=1774*) ou R134a/Autobus (PRG=1430*)
- Matériaux et recyclage
 - Batterie véhicule: Faible quantité de batterie et longue vie ≥ 10 ans \rightarrow 20 ans !
 - Part élevé des matériaux recyclés à la construction et recyclabilité $> 90\%$

Réseau e-bus 2025-2030: ABAE



Phase I – Planning actualisé 08.05.2023: 65x ABAE et L1/5/11

ABAE (articulé)		BESOIN ACTUALISE AU 08.05.2023																							
Mois	#	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	22	22
Date		2025												2026											
		janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre
Livraison/Mises en service ABAE	Quantité	Homologation 1 ^{er}			+1	+1	+2	+2	+2	+3	+3	+3	+2	+3	+4	+4	+4	+4	+4	+3	+3	+4	+4	+4	+4
Mise en service cumulée	Quantité			1	2	3	5	7	9	12	15	18	20	23	27	31	35	39	43	46	49	53	57	61	65
Engagement en exploitation des ABAE par ligne																									
Engagement ABAE sur L1													1	2	6	10	13	16	18	18	18	18	18	18	18
Engagement ABAE sur L5					1	2	4	6	8	8	8	8	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
Engagement ABAE sur L11																		1	3	5	8	12	16	20	23
Mise au point/Réserve ABAE					1	1	1	1	1	4	7	10	2	4	4	4	5	5	5	6	6	6	6	6	7
Total ABAE					2	3	5	7	9	12	15	18	20	23	27	31	35	39	43	46	49	53	57	61	65

Remarques:

- La L5 sera utilisé pour les essais d'homologation pour les ABAE et ABAAE
- La L5 sera exploitée avec une flotte mixte (ABAE + ABAAE) jusqu'à début décembre 2025
A partir de septembre 2025, il y aura 8x ABAE et 9x ABAAE sur la L5
- La L10 démarre immédiatement avec une flotte complète de 17x ABAAE

Réseau e-bus 2025-2030: ABAAE



Phase I – Planning actualisé 08.05.2023: 56x ABAAE et L6/10/19



ABAAE (double articulé)		BESOIN ACTUALISE AU 08.05.2023																												
Mois	#	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24					
	Date	2025												2026												2027	2028			
		janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	janvier-déc.	décembre			
Livraison/Mises en service ABAAE	Quantité	Homologation 1 ^{er}				+1	+2	+2	+2	+3	+4	+4	+2	+2	+3	+3	+3	+3	+3	+2	+2	+3	+4	+4	+2	+1				
Mise en service cumulée					1	2	4	6	8	11	15	19	21	23	26	29	32	35	38	40	42	45	49	53	55	56	56			
Engagement en exploitation des ABAAE par ligne																														
Engagement ABAAE sur L10	En TBA												17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
Engagement temporaire ABAAE sur L5	11357999																													
Engagement ABAAE sur L6													1	2	5	8	10	13	15	15	15	15	15	15	15	16	16			
Engagement ABAAE sur L19																			1	2	4	7	11	15	16	16	17			
Mise au point/Réserve ABAAE						1	1	1	1	2	6	10	3	4	4	4	5	5	5	6	6	6	6	6	7	7	6			
Total ABAAE					1	2	4	6	8	11	15	19	21	23	26	29	32	35	38	40	42	45	49	53	55	56	56			

Remarques:

- La L5 sera utilisé pour les essais d'homologation pour les ABAAE et ABAAE
- La L5 sera exploitée avec une flotte mixte (ABAAE + ABAAE) jusqu'à début décembre 2025
A partir de septembre 2025, il y aura 8x ABAAE et 9x ABAAE sur la L5
- La L10 démarre immédiatement avec une flotte complète de 17x ABAAE

5 Benchmarks techniques

Benchmark – Evolution des batteries côté bus

– TOSA L23 – Bus 18m

- Technologie LTO
- Capacité 72 kWh
- Masse: 1'200 kg
- Recharge aux Terminus: 400 kW
- Recharge aux Flash: 600 kW
- Recharge au Dépôt: 50 kW

2018-(2022)

– Ebus 2022 – Bus 18m

- Technologie LTO
- Capacité ~ 110 kWh
- Recharge aux Terminus: 600 kW

– Ebus 2022 – Bus 24m

- Technologie LTO
- Capacité ~ 150 kWh
- Recharge aux Terminus: 600 kW

– Exquicity S301 – TB 18m

- Technologie LFP
- Capacité 28 kWh
- Masse : 740 kg
- Pmax : 80 kW (remplacement GMA)

2013-2021

– Exquicity S302 – TB 18m

- Technologie LTO (sécurité et performance amélioré)
- Capacité 45 kWh (autonomie)
- Masse: 1'500 kg (complet inclus refroidissement)
- Pmax : 210 kW → Performance identique en mode batterie ou LA

Déploiement réseau – Infrastructure

Bénéfices attendus pour les lignes et dépôts

- Recharge à haute puissance
 - aux Terminus (~+50% vis-à-vis L23 attendu)
 - 1 voire 2 Flash max par direction (20 sec)
- Infrastructure légère et sûre aux dépôt.
 - Recharge rapide (2-5 min) à l'entrée du dépôt avant le remisage
 - Concept de sécurité incendie facilité par:
 - la faible taille en kWh de la batterie,
 - la sureté de la technologie LTO et
 - l'absence de charge aux places de remisage.
- Connexion aux réseau électrique distribué et énergie renouvelable
 - Recharge en journée pendant l'exploitation. Ainsi, l'énergie solaire peut être utilisé directement
 - Contrat d'énergie 100% renouvelable avec les SIG

6

Projet eBus: Configurations

Configurations Véhicules, Infrastructures aux dépôts et sur le réseau

Projet – eBus

Véhicules

- 65 Bus articulés

- 56 double-articulés

- Dimensions

- Longueur 18.75 / 24.7 m

- Largeur 2.55 m

- Compartiment passagers

- Capacité min. (4p/m²) 110 / 140 (Selon CP)

- Plancher bas 100%

- Nombre de sièges approximatifs 40 / 50

- Zone chaise roulante : 1 / 2 places, évolutif selon cabine occupée

- Sièges PMR 10%

- Espace multifonctions Oui

Configuration Infrastructures sur le réseau et aux dépôts

- Principe de base sur le réseau
 - Recharge à 600 kW aux terminus (MT) en moins de 5'
 - Recharge à 600 kW aux sous-stations intermédiaires/Backup (BT)

- Principe de base aux dépôts
 - Recharge à 600 kW (idem terminus) à l'entrée au dépôt en max 5 min.
 - Remisage banalisé (idem bus diesel)
 - Equipement des places de maintenance avec chargeur à faible puissance

- Configuration spécifique des dépôts
 - 2 potences 600kW à l'entrée de chaque dépôts
 - En Chardon – Au niveau du plein Diesel
 - Jonction – Voies 1 et 2
 - Bachet – Voies 199 et 200 / Voies 4 et 5 Bachet-de-Pesay
 - Places de maintenances équipées avec chargeurs CCS2 mutualisés
 - Place «Avarie» - Emplacement commun pour les 3 dépôts à déterminer

7

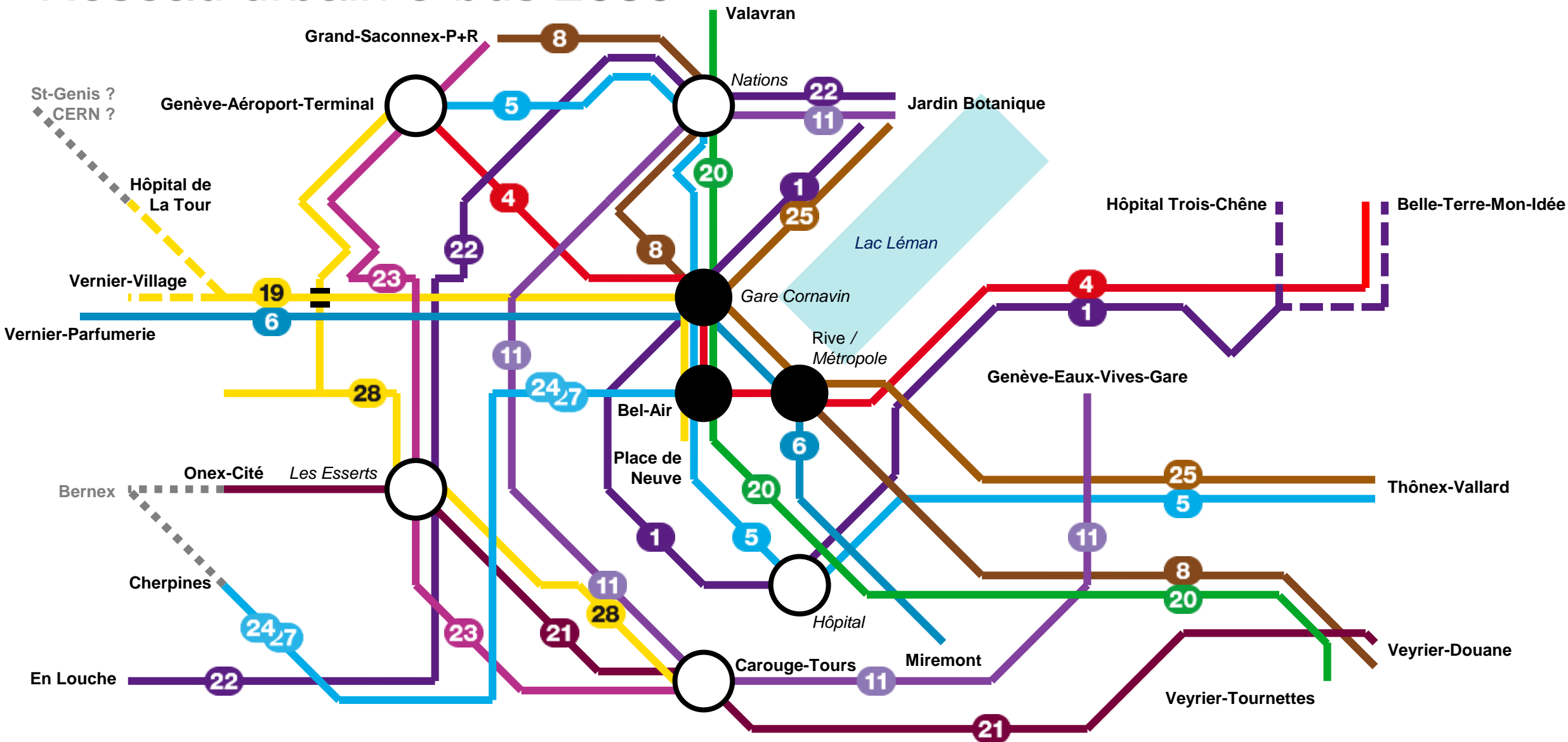
Le réseau 100% électrique

CAP2030

CAP20230 : Evolution du réseau urbain



Réseau urbain e-bus 2030



8

Perspectives énergétiques

Electrification de notre flotte de bus

Transition énergétique

Projection de la consommation à 2030

Impact de la transition énergétique de nos lignes de bus

- En 2019, nous avons consommé ~ 6.3 Ml de Diesel (réf. 3), soit **63 GWh** pour 11 Mkm (réf. 4) :
 - 1.45 Mkm en solo → ~581'000 l @ 40 Litres/100km
 - 9.47 Mkm en articulé → 5'680'000 l @ 60Litres/100km
 - Ceci représente un coût d'approvisionnement énergétique de ~ 7 MCHF/an (à 1.1 CHF/l)
- L'électrification des lignes diesel représente un total de **25 GWh/an** électrique pour 11 Mkm/an
 - Le passage en eBus va augmenter la consommation électrique de ~**2.3 GWh/an** (1.6 kWh/km TOSA ramené à 12m)
 - Le passage en eBus articulé va augmenter notre consommation électrique de ~**22.7 GWh/an** (2.4 kWh/km TOSA)
 - Ceci représente un coût d'approvisionnement énergétique de ~4.5 MCHF/an (0.18 CHF/kWh)

Remarque : Ainsi avant transition énergétique, la consommation énergétique « primaire » tpg peut être évalué à ~ 105 GWh (36+6+63)

sources :

3. Consommation Diesel : #269790

4. Rapport annuel tpg 2019 : <https://www.tpg.ch/sites/default/files/2020-06/TPG-RAG2019.pdf>

5. Référentiel de conversion https://www.ge.ch/statistique/tel/domaines/08/08_03/facteurs_conversion.pdf

Transition énergétique

Conséquences

En équivalence 2019 et sans amélioration des rendements, la transition énergétique complète des bus diesel en électrique représentera:

- Une augmentation de 25 GWh/an de notre consommation électrique de traction. Ainsi la consommation électrique totale projetée à isopérimètre passe de **36 GWh à 61 GWh, soit +69%**
- Une réduction de 6.3 Ml de Diesel → Réduction d'émission des GES de **16'443 tCO2/an** (6.3 Ml à 2.61 kgCO2/l – réf.5),
p.i. La fondation MyClimate contribue avec une indemnisation de CHF 200/tCO2 (ref. 6), soit un potentiel de 3.3 MCHF/an. Au prix actuel, les 25 GWh additionnel coutent 4.3 MCHF)
- Une réduction de consommation d'énergie « primaire » de **38 GWh**
(63 GWh/an Diesel - 25 GWh/an en électrique) faisant évoluer notre consommation énergétique « primaire » tpg de 105 à 67 GWh (61+6)

sources :

5. Référentiel de conversion https://www.ge.ch/statistique/tel/domaines/08/08_03/facteurs_conversion.pdf

6. Programme de protection climatique de myclimate : https://www.myclimate.org/fileadmin/user_upload/myclimate_-_home/01_Information/05_Climate_protection_projects/0_klimaschutzprojekte/schweiz-7813-A/RZ-COP-Bus-Programm-Flyer-A5-fr-web.pdf

Transition énergétique

Impact au niveau cantonal à 2030

Augmentation de la consommation d'électricité du Canton

- Les 25 GWh supplémentaire représente une **augmentation de 0.9%** de la consommation électrique du Canton* (2'700 GWh) .

Référence* : https://www.ge.ch/statistique/actualites/welcome.asp?actu=4405&mm1=01/01&aaaa1=2020&mm2=12/31&aaaa2=2021&num=0&Actudomaine=08_02

Réduction de la vente de carburant dans le Canton

- En terme de vente de carburant au niveau cantonal** (212 Mio de litres), l'abandon du diesel aux tpg représente une **réduction de 3%** (6.3 Moi de litres).

Réduction des émission de CO2 dans le Canton

- En terme de d'émission de CO2 au niveau cantonal** (1'544'88 tCO2), l'abandon du diesel aux tpg représente une **réduction de 1%** (16'443 tCO2).

Remarque : la diminution est plus faible que celle pour le carburant car l'émission de CO2 est aussi dépendante de la consommation de mazout et gaz naturel.

**Référence : https://www.ge.ch/statistique/infographies/08/08_02/info_energie_2019.pdf

Questions-Réponses



CTEB – Stratégie d'électrification des lignes de bus aux tpg

Genève au Centre de Maintenance d'En Chardon



tpg: En route vers des transports publics urbains à 100 % électriques

La moitié des 478 véhicules des tpg est électrique et entièrement alimentée par une énergie renouvelable. tpg affiche l'ambition de disposer d'un parc de véhicules 100% électriques d'ici 2030.