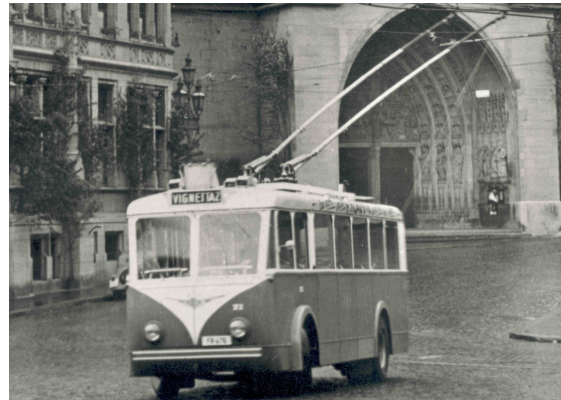
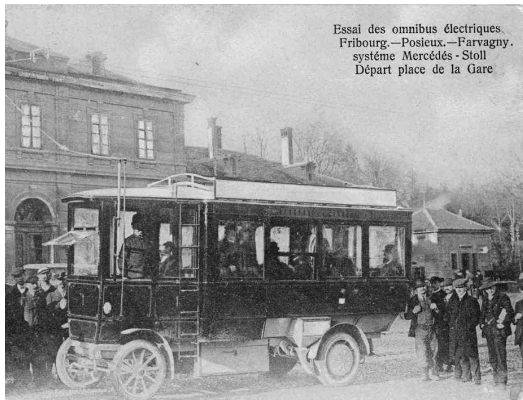


Evolution du parc routier

Agglomération de Fribourg



... ?

Rapport technique

Septembre 2012

Transports publics fribourgeois **tpf** ●●●

TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION	5
1.1. Horizon et champ de l'étude.....	5
1.2. Méthodologie	6
2. DÉTERMINATION DES BESOINS EN MATÉRIEL ROULANT	8
2.1. Durée de vie résiduelle du parc routier existant en 2012	8
2.2. Evolution des besoins en matériel roulant	8
2.2.1. Hypothèses concernant les véhicules de réserve.....	9
3. TECHNOLOGIES DISPONIBLES	11
3.1. Motorisation thermique classique	12
3.2. Motorisation thermique au gaz naturel	13
3.3. Motorisation hybride	14
3.4. Trolleybus	15
3.5. Motorisation bimode	16
3.6. Motorisation électrique alimentée par pile à combustible.....	17
3.7. Motorisation par combustion interne d'hydrogène	18
3.8. Motorisation électrique alimentée par biberonnage	19
3.9. Motorisation électrique à recharge préalable	20
3.10. Carburants alternatifs.....	21
3.10.1. Principe	21
3.10.2. Biocarburants.....	21
3.10.2.1 Le biodiesel.....	21
3.10.2.2 Le bioéthanol	21
3.10.2.3 Le biogaz	21
3.10.2.4 Les biocarburants de synthèse.....	22
3.10.3. Gazole désulfuré.....	23
3.10.4. Emulsions eau-gazole (Aquazole, Gecam O#).....	23
3.10.5. Résumé des technologies	24
3.10.5.1 Critères économiques	25
3.10.5.2 Critères environnementaux	25
3.10.5.3 Critères technologiques.....	25
3.10.5.4 Risques.....	25
4. ELABORATION DE SCENARIOS POUR L'AGGLOMERATION DE FRIBOURG	26
4.1. Systèmes retenus	26
4.1.1. Bus thermiques conventionnels et dérivés (biocarburants, gaz, hybrides).....	26
4.1.2. Trolleybus	26
4.1.3. Bus bimode	26
4.1.4. Systèmes de biberonnage.....	26
4.2. Systèmes non retenus :.....	27
4.2.1. Bus électriques à recharge préalable	27
4.2.2. Bus à hydrogène (pile à combustible et à combustion interne d'hydrogène)	27

4.3.	Scénarios	28
4.4.	Modèle d'estimation des coûts et émissions par scénario	29
4.4.1.	Hypothèses de base	29
4.4.2.	Achat de véhicules	29
4.4.3.	Infrastructures d'alimentation en énergie et liées au mode	29
4.4.4.	Calcul des coûts	30
4.4.5.	Calculs d'émissions	31
4.4.6.	Hypothèses diverses	33
4.4.6.1	Accès au dépôt de Givisiez	33
4.5.	Résultats globaux	34
4.5.1.	Evolution du réseau par scénario	34
4.5.2.	Evolution du coût des véhicules, de l'infrastructure et de l'énergie	35
4.5.3.	Evolution des émissions de polluants	36
4.6.	Emissions sonores	39
4.6.1.	Ligne 1	40
4.6.2.	Ligne 2	42
4.6.3.	Ligne 3	44
4.6.4.	Ligne 4	45
4.6.5.	Ligne 5	45
4.6.6.	Ligne 6	47
4.6.7.	Ligne 7	48
4.6.8.	Résumé	49
4.7.	Représentation synthétiques des avantages et inconvénients des scénarios	50
5.	RÉCAPITULATION ET RECOMMANDATIONS	51
5.1.	Récapitulatif des scénarios	51
5.2.	Recommandations	51
6.	ANNEXES	53
6.1.	Tables d'abréviations	53
6.1.1.	Abréviations citées	53
6.1.2.	Entreprises de transport en commun citées	54
6.2.	Références	54
6.3.	Plans de réseau	55
6.3.1.	Plan de réseau 2012	55
6.3.2.	Plan de réseau 2018	55

Illustrations de couverture, de gauche à droite et de haut en bas : essai du premier Omnibus électrique en gare de Fribourg, 1912, passage d'un trolleybus en 1950 au Tilleul pour Vignettaz, Bus HESS MAN/Kiepe aux Biches en 2004. Photos archives et collection Tpf.

1. Introduction

Les transports publics jouissent d'un essor sans précédent à Fribourg. L'offre s'étoffe, la demande croît. Le matériel roulant est régulièrement renouvelé, en remplaçant un véhicule en fin de vie par un homologue neuf. En ville, trois technologies se côtoient actuellement : bus thermique, trolleybus et bus bimode. De plus, les bus thermiques se déclinent en trois tailles : bus de 9, 12 et 18 mètres. Chaque type de véhicule nécessite sa propre réserve, augmentant de facto les coûts.

La mobilité responsable passe aujourd'hui par les transports en commun. Celle-ci se doit alors d'être exemplaire au niveau du bilan environnemental, tout en garantissant un service sans faille et en conservant les coûts dans une enveloppe raisonnable.

De nombreux systèmes de traction de bus apparaissent sur le marché. Les coûts, l'impact environnemental et le degré de maturité varient fortement d'une technologie à l'autre. La présente étude vise à déterminer des scénarios optimaux de développement du parc de matériel roulant en ville.

1.1. Horizon et champ de l'étude

Le projet d'agglomération de deuxième génération de l'Agglomération de Fribourg (PA2 Fribourg) propose un réseau de transports publics aux horizons 2018 et 2030 (cf. annexes). Plusieurs véhicules arrivent en fin de vie parallèlement à l'instauration de ce réseau ; notamment les 9 bus bimode HESS/MAN/KIEPE.

Le principal horizon d'étude se situe à 2018. Les scénarios et coûts seront toutefois définis de 2013 à 2025, avec une tendance à la versatilité augmentant naturellement avec le temps.

En 2012, Le réseau urbain de Fribourg comporte 7 lignes de bus et une ligne de funiculaire. S'ajoutent à elles trois lignes régionales d'agglomération (338, 542 et 575). Ces trois lignes sont toutefois produites de manière indépendante aux lignes de bus urbaines et le resteront, malgré leur renumérotation prévue dès décembre 2012.

Dès l'ouverture du pont de la Poya en 2014, la ligne urbaine 10, reliant le quartier du Schoenberg à Givisiez, verra le jour. Celle-ci est intégrée à la production urbaine. Dans cette étude, son apparition intervient pour l'an 2015.

Sont donc considérées dans l'étude les lignes 1 à 7 et la ligne 10.

Une modification lourde d'infrastructure n'est pas envisageable à l'horizon 2018, et n'est d'ailleurs pas inscrite dans le PA2 Fribourg. Aucune des lignes de bus actuelles ne sera reconvertie en tram, système ferroviaire ou autre système guidé d'ici-là. Seules des modifications ou extensions de systèmes semi-guidés (trolleybus p.ex.) sont envisageables.

Ne sont donc considérés dans l'étude que des **systèmes** de type **roumier** aptes à une circulation en site partagé.

1.2. Méthodologie

La première partie de l'étude détermine les besoins en matériel roulant au sein de l'agglomération de Fribourg pour les divers horizons de planification, ceci en lien avec les extensions d'offre prévues et le remplacement progressif des véhicules aujourd'hui en service.

Dans un deuxième temps, une synthèse des modes de traction disponibles sur le marché ou en cours d'étude permet de cerner les modes les plus probables pour une utilisation future sur le réseau urbain des Tpf.

Des scénarios sont par la suite établis, visant le maintien ou le remplacement de technologies par groupes de lignes. Un modèle est établi, permettant de comparer coûts, émissions, risques et autres facteurs pour chaque scénario. Une analyse multicritères permet de faire ressortir les avantages et inconvénients de chaque scénario. Chacun d'entre eux pourrait ensuite être affiné par des modules, valorisant certains modes au sein du réseau.

Une recommandation prend finalement place, conciliant les enjeux environnementaux, financiers et d'image qu'apportera le choix d'un scénario.

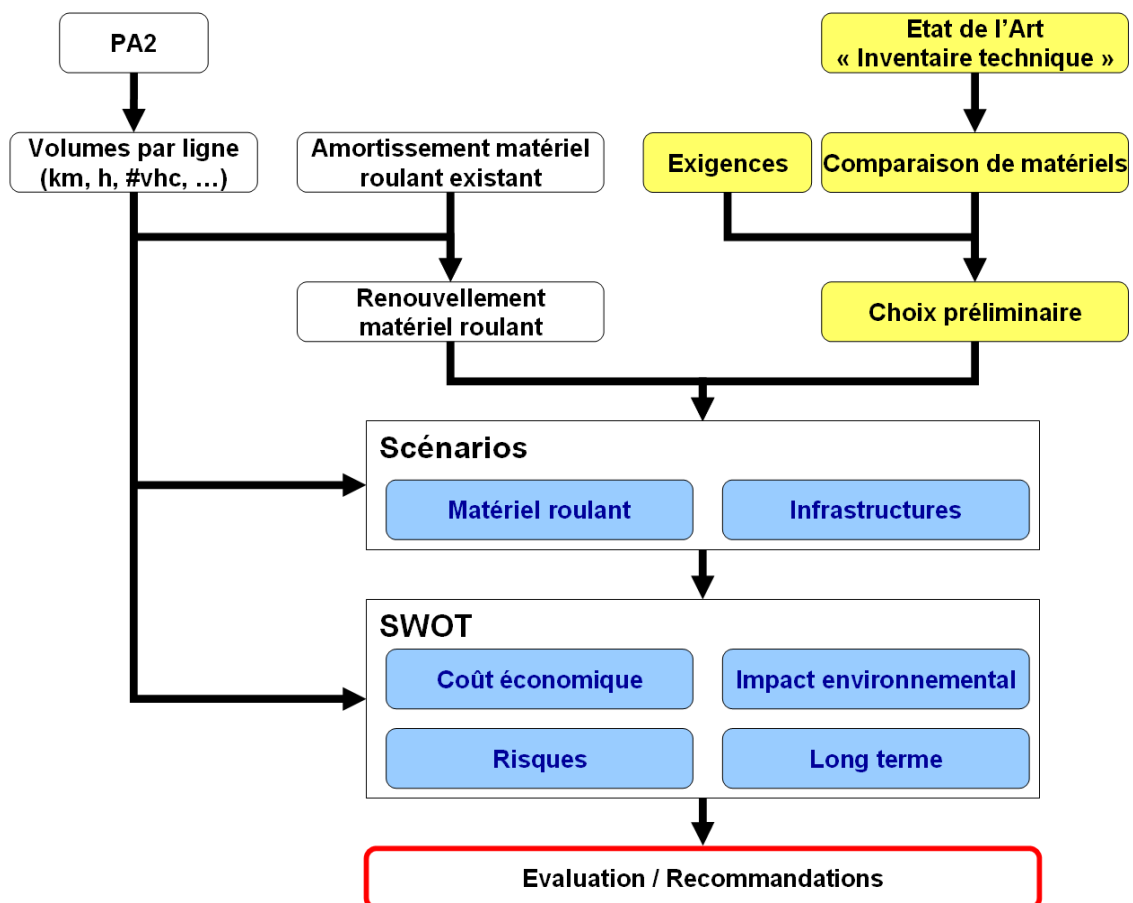


Figure 1: Organigramme méthodologique de l'étude

2. Détermination des besoins en matériel roulant

2.1. Durée de vie résiduelle du parc routier existant en 2012

Le parc est synthétisé en six catégories de véhicules, avec leurs dates respectives de fin d'exploitation probable.

Nombre	Type de véhicule	Dernière année d'utilisation
10	Autobus 12 m	2015
7	Autobus 18 m	2015
9	Bus bimode	2017
10	Autobus articulés	2018
5	Autobus 9 m	2019
12	Trolleybus articulés	2024

2.2. Evolution des besoins en matériel roulant

Le PA2 Fribourg prévoit un réseau à l'horizon 2018, dont les modifications sont déclenchées par des éléments infrastructurels. Pour les besoins de cette étude, des hypothèses quant à l'avènement de chacun d'entre eux sont formulées.

Nom de l'étape	Infrastructure à réaliser	Lignes concernées	Terme probable
Poya	Pont de la Poya	10	2015
Cormanon I	Pont de la Fonderie	5, 7	2016
Matran	Route collectrice	11	2017
Givisiez	Gare de Givisiez	3, 9, 10	2018

La réalisation de l'étape Matran n'a aucune incidence sur la présente étude. En 2018 intervient également le passage à une cadence de 7' / 8' sur la ligne 1.

On obtient ainsi la courbe des besoins en matériel roulant au fil du temps, sans toutefois tenir compte du mode, ni des renforts ou de la réserve.

2.2.1. Hypothèses concernant les véhicules de réserve

La maintenance des véhicules sera optimisée à l'avenir. Toutefois, cette étude prend pour hypothèse qu'un nombre fixe de véhicules de réserve est nécessaire.

Les véhicules de réserve sont majoritairement des bus thermiques de 18 m, du fait qu'ils peuvent être engagés sur n'importe quelle ligne à l'exception de la ligne 4. A l'avenir, il est même probable que la réserve soit conjointe entre bus urbains et régionaux. Arbitrairement, le nombre de véhicules de réserve est fixé à 15. Ce choix n'a que peu d'influence sur le résultat du modèle établi pour la suite de cette étude ; la réserve étant identique dans tous les cas.

La ligne 4 nécessite trois bus de 9 m en opération normale : deux pour le service Gare – Auge et un pour les renforts Gare – Eglise St-Jean. Les renforts Gare – Eglise St-Jean peuvent, si nécessaire, être effectués par des bus de 12 m. L'engagement des bus 9 m est nécessaire lorsque ceux-ci franchissent le pont de Berne.

Le parc doit donc comprendre trois bus de 9 m, appuyés de trois bus de 12 m prélevés notamment sur la ligne 10 et d'éventuelles courses de renfort du reste du réseau.

La ligne 10 nécessite deux véhicules. Cette ligne tangentielle peut raisonnablement être exploitée avec des bus de 12 m, alors que le gabarit autorise des bus de 18 m. En cas d'avarie d'un bus 9 m de la ligne 4 ou d'un bus de 12 m, des bus de 18 m de la réserve globale sont engagés sur la ligne 10.

3. Technologies disponibles


Un inventaire des différentes technologies de traction de bus existantes, à l'étude ou pressenties est ici dressé. Une fiche montre le principe de chaque mode, et présente l'état de la technique. Les particularités génériques de chacun de ces modes sont intégrées ensuite dans un tableau comparatif, qui permet le choix des modes de traction les plus pertinents à l'avenir.

Ces choix permettront ensuite l'élaboration et l'évaluation de scénarios au chapitre 4 de ce rapport.

Les systèmes ayant été jadis expérimentés ou utilisés, mais n'ayant aucun avenir probable ne sont pas repris (gyrobus, gazogène, hippomobiles, bus à vapeur, ...)

Les exploitants, fabricants et modèles de véhicules cités dans le présent chapitre le sont à titre d'exemple, sont sélectionnés de manière arbitraire et ne représentent pas un quelconque choix.

3.1. Motorisation thermique classique

<p>Les bus thermiques classiques sont les plus répandus et les plus éprouvés. Ils sont toutefois à l'origine de pollution atmosphérique et sonore.</p> <p>Les normes Euro (Euro VI dès 2013) fixent des limites concernant les émissions nocives. Les constructeurs doivent rendre leurs produits conformes. Ces normes évoluent et deviennent toujours plus contraignantes.</p>	
<p>Figure 2: Bus Mercedes Benz Citaro, photo Mercedes Benz</p>	

Résumé technologique		
Source d'énergie		Diesel ou essence, d'origine fossile ou non ¹
Description de la traction		Moteur à explosion, transmission classique
Infrastructures nécessaires		Pompes et réservoirs de carburants
Maturité technologique	+	Technologie éprouvée
Bruit	-	Marqué
Emissions atmosphériques	-	Oxydes d'azote NO _x , monoxyde de carbone CO, hydrocarbures, particules fines, dioxyde de carbone CO ₂
Perspectives		Réduction des émissions (normes Euro en constante évolution), progrès au niveau des biocarburants
Fabricants (exemples)		HESS, Irisbus, MAN, Mercedes Neoplan, Renault, Setra, Solaris, VanHool, Volvo
Exploitants		Ensemble des entreprises de transport routier
Points forts	Points faibles	
Technologie éprouvée	Fort impact écologique	
Pas d'infrastructure nécessaire	Emissions de CO ₂ , CO, NO _x , particules fines	
Faible coût global	Nuisances sonores	
18 et 24 mètres disponibles	Dépendance au carburant	

¹Cf chapitre 3.10 sur les carburants alternatifs

3.2. Motorisation thermique au gaz naturel

Le gaz naturel (composé essentiellement de méthane) apparaît comme combustible alternatif aux carburants conventionnels. La combustion du gaz naturel ne produit ni oxyde de soufre, ni plomb, ni poussières et peu d'oxydes d'azote. Il n'émet pas d'odeur.



Figure 3: Bus BGU photo: Remund AG

Résumé technologique

Source d'énergie		Gaz naturel (principalement composé de méthane), d'origine fossile ou non ¹
Description de la traction		Moteur à explosion, transmission classique
Infrastructures nécessaires		Station de compression ou accès à des conduites haute pression, mise en conformité des locaux fermés (aération)
Maturité technologique	o	Technologie éprouvée, mais nécessite toujours beaucoup de maintenance
Bruit	o	Marqué, mais moins important que les moteurs thermiques classiques
Emissions atmosphériques	-	Oxydes d'azote NOx, monoxyde de carbone CO, hydrocarbures, dioxyde de carbone CO ₂
Perspectives		Le marché restera de faible ampleur, et les améliorations technologiques seront moins marquées que pour le diesel, par exemple.
Fabricants (exemples)		Irisbus, Mercedes-Benz, VanHool, Volvo
Exploitants (exemples)		BGU, Bernmobil, TL, TN, TPC, VMCV
Points forts		Points faibles
Biogaz envisageable		Nécessite une station de compression
Facilement compatible Euro VI		Nuisances sonores
18 mètres disponibles		Dépendance au gaz
Technologie connue et éprouvée		Mise en conformité des locaux fermés impérative (risques d'explosion)
Grandes réserves d'énergie disponibles		Emissions de polluants
		Moins performants qu'un moteur au diesel

¹Cf chapitre 3.10 sur les carburants alternatifs

3.3. Motorisation hybride

Le bus hybride intègre un moteur électrique dans la chaîne de traction d'un autobus thermique conventionnel. Celui-ci permet de récupérer de l'énergie lors du freinage du véhicule, et de la restituer pour son redémarrage. Le moteur électrique fait donc office de moteur de propulsion et de générateur.



Figure 4: Bus RBS Volvo 7700 Hybride, Photo RBS

Résumé technologique

Source d'énergie		Diesel, essence et autres carburants, d'origine fossile ou non ¹ Electricité par batteries, alimentées par récupération
Description de la traction		Jusqu'à 20 km/h, le moteur électrique effectue la traction du véhicule. Ensuite, le moteur thermique prend le relais. La transmission permet la transformation de l'énergie du freinage en électricité par une génératrice et est ainsi récupérée.
Infrastructures nécessaires		Pompes et réservoirs de carburants
Maturité technologique	o	En cours d'essais sur de nombreux réseaux. Premières productions de série
Bruit	o	Bruit réduit au démarrage, moteur thermique classique à plus haute vitesse
Emissions atmosphériques	o	Emissions réduites au démarrage, moteur thermique classique à plus haute vitesse
Perspectives		Développement attendu. Possibilité de couplage avec d'autres types de traction
Fabricants (exemples)		Evobus (Mercedes), HESS, Heuliez Bus, MAN, Safra, Scania, Volvo
Exploitants (exemples)		AAGR, AAR bus+Bahn, CarPostal, BSU, BVB, RBS, STI, Tpf, TPG, TRN, TL, VB-TPB, VBG, VBSG, VZO
Points forts		Points faibles
Economies d'énergie potentielle (environnement urbain optimal)		Pour l'instant, peu de 18 m
Démarrage moins bruyant qu'un bus thermique conventionnel		Risques technologiques
Douceur du roulement		Plus compliqué = entretien plus difficile
Moins de CO ₂ (moins de carburant utilisé)		Batteries = surpoids du véhicule
Moins de CO (pas de « mauvaise combustion » à basse vitesse)		Durée de vie des batteries
Transmission et batteries fiables		

¹Cf chapitre 3.10 sur les carburants alternatifs

3.4. Trolleybus

Les trolleybus possèdent uniquement un moteur électrique. Le courant nécessaire à l'effort de traction et aux systèmes auxiliaires est acheminé par une paire de lignes aériennes. A l'aide de leurs perches, les trolleybus viennent s'y brancher. L'ensemble des lignes parcourues par un trolleybus doit donc être équipé au préalable des lignes électriques ainsi que des sous-stations permettant de garantir l'apport de courant.




Figure 5: Trolleybus HESS Swisstrolley, photo Tpf

Résumé technologique

Source d'énergie		Electricité acheminée par lignes aériennes. Pour de courtes distances, groupe moteur-génératrice (carburants conventionnels) ou batteries d'appoint
Description de la traction		Utilisation directe d'électricité par le moteur électrique
Infrastructures nécessaires		Lignes aériennes, sous-stations sur l'intégralité des lignes exploitées
Maturité technologique	+	Mode éprouvé, en exploitation dans de nombreuses villes du monde (dont Fribourg) depuis des décennies
Bruit	+	Moteur électrique peu bruyant
Emissions atmosphériques	+	Aucune émission de polluant au niveau du véhicule. Le mode de production de l'électricité est déterminant.
Perspectives		Peu d'évolutions attendues, maintien de la technologie
Fabricants (exemples)		Irisbus, HESS, Mercedes-Benz, Solaris, VanHool, Volvo
Exploitants (exemples)		Bernmobil, SBW, TL, TN, Tpf, TPG, TRN, VB-TPB, VBL, VBSG, VBSh, VBZ, VMCV
Points forts		Points faibles
Aucune émission en mode électrique		Nécessite des lignes aériennes
Mode éprouvé		Flexibilité : ne peut s'écarter des lignes
18 et 24 mètres disponibles		Esthétique : Impact visuel des lignes
Poids		

3.5. Motorisation bimode

<p>Le bus bimode allie trolleybus et traction thermique, par l'installation d'un groupe moteur-génératrice suffisamment puissant pour être utilisé.</p>	
<p>Figure 6: Bus bimode HESS Swisstrolley, photo Tpf</p>	

Résumé technologique		
Source d'énergie		Electricité acheminée par lignes aériennes. Hors ligne de contact, Diesel, dssence et autres carburants, d'origine fossile ou non ¹
Description de la traction		Moteur électrique alimenté directement ou par groupe moteur-génératrice thermique, ou chaînes de tractions électriques et moteur à explosion en parallèle.
Infrastructures nécessaires		Lignes aériennes, sous-stations sur une partie de la ligne, pompes et réservoirs de carburants
Maturité technologique	○	Bus en exploitation quotidienne dans quelques villes, fiabilité limitée
Bruit	○	Moteur électrique peu bruyant, moteur thermique bruyant
Emissions atmosphériques	○	Aucune émission de polluant au niveau du véhicule en mode électrique. Le mode de production de l'électricité est déterminant. En mode diesel, consommation élevée et émissions liées.
Perspectives		Limitées, la combinaison des deux modes entraîne un surpoids important et des usures plus grandes. La complexité du véhicule a été à l'origine d'une fiabilité limitée. Technologie exploitée puis abandonnée à Lausanne.
Fabricants (exemples)		HESS, Neoplan, Volvo
Exploitants (exemples)		TL, Tpf
Points forts		Points faibles
Aucune émission en mode électrique		Très gourmand en mode autonome
Conserve la flexibilité d'un bus classique		Bruyant en mode autonome
18 mètres disponibles		Coûts d'exploitation (2 systèmes)

¹Cf chapitre 3.10 sur les carburants alternatifs

3.6. Motorisation électrique alimentée par pile à combustible

Les bus à pile à combustible sont mus par un moteur électrique. L'énergie de traction ainsi que celle destinée aux systèmes auxiliaires est fournie par une pile à combustible. Ce système est également compatible avec une technologie hybride, où l'énergie de freinage est stockée pour l'assistance au démarrage.




Figure 7: Bus à pile à combustible CarPostal Mercedes Citaro FuelCell, photo La Poste

Résumé technologique


Source d'énergie		Hydrogène en bombonne, produit à partir d'eau et d'électricité ou par extraction du méthane
Description de la traction		Production de l'électricité par une pile utilisant l'hydrogène stocké et l'oxygène de l'air, puis moteur électrique
Infrastructures nécessaires		Station de production et / ou de recharge d'hydrogène. Mise en conformité des installations fermées
Maturité technologique	-	Premiers essais commerciaux, durée de vie de certains composants très limitée
Bruit	+	Moteur électrique peu bruyant
Emissions atmosphériques	+	Seule de l'eau est rejetée au niveau du véhicule. Le mode de production et d'acheminement de l'hydrogène est déterminant.
Perspectives		Développement attendu, augmentation de la durée de vie de la pile, baisse du coût des composants et de la consommation
Fabricants (exemples)		Irisbus, MAN-NEOPLAN, Mercedes-Benz, VanHool, VDL bus & Coach
Exploitants (exemples)		CarPostal, bus urbains de Madrid (E), Barcelone (E), Londres (UK), Amsterdam (NL), Hambourg (D), Berlin (D), Rejkjavik (IS), Beijing (CN), Perth (AU), Cologne (D)
Points forts		Points faibles
Même souplesse qu'un bus conventionnel		Encore en développement
Aucune émission autre que de l'eau		Pour l'instant, peu de bus de 18 m
		L'hydrogène est explosif, mise en conformité des infrastructures nécessaire.
		Nécessite des installations de recharge spécifiques
		Production de l'hydrogène peut générer des émissions
		Autonomie / autodécharge
		Durée de vie de la batterie

3.7. Motorisation par combustion interne d'hydrogène

<p>Les bus à combustion interne d'hydrogène utilisent un moteur à explosion alimenté en hydrogène. La combustion de l'hydrogène n'émet que de l'eau, ainsi que des oxydes d'azote et des particules fines.</p> <p>Des bus ont été testés avec satisfaction de 2006 à 2009 à Berlin. La technologie doit encore évoluer pour permettre une exploitation économiquement raisonnable et fiable.</p>	
<p>Figure 8: Bus BVG (Berlin), MAN H2ICE, photo MAN Nutzfahrzeuge</p>	

Résumé technologique		
Source d'énergie		Hydrogène en bombonne, produit à partir d'eau et d'électricité ou par extraction du méthane
Description de la traction		Moteur à explosion alimenté en hydrogène
Infrastructures nécessaires		Station de production et / ou de recharge d'hydrogène. Mise en conformité des installations fermées
Maturité technologique	-	Testé sur peu de réseaux. Améliorations possibles
Bruit	-	Moteur à explosion, reste bruyant
Emissions atmosphériques	o	Eau, oxydes d'azote NOx et particules fines
Perspectives		Améliorations de fiabilité et du coût à venir
Fabricants (exemples)		MAN-NEOPLAN, DaimlerChrysler
Exploitants (exemples)		Bus urbains de Berlin (D)
Points forts		Points faibles
Même souplesse qu'un bus conventionnel		Encore en développement
Faibles émissions nocives		L'hydrogène est explosif, mise en conformité des infrastructures nécessaire.
Pas d'émission de CO ₂		Nécessite des installations de recharge spécifiques

3.8. Motorisation électrique alimentée par biberonnage

<p>Le biberonnage constitue en un réapprovisionnement en énergie d'un véhicule tout au long de son exploitation de manière discontinue. En général, il s'agit de systèmes électriques à batteries et super-condensateurs autorisant une recharge rapide.</p>	 <p style="text-align: center;">Figure 9: bus électrique à Shanghai (CN)</p>
--	---

Résumé technologique		
Source d'énergie		Electricité fournie aux arrêts, rechargeant rapidement des batteries et condensateurs. Comme un bus hybride, l'énergie peut également être récupérée au freinage.
Description de la traction		Moteur électrique alimenté par batteries et condensateurs
Infrastructures nécessaires		Stations de recharge et sous-stations aux arrêts et zones d'entretien. Des lignes de contact partielles peuvent également être envisagées.
Maturité technologique	-	Seul Shanghai utilise massivement des bus alimentés par biberonnage. L'ensemble des autres essais effectués impliquent des prototypes
Bruit	+	Moteur électrique peu bruyant
Emissions atmosphériques	+	Aucune émission de polluant au niveau du véhicule. Le mode de production de l'électricité est déterminant.
Perspectives		De forts développements sont attendus dans ce domaine, permettant notamment l'utilisation d'infrastructures de type trolley déjà existantes.
Fabricants (exemples)		Alva, EPFT Iveco, Opbrid, Gepebus Oreos
Exploitants (exemples)		Shanghai (CN)
Points forts		Points faibles
Zéro émission		A l'état de prototype
Peu bruyant		Pas encore testé en bus de 18 m
Certains systèmes se contentent du réseau domestique		Sécurité à assurer pour les phases de charge
		Infrastructures ponctuelles souvent onéreuses

3.9. Motorisation électrique à recharge préalable

Les véhicules embarquent ou remorquent des batteries rechargées en un emplacement stationnaire. Celles-ci sont échangées aux terminus, que ce soit par la permutation de remorques, l'enlèvement automatisé ou semi-automatisé de batteries, etc.



Figure 9: Leyland National Battery Bus, Runcorn (GB), photo: www.flickr.com, utilisateur "bkp550"

Résumé technologique

Source d'énergie		Electricité en batteries rechargées sur un emplacement stationnaire
Description de la traction		Alimentation directe de moteurs électriques par batteries
Infrastructures nécessaires		Installation d'échange et de recharge de batteries
Maturité technologique	-	Aucune application étendue de cette technologie n'a vu le jour.
Bruit	+	Moteur électrique peu bruyant
Emissions atmosphériques	+	Aucune émission de polluant au niveau du véhicule. Le mode de production de l'électricité est déterminant.
Perspectives		Essais prévus par le programme "European Bus System of the Future", coordonné par l'Union Internationale des Transports Publics UITP. En juin 2012, exploitants, fabricants et autres partenaires intéressés déposent leurs demandes de participation au programme.
Fabricants (exemples)		-
Exploitants (exemples)		-
Points forts		Points faibles
Zéro émission		Expérimental
Peu de bruit		Besoin de temps aux terminus
		Lourde infrastructure d'échange et de recharge nécessaire

3.10. Carburants alternatifs

3.10.1. Principe

Le diesel et les autres carburants peuvent être remplacés de manière intégrale ou partielle par des produits alternatifs. Il ne s'agit pas en soi d'un type de véhicule différent, mais ces produits peuvent être intégrés à l'ensemble des systèmes nécessitant des hydrocarbures.

3.10.2. Biocarburants

Un biocarburant est un carburant (donc une forme d'énergie utilisée dans le secteur des transports) solide, liquide ou gazeux, produit à partir de matière végétale ou animale non fossile, également appelée "biomasse". Si de par sa facilité d'utilisation, la phase liquide est de loin la forme la plus utilisée, la forme gazeuse commence également à avoir passablement de succès. Ces biocarburants peuvent être produits à partir de diverses matières premières, selon différents procédés de transformation. Les biocarburants se distinguent en quatre filières : biodiesel, biométhane (biogaz), bioéthanol et biocarburants de synthèse.

3.10.2.1 Le biodiesel

Le biodiesel est un ester (généralement ester méthylique) habituellement issu d'huile végétale. L'utilisation d'huile végétale comme carburant n'est pas une technique nouvelle. Rudolf Diesel, à l'origine, avait en effet développé le moteur qui porte son nom à l'aide d'huile d'arachide.

3.10.2.2 Le bioéthanol

Le bioéthanol est en fait de l'alcool éthylique (ou encore éthanol), identique par sa composition à l'alcool de bouche. Il existe deux façons principales de produire de l'éthanol, à savoir par synthèse à partir de d'hydrocarbures et à partir de biomasse. Seule cette deuxième façon de procéder mérite l'appellation "bioéthanol".

3.10.2.3 Le biogaz

La digestion anaérobie ou méthanisation consiste à transformer les matières organiques (sucre, protéines et graisses) en l'absence d'oxygène pour produire du biogaz, à savoir un mélange de méthane (CH_4) et de dioxyde de carbone (CO_2), au moyen de bactéries. Le biogaz est généralement utilisé comme combustible pour la production locale de chaleur ou la cogénération d'électricité et de chaleur. Toutefois, l'utilisation du biogaz comme carburant dans des véhicules à gaz se développe de plus en plus. Outre l'aspect énergétique, ce processus de méthanisation offre une

solution avantageuse pour le traitement d'effluents méthanisables présentant une forte charge organique tels que le petit-lait.

3.10.2.4 Les biocarburants de synthèse

Les biocarburants de synthèse tels que le diesel Fischer-Tropsch (FT-diesel), le diméthyl-éther (DME) l'hydrogène (H₂) et, dans une moindre mesure, le biométhanol, figurent parmi les filières de biocarburants liquides les plus prometteuses à moyen-long terme. Ces filières offrent l'avantage de reposer sur la transformation de la biomasse lignocellulosique (bois, herbe, déchets et résidus agricoles, etc.), disponible en plus grandes quantités, généralement moins coûteuse et ne représentant pas de compétition directe avec l'alimentation.

La situation en Suisse relative à l'utilisation des biocarburants est très proche de celle au sein de l'UE, aussi bien en termes de normes de qualité qu'en termes de garanties constructeurs.

L'incorporation à hauteur de 5% vol. de biodiesel dans le diesel (B5) et d'éthanol dans l'essence (E5) est autorisée dans la mesure où le mélange est conforme aux normes de qualité du diesel et de l'essence, SN EN 590 et SN EN 228 respectivement. Le biodiesel mélangé au diesel ordinaire doit être lui-même conforme à la norme SN EN 14214. La norme européenne précisant les spécifications du bioéthanol-carburant pour un mélange à hauteur de 5% vol. dans l'essence (EN 15376) est en préparation. C'est ainsi que le taux d'incorporation de biocarburants dans les mélanges biodiesel-diesel et bioéthanol-essence destinés à la grande distribution dans les stations-service ne dépasse pas 5%.

L'E85, arrivé plus récemment sur le marché, est considéré comme un carburant à part entière, soumis à d'autres règles que les mélanges à faible taux d'incorporation tels que l'E5 où le bioéthanol joue plutôt un rôle d'additif ajouté à l'essence ordinaire. Une norme européenne précisant les spécifications de l'E85 est là aussi en préparation.

Source : <http://www.plateforme-biocarburants.ch>

Les biocarburants ne conduisent pas tous à une réduction des impacts sur l'environnement en comparaison avec les carburants fossiles. Une analyse de cycle de vie des biocarburants a été réalisée par l'EMPA en 2007.

Cette étude permet une comparaison globale des effets des biocarburants sur l'environnement (les aspects économiques et impacts sociaux n'ont toutefois pas été pris en compte).

Le bilan global a été déterminé à l'aide de la méthode suisse de saturation écologique (UBP), qui évalue la différence entre les impacts sur l'environnement et les valeurs limites légales.

Parmi les filières de production, ce sont actuellement les filières issues de déchets (huiles usagées, petit-lait) et de résidus et matières lignocelluliques qui présentent les meilleurs résultats vis-à-vis des carburants conventionnels.

3.10.3. Gazole désulfuré

Le gazole désulfuré (moins de 50 ppm de soufre), dit gazole TBTS, permet de diminuer les rejets de composants soufrés.

3.10.4. Emulsions eau-gazole (Aquazole, Gecam O#)

Une émulsion eau-gazole peut notamment être obtenue par l'adjonction au gazole de 13 à 15 % d'eau et de 2 à 3 % d'additifs organiques et pétroliers.

Son utilisation ne demande aucun investissement et permet de réduire la teneur en oxyde d'azote, de diminuer les particules et de réduire l'opacité des fumées.

La Régie autonome des transports parisiens (RATP) a utilisé ce carburant. Celui-ci n'est toutefois plus distribué.

Source : <http://www.transbus.org/dossiers/carburants.html>

3.10.5. Résumé des technologies

Le tableau synthétise divers critères d'appréciations, regroupés au sein de domaines financiers, environnementaux, technologiques et des facteurs de risques. Les appréciations sont portées sur une échelle de trois (négatif, neutre, positif), et ne sont pas agrégées ni pondérées. Certains critères peuvent être étroitement corrélés, tels la « fiabilité » avec l' « effet d'innovation ».

Appréciation		Thermique classique	Thermique Gaz	Hybride	Trolleybus	Bimode	Pile à combustible	Combustion d'hydrogène	Electrique biberonnage	Electrique à recharge préalable
+	Positif									
0	Neutre									
-	Négatif									
Critères économiques										
Coûts d'achats des véhicules		+	+	0	-	-	-	-	-	-
Coûts d'infrastructure		+	0	+	-	0	0	0	-	-
Coûts de maintenance		+	+	0	0	0	-	-	0	-
Coûts de l'énergie		-	-	0	+	0	-	-	+	+
Critères environnementaux										
Efficacité énergétique		-	-	0	+	0	-	-	+	+
Emissions de CO2		-	-	0	+	0	+	+	+	+
Polluants atmosphériques (NOx et part. fines)		-	-	0	+	0	+	0	+	+
Emissions sonores		-	0	0	+	0	+	-	+	+
Esthétisme		+	+	+	-	0	+	+	+	+
Réserves énergétiques limitées		-	0	-	+	-	+	+	+	+
Energie renouvelable		-	-	-	+	0	+	+	+	+
Elimination des composants		+	+	0	+	+	-	+	0	-
Critères technologiques										
Disponibilité des véhicules (18 m)		+	+	0	+	+	-	-	-	-
Fiabilité actuelle		+	0	0	+	0	-	-	-	-
Poids du véhicule		0	0	0	+	0	0	0	0	0
Durée de vie des véhicules		0	0	0	+	+	0	0	+	+
Durée de vie des éléments (batterie)		+	+	0	+	+	-	0	0	0
Souplesse du domaine d'utilisation		+	+	+	-	0	+	+	0	-
Autonomie d'utilisation		+	+	0	+	+	-	-	+	+
Critères de risques										
Sécurité d'approvisionnement en carburant		0	0	-	+	0	+	+	+	+
Risques d'augmentation de prix des ressources		-	-	-	0	-	0	0	0	0
Image technologique		-	0	+	-	-	+	+	+	0
Image écologique		-	0	0	+	0	+	+	+	+
Risque pour la sécurité		0	-	0	0	0	-	-	-	+
Risque de pollution en cas de problème		0	0	0	+	0	+	+	-	-
Risque d'abandon de la technologie		+	0	+	0	-	-	-	-	-

Pour chaque groupe de critères, un ou plusieurs types de véhicules se distinguent:

3.10.5.1 Critères économiques

Les **bus thermiques** ne nécessitent que peu d'infrastructures, et sont avantageux à l'achat. Seul le coût de l'énergie est plus élevé que celui d'autres modes utilisant notamment de l'électricité provenant du réseau de distribution.

3.10.5.2 Critères environnementaux

Trolleybus, bus à hydrogène et bus électriques n'offrent que peu d'inconvénients environnementaux. Leurs impacts sont globalement équivalents.

3.10.5.3 Critères technologiques

Les bus thermiques et trolleybus bénéficient d'une large expérience et peu de surprises attendent ses utilisateurs futurs. Les technologies plus récentes (hydrogène, bus électriques autonomes) laissent actuellement plus d'incertitudes.

3.10.5.4 Risques

Aucun type de bus ne se démarque au niveau du risque. Tous en présentent dans diverses catégories, notamment en termes d'approvisionnement énergétique, de sécurité et de pérennité de la technologie à l'avenir (risque d'investissements perdus).

4. Elaboration de scénarios pour l'Agglomération de Fribourg

4.1. Systèmes retenus

La sélection effectuée ici concerne la faisabilité technique d'une solution. Elle évince des solutions non-applicables ou non-adaptées au réseau urbain de Fribourg. Elle ne tient pas compte des aspects financiers et environnementaux de manière détaillée. Ceux-ci seront étudiés par l'élaboration d'un modèle (cf. § 4.4)

4.1.1. Bus thermiques conventionnels et dérivés (biocarburants, gaz, hybrides)

Les bus thermiques ne nécessitent pas d'infrastructure le long de leur parcours. Seule une station de réapprovisionnement est nécessaire avec le carburant concerné. Dans les cas d'utilisation de gaz volatiles, un dimensionnement spécifique (risque d'explosion) des dépôts, garages et ouvrages souterrains est toutefois nécessaire.

Les technologies de bus conventionnels permettent de conserver une flexibilité entre elles. Un parc hétéroclite dans ce groupe n'engendre que de légères baisses de synergies. Elles ne sont dans un premier temps traitées qu'en un seul ensemble. Des hypothèses concernant les bus hybrides ou les biocarburants par exemple peuvent être émises ultérieurement.

4.1.2. Trolleybus

Les trolleybus peuvent profiter d'infrastructures existantes de manière intégrale sur deux lignes. Leur maintien, ainsi que d'éventuelles prolongations du réseau permettraient de profiter d'investissements déjà réalisés.

4.1.3. Bus bimode

Les bus bimode circulent également sous des lignes de contact existantes, tout en pouvant s'en écarter si besoin. La technologie est reprise dans la suite de l'étude, car déjà présente dans l'agglomération de Fribourg. Elle fut choisie à l'époque de leur achat dans l'optique d'une transition vers l'électrification complète de la ligne 1.

4.1.4. Systèmes de biberonnage

Plusieurs lignes urbaines sont partiellement ou non électrifiées. Leur exploitation en mode intégralement électrique est envisageable, moyennant l'installation de stations de recharge ou de lignes de contact partielles, ainsi que de sous-stations. L'utilisation de lignes de contact partielles existantes est également une opportunité, de même que le remplacement de groupes moteurs autonomes par des batteries.

4.2. Systèmes non retenus :

4.2.1. Bus électriques à recharge préalable

Les bus électriques à recharge préalable n'offrent pas des autonomies permettant une utilisation durant une journée complète. La configuration des terminus de l'agglomération fribourgeoise, ainsi que les faibles temps de retournement n'autorisent pas le changement de batteries ou de remorques à batteries.






4.2.2. Bus à hydrogène (pile à combustible et à combustion interne d'hydrogène)

Les bus à hydrogène sont encore en phase expérimentale. Leur autonomie faible ne permet pas d'entrevoir une utilisation intensive au sein d'un réseau urbain dans les prochaines années. De plus, l'utilisation d'un combustible aussi réactif que l'hydrogène en milieu urbain implique l'acceptation d'un risque non négligeable. De nombreuses inconnues persistent quant à la durée de vie des piles à hydrogène.

4.3. Scénarios

Les scénarios sont des schémas d'évolution probable des technologies utilisées sur le réseau de l'agglomération de Fribourg. Au sein d'un scénario, chaque ligne se voit attribuer une technologie spécifique. Les scénarios visent une standardisation du matériel roulant.

Sur la base du matériel roulant retenu, cinq scénarios sont établis

	<p>Les véhicules en fin de vie sont remplacés systématiquement par des autobus diesel. Les lignes de contact et sous-stations sont abandonnées dès qu'une ligne de trolleybus n'est plus exploitée sous électricité. La ligne de contact doit toutefois être étendue temporairement entre Mont-Carmel et le nouveau garage-atelier de Givisiez, la fin de vie des trolleybus HESS étant prévue pour 2024 (cf. § 2.1).</p>
<p>Tout-diesel</p>	
	<p>Les lignes de trolleybus complètes (2 et 3) sont conservées et maintenues. Les lignes 1 et 5 sont électrifiées dès que possible.</p>
<p>Trolleybus</p>	
	<p>Les lignes de trolleybus complètes (2 et 3) sont conservées et maintenues. Les lignes de contact propres à la ligne 1 sont abandonnées à la fin de vie des bimodes.</p>
<p>Trolleybus</p>	
	<p>Les lignes 1 et 5 sont électrifiées par biberonnage dès que possible. Les lignes 2 et 3 suivent une fois les trolleybus arrivés en fin de vie.</p>
<p>Biberonnage</p>	
	<p>Le scénario « Bimode » est la continuation de l'exploitation actuelle, avec la ligne 1 électrifiée partiellement et les lignes 2 et 3 électrifiées de bout en bout.</p>
<p>Bus bimode</p>	

4.4. Modèle d'estimation des coûts et émissions par scénario

Un modèle permettant une évaluation des effets de chaque scénario est établi. Les coûts et les émissions de gaz sont représentés de manière simplifiée. Le but de ce modèle n'est pas d'établir une offre précise, mais de qualifier les différences d'un scénario à l'autre.

4.4.1. Hypothèses de base

Au niveau des prestations fournies, le modèle reprend les kilomètres effectués avec l'application progressive du PA2 Fribourg (cf §.2.2)

Les différentes étapes sont agendées par année.

Infrastructures	Année
« Poya »	2015
« Cormanon I »	2016
« Givisiez »	2018

4.4.2. Achat de véhicules

Lors d'un changement de type de véhicules sur une ligne, l'acquisition de bus disposant d'une technologie nouvelle ou en expansion intervient une fois les anciens véhicules amortis.

Deux achats groupés interviennent : le remplacement des bus bimode vers 2018, accompagné d'un renouvellement sensible du parc diesel (ligne 1 et ligne 5) et le remplacement des trolleybus vers 2025 (lignes 2 et 3).

L'achat de bus thermiques vient, dans le modèle, de manière échelonnée afin de combler les carences restantes. Ce mode étant très répandu, des commandes « peu-groupées » auront un impact moins marqué sur le prix de revient.

4.4.3. Infrastructures d'alimentation en énergie et liées au mode

Une infrastructure est déterminée comme nécessaire du début de l'utilisation d'une technologie à la fin. Pour chaque mode sur chaque ligne, on définit les besoins en infrastructures.

4.4.4. Calcul des coûts

Des coûts indicatifs d'exploitation sont fournis. Ils reprennent les points directement attribuables aux modes : amortissement du véhicule, de l'infrastructure dépendante et coût de l'énergie. Ces coûts ne représentent qu'une part du coût final. Certains coûts peuvent être surestimés (amortissements notamment). Il s'agit d'une base comparative, les coûts non-représentés n'étant que faiblement corrélés au mode.

Les coûts repris sont :

L'amortissement des véhicules : Le prix d'achat des véhicules est répercuté chaque année en prenant la valeur du parc existant divisé par sa durée d'amortissement comptable. Un ancien véhicule est remplacé une fois son amortissement réalisé.

Type de véhicule	Prix d'achat	Durée d'amortissement
Autobus 9 m	350 000 CHF	12 ans
Autobus 12 m	475 000 CHF	12 ans
Autobus 18 m	600 000 CHF	12 ans
Trolleybus	1 300 000 CHF	15 ans
Bus électrique autonome	1 500 000 CHF	13 ans ¹
Bus bimode	1 400 000 CHF	15 ans

¹Le bus et ses batteries ne sont pas amortis sur la même durée. Une durée de 13 ans est une approximation raisonnable à ce niveau.

L'amortissement des infrastructures : Les infrastructures sont considérées durant toute leur existence à leur prix d'achat, divisé par la durée d'amortissement. Aucune échéance n'est fixée, ceci permettant de renouveler dans les infrastructures en fin de durée de vie. Les durées d'amortissement comptables sont prises en considération.

Les pompes à essence sont considérées comme existantes quel que soit le scénario, et non reprises au niveau des coûts.

Les prix d'achats sont :

Infrastructure	Prix d'achat	Durée d'amortissement
Trolleybus : sous-station	970 000 CHF	33 ans
Trolleybus, 1 km ligne de contact	1 125 000 CHF	33 ans
Trolleybus, entretien / km / an	15 000 CHF	
Trolleybus, 1 branchement	75 000 CHF	33 ans
Trolleybus, équipement dépôt	2 400 000 CHF	33 ans
Electrique, 1 station « flash »	195 000 CHF	33 ans
Electrique, 1 station « terminus »	290 000 CHF	33 ans
Electrique, équipement dépôt	220 000 CHF	33 ans
Bimode, 1 « guide-perche »	20 000 CHF	33 ans

Consommation d'énergie : Une ligne est toujours considérée comme exploitée avec un seul mode. Les proportions de traction diesel et électrique sont incorporées dans le cas de bus bimode. Les consommations moyennes observées à Fribourg sont appliquées. Les bus

électriques affichent une consommation identique aux trolleybus. La consommation des véhicules par type reprend la moyenne effective par kilomètre observée sur l'ensemble du parc en 2010.

Les taux budgétés en 2012 sont repris pour l'énergie électrique et le diesel. La ristourne sur le carburant s'élève à 0.59 CHF/l pour du diesel (valeur 2012). Celui-ci voit son prix par litre augmenter de 5.0 ct chaque an. L'électricité est également augmentée de manière corrélée avec un renchérissement de 0.7 ct par kWh par an.

Electricité	0.15 CHF/KWh+ 0.7ct /an (dès 2014)
Diesel y. c. ristourne	1.12 CHF/l + 5.0 ct //an (dès 2014)

Les coûts suivants ne sont pas représentés dans le modèle :

Entretien et réparations : une part des technologies étudiées n'a pas encore été expérimentée. Il n'est pour l'heure pas possible de quantifier la fiabilité des nouveaux modes.

Frais de personnel, réseau de vente, gestion du réseau, frais administratifs, assurances, impôts, TVA : ces frais ne dépendent pas de la technologie choisie. Leurs impacts se situent bien en deçà des marges d'erreur des autres paramètres composant l'estimation des coûts.

Bâtiments, gares, équipements d'accueil et d'arrêts : quelle que soit la technologie choisie, l'ensemble de ces infrastructures ne subit pas de changement. Les adaptations liées à une technique spécifique lui sont imputées via les infrastructures d'alimentations en énergie et liées au mode.

Recettes en tous genres (hors ristourne carburants) : les recettes ne varieront que de manière faiblement corrélée au mode de traction présent. La corrélation sera majoritairement liée aux modifications de l'offre et à la qualité du service en général.

Renchérissement : tous les coûts sont indiqués pour une valeur 2013.

4.4.5. Calculs d'émissions

Pour chaque mode et chaque type de véhicule, on détermine les émissions des principaux polluants et leur évolution dans le temps.

Les émissions issues de la combustion de diesel sont calculées sur la base des valeurs de la norme Euro. Celle-ci ne permet pas une représentation réaliste des émissions, mais offre une base de comparaison. Par simplification, on considérera que les bus thermiques existants en 2012 répondent tous aux valeurs de la norme Euro IV, en application dès le 1^{er} octobre 2006. Les bus bimode, datant de 2002, répondront en mode diesel à la norme Euro III, en application depuis 2001. Tout nouveau bus thermique sera considéré comme répondant à la norme Euro VI, valable dès fin 2013.

La norme Euro caractérise les émissions d'oxydes d'azote NO_x, de monoxyde de carbone CO, d'hydrocarbures HC et de particules fines

Selon la Direction générale des Infrastructures, des Transports et de la Mer (France), les valeurs des normes Euro se situent comme suit :

	Valable dès	NO _x (g/kWh)	CO (g/kWh)	HC (g/kWh)	Particules (g/kWh)
Euro 0	01.10.1990	14.4	11.2	2.4	-
Euro I	01.10.1993	9	4.9	1.23	0.36
Euro II	01.10.1996	7	4	1.1	0.15
Euro III	01.10.2001	5	2.1	0.66	0.13
Euro IV	01.10.2006	3.5	1.5	0.46	0.02
Euro V	01.10.2009	2	1.5	0.46	0.02
Euro VI	31.12.2013	0.4	1.5	0.13	0.01

Il est considéré que les bus électriques, trolleybus et bus bimode en traction autonome ne génèrent ni NO_x, ni CO, ni HC, ni de particules fines.

Les émissions de CO₂ sont pour leur part définies au niveau de l'énergie primaire par la norme SIA 2031 (Certificat énergétique des bâtiments). La production de CO₂ liée à la combustion de carburant est peu dépendante du mode d'utilisation. L'application de ces valeurs au transport offre une base de comparaison unique et cohérente, cette norme comprenant le mazout (diesel) et l'électricité.

	CO ₂ (g/kWh)
Electricité (mix suisse)	0.15
Electricité (hydraulique)	0.01
Mazout	0.30
Gaz	0.24

L'électricité utilisée en 2012 sur le réseau est d'origine mixte. Si à l'avenir, il n'est pas exclu qu'une contribution spécifique en faveur de l'électricité d'origine hydraulique soit menée, l'électricité restera globalement produite de manière similaire. A l'inverse, il est probable que l'électricité suisse soit à l'origine de plus en plus de gaz à effet de serre. La politique énergétique étant encore non-définie pour les prochaines années, il n'est pas possible de prévoir une évolution des émissions liées. Les émissions d'électricité d'origine mixte sont retenues à valeur fixe.

Le nombre de kWh nécessaires est obtenu par conversion du nombre de litres de diesel découlant de la consommation déterminée pour l'établissement des coûts. Une valeur de 9.99 kWh/l de diesel est retenue. (Source : conversion de données OFEN)

4.4.6. Hypothèses diverses

4.4.6.1 Accès au dépôt de Givisiez

Les scénarios conservant les lignes 2 et 3 en mode trolleybus viennent à poser la question de l'électrification du tronçon entre Givisiez, Mont-Carmel, la gare de Givisiez et le nouveau dépôt de Givisiez. Trois options sont envisageables:

- L'exploitation en mode autonome (diesel) de trolleybus sur l'ensemble de ces tronçons
- L'électrification du tronçon Givisiez gare – Mont-Carmel
- L'électrification de l'ensemble des tronçons

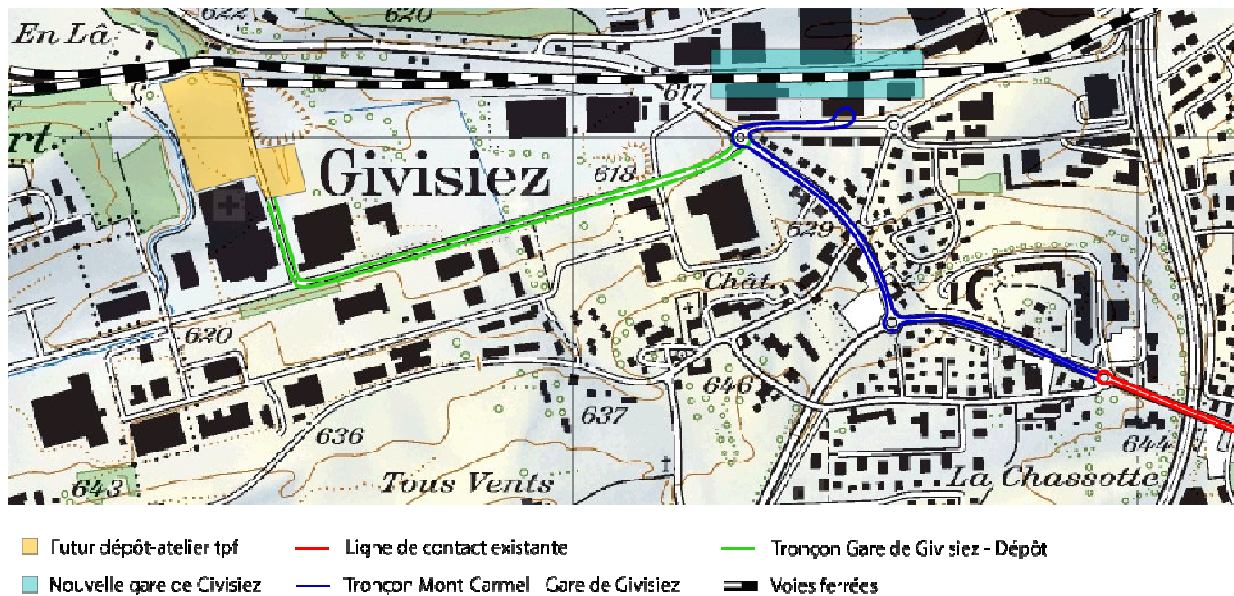


Figure 10: Tronçons à électrifier entre Mont-Carmel, la gare de Givisiez et le dépôt de Givisiez

Par extension, il doit être possible de rejoindre les lignes exploitées par un système de biberonnage depuis le dépôt sans recharge intermédiaire. L'utilisation d'éventuelles lignes de contact partielles est une option.

Les trolleybus n'étant pas adaptés pour être utilisés de manière prolongée en mode autonome, l'électrification du tronçon Mont-Carmel – Gare de Givisiez est indiscutable, d'autant plus que la ligne traverse des zones habitées avec une cadence élevée.

Le tronçon entre la gare de Givisiez et le nouveau dépôt-atelier est également à électrifier, car la longueur est importante. L'important flux de véhicules à engager sur les lignes 2 et 3 ralentirait le trafic de manière excessive. Là aussi, les riverains auraient à supporter des nuisances.






4.5. Résultats globaux

4.5.1. Evolution du réseau par scénario

Dans tous les cas, de 2013 jusqu'aux changements de technologie éventuels, les lignes sont exploitées comme suit :

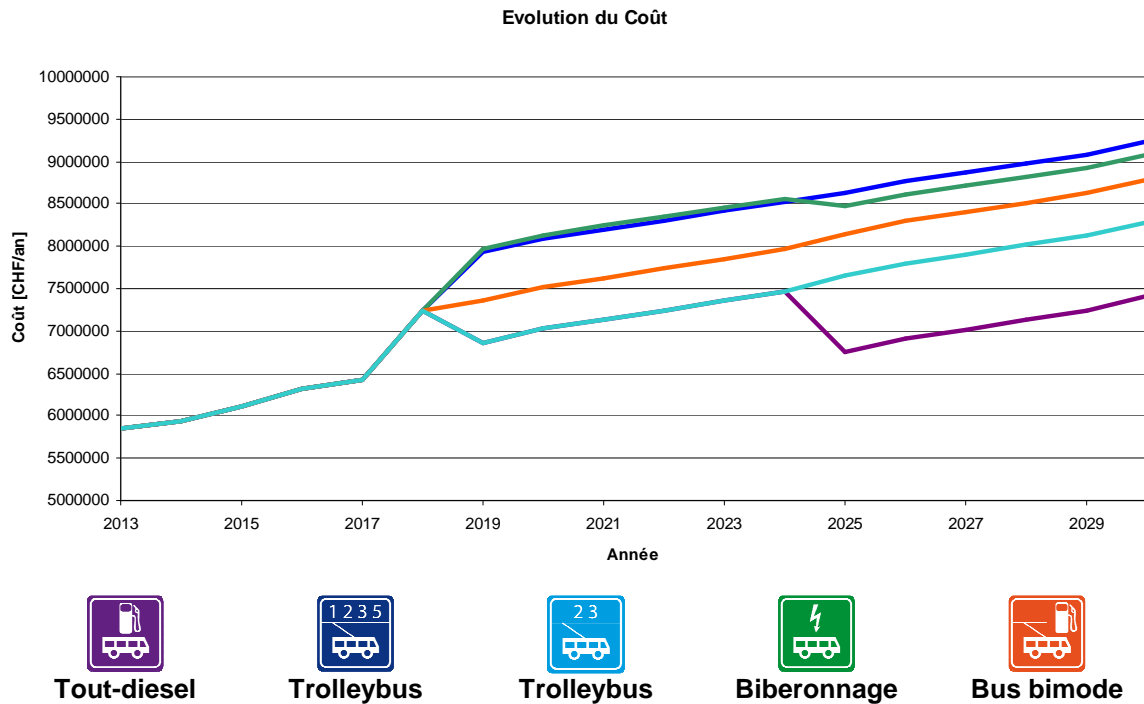
Ligne 1	Electrifiée partiellement (bimode)
Lignes 2 et 3	Electrifiées (trolleybus)
Lignes 4 à 7 et 10	Non électrifiées (thermique classique)

Ensuite, chaque scénario suit une évolution propre :

 Tout-diesel	<p>En 2019, abandon du bus bimode sur la ligne 1 au profit du diesel En 2025, abandon du trolleybus sur les lignes 2 et 3 au profit du diesel</p>
 Trolleybus	<p>En 2019, passage au mode trolleybus sur les lignes 1 et 5 Renouvellement des trolleybus en 2025 sur les lignes 2 et 3</p>
 Trolleybus	<p>En 2019, abandon du bus bimode sur la ligne 1 profit du diesel Renouvellement des trolleybus en 2025 sur les lignes 2 et 3</p>
 Biberonnage	<p>En 2019, passage au mode électrique autonome sur les lignes 1 et 5 En 2025, abandon du trolleybus sur les lignes 2 et 3 au profit du bus électrique autonome</p>
 Bus bimode	<p>Aucune modification par rapport à la situation 2012</p>

4.5.2. Evolution du coût des véhicules, de l'infrastructure et de l'énergie

Dans l'ensemble des graphiques suivants, les courbes représentent chacune le scénario de couleur correspondante.



Note : le minimum de l'ordonnée du graphique n'est pas calé à zéro.

Ce graphique ne représente que la part technique des coûts, soit les véhicules, l'énergie et les infrastructures nécessaires.

Jusqu'en 2018, le réseau est exploité de manière identique quelle que soit l'orientation choisie.

Dès 2019, la technologie des lignes 1 et 5 passe au nouveau mode.

En 2025, dans le scénario « Tout-diesel », les lignes de contact des lignes 2 et 3 sont démontées.

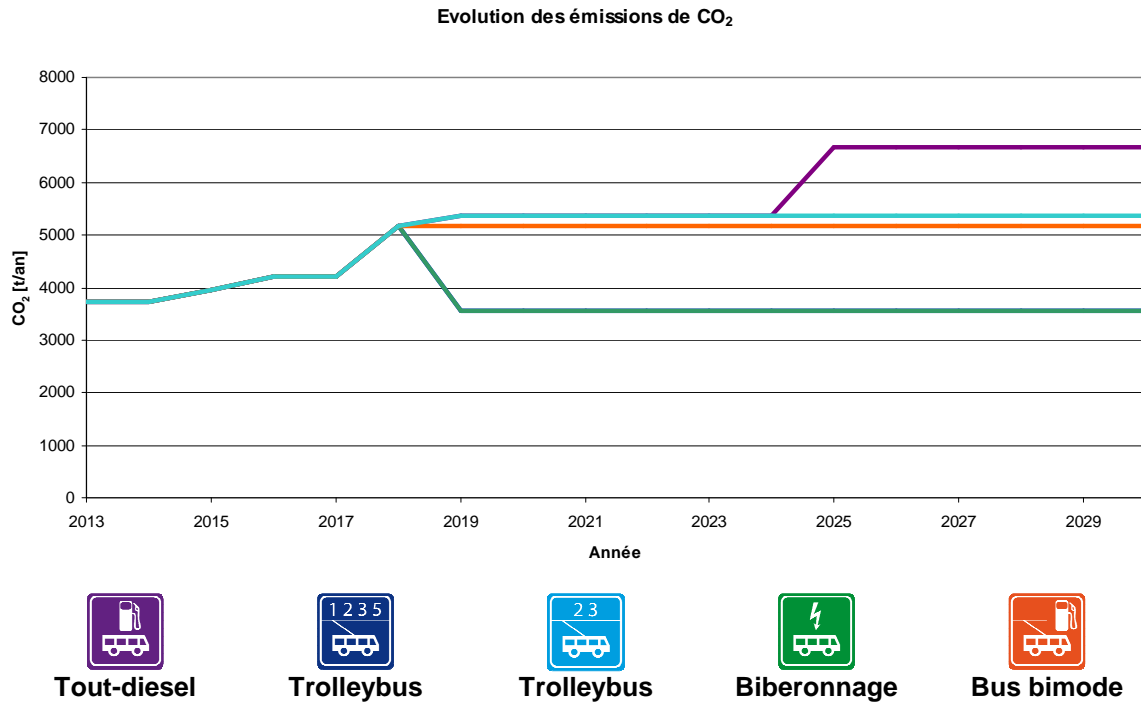
Dès 2025, les bus électriques autonomes apparaissent comme étant moins chers, du fait de l'abandon des installations fixes trolleybus.

L'électrification des lignes 1 et 5 coûte en moyenne 500'000 CHF de plus par an (soit moins de 2% des coûts totaux actuels du réseau urbain), en comparaison à la situation actuellement en place. Les gains en termes de bruit et d'environnement sont majeurs. La différence entre électrification « trolleybus » et électrification « biberonnage » est insignifiante. De nombreuses incertitudes sur les prix à l'avenir ne permettent pas de favoriser l'un plus que l'autre.

Le remplacement de bus bimode sur la ligne 1 par des bus thermiques classiques permettrait de dégager une économie d'environ 500'000 CHF chaque an.

Le diesel est nettement le mode le plus économique. Cette différence s'atténuera probablement, l'augmentation du prix du carburant étant probablement plus forte que celle du courant électrique. Le mode thermique classique se heurte aussi à un problème d'acceptabilité, d'autant plus marqué sur les lignes déjà équipées. La réduction de nuisances compense largement l'effort financier apporté.

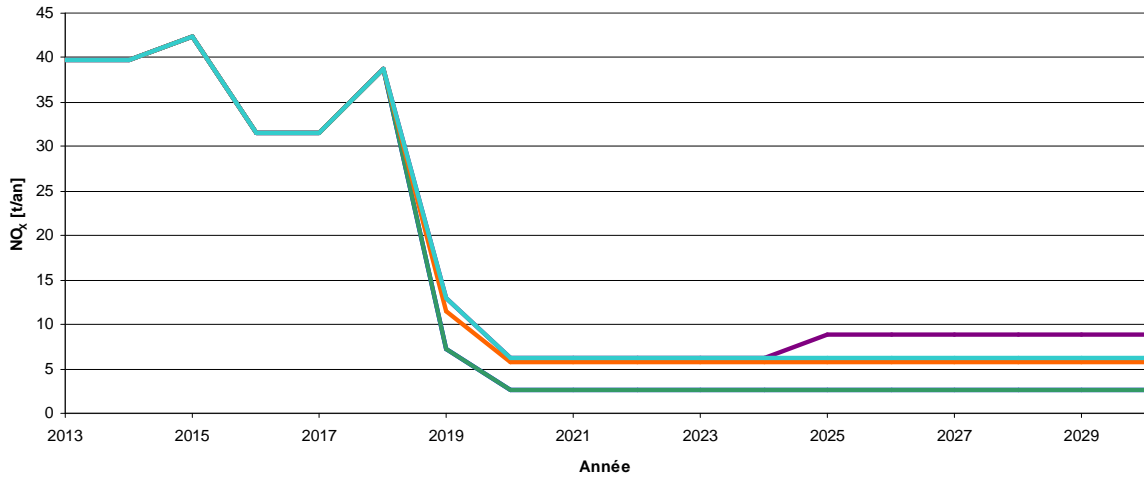
4.5.3. Evolution des émissions de polluants



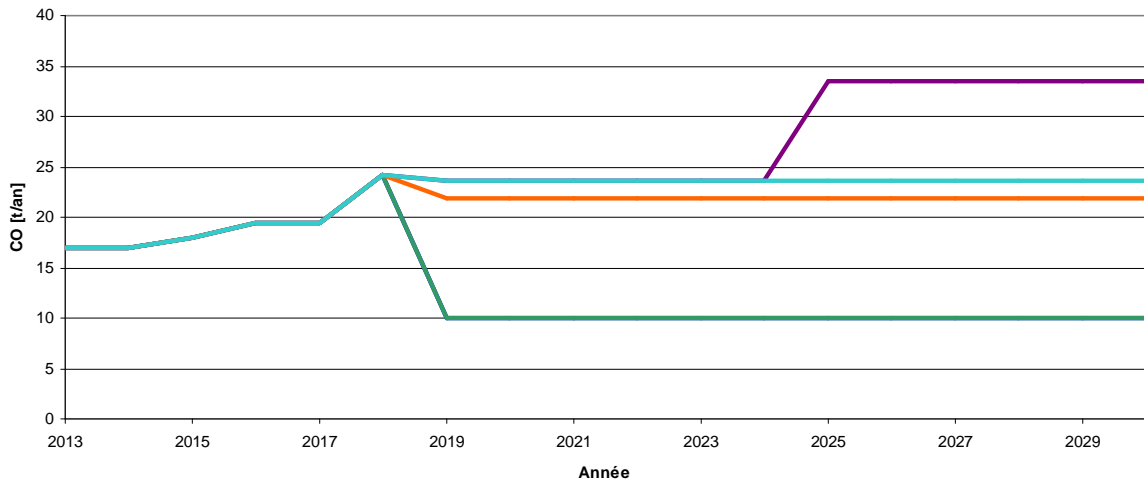
Note : Bus électriques à biberonnage et trolleybus sont aux mêmes niveaux d'émission. Tous deux sont représentés par la courbe verte.

L'introduction de bus électriques sur les lignes 1 et 5 permet de maintenir les émissions de CO₂ en deçà de leur niveau actuel. Le maintien de la technologie bimode mène à une différence insignifiante au niveau des émissions vis-à-vis d'une exploitation entièrement effectuée en diesel. L'écart visible entre le « tout-diesel » et le « bimode » dès 2025 est dû à l'abandon du trolleybus dans la première variante. En ne remplaçant que les bus bimode par des bus conventionnels, la différence d'émissions de CO₂ est mineure.

Evolution des émissions de NO_x



Evolution des émissions de CO

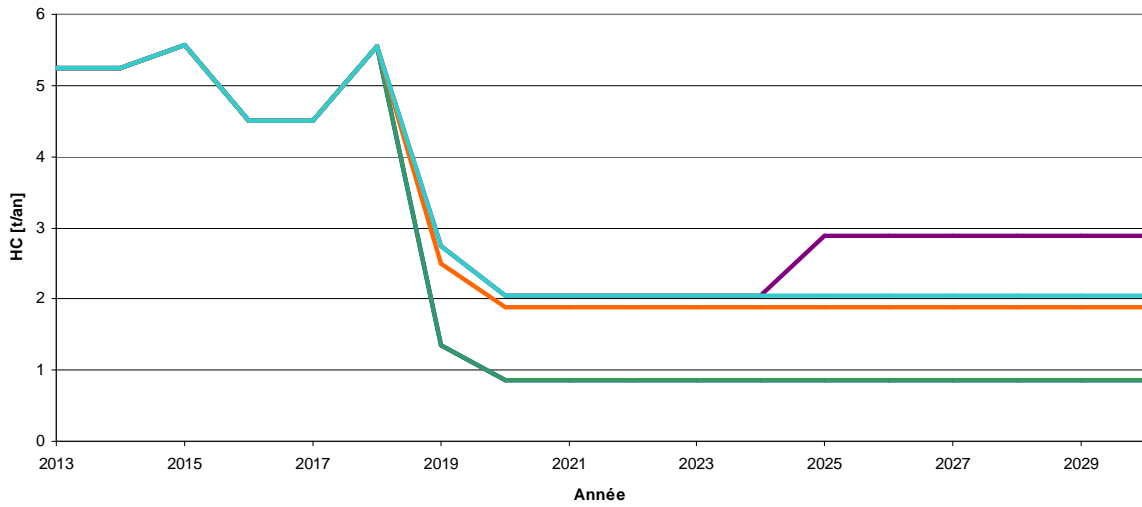


- 
Tout-diesel
- 
Trolleybus
- 
Trolleybus
- 
Biberonnage
- 
Bus bimode

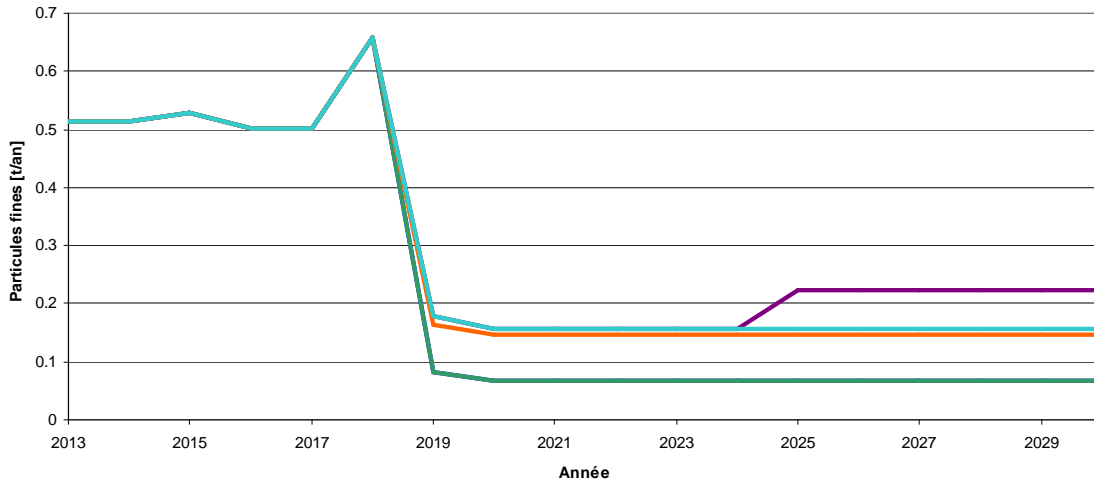
Note : Bus électriques à biberonnage et trolleybus sont aux mêmes niveaux d'émission. Tous deux sont représentés par la courbe verte.

L'introduction de bus hybrides en place de bus thermiques classiques permettrait de réduire sensiblement les émissions de CO.

Evolution des émissions de HC



Evolution des émissions de Particules fines



Tout-diesel



Trolleybus



Trolleybus



Biberonnage



Bus bimode

Note : Bus électriques à biberonnage et trolleybus sont aux mêmes niveaux d'émission. Tous deux sont représentés par la courbe verte.

Plusieurs effets sont observables :

En 2015, une augmentation des émissions est due à un saut dans l'offre

Jusqu'en 2018, une baisse progressive est liée au remplacement d'anciens bus par des véhicules Euro VI.

En 2018, un nouveau saut dans l'offre est à l'origine d'un pic d'émissions.

Ensuite, le remplacement des bus bimodes et du gros du parc thermique par des véhicules de dernière technologie amènent la plupart des valeurs à leur minimum en 2020.

En 2025, le scénario « tout-diesel » voit un saut, dû au remplacement de trolleybus par des véhicules thermiques.

Les émissions de polluants nocifs sont en moyenne divisées par 2 par l'introduction de bus électriques sur les lignes 1 et 5.

4.6. Emissions sonores

L'étude des impacts sonores d'un changement de mode est plus difficilement modélisable que les coûts ou émissions de gaz qui en découlent. Une approche qualitative est ici privilégiée, tentant de mettre en évidence les zones où un bus électrique apporterait une amélioration significative, ou au contraire, où le remplacement par des bus diesels aurait un impact fort. Il ne s'agit pas d'une comparaison par scénarios.










L'Office fédéral de l'environnement OFEV publie des cartes de nuisances sonores routières, comprenant des indicateurs pour la journée et pour la nuit.

Le tracé de chaque ligne est identifié séparément. Des bus circulant dans des zones à fortes nuisances auront un impact proportionnellement plus faible que des bus circulant dans des zones calmes. Dans chaque cas, une appréciation est attribuée en regard de la fréquence des bus (élevée, modérée, faible), du caractère sonore de zone traversé (bruyant, modéré, calme) et du type de zone (habitation dense, habitation dispersée). Les notes obtenues permettent l'obtention d'une proposition de priorisation des potentielles nouvelles infrastructures électriques.

Indicateurs

Fréquence des bus	Elevée (10' et moins)	++
	Modérée (15')	+
	Faible (30')	0
Caractère sonore Selon carte OFEV	Calme (< 45 dB)	++
	Modéré (45 – 55 dB)	+
	Bruyant (>55 dB)	0
Type de zone habitat (Appréciation qualitative)	Dense	++
	Dispersé	+

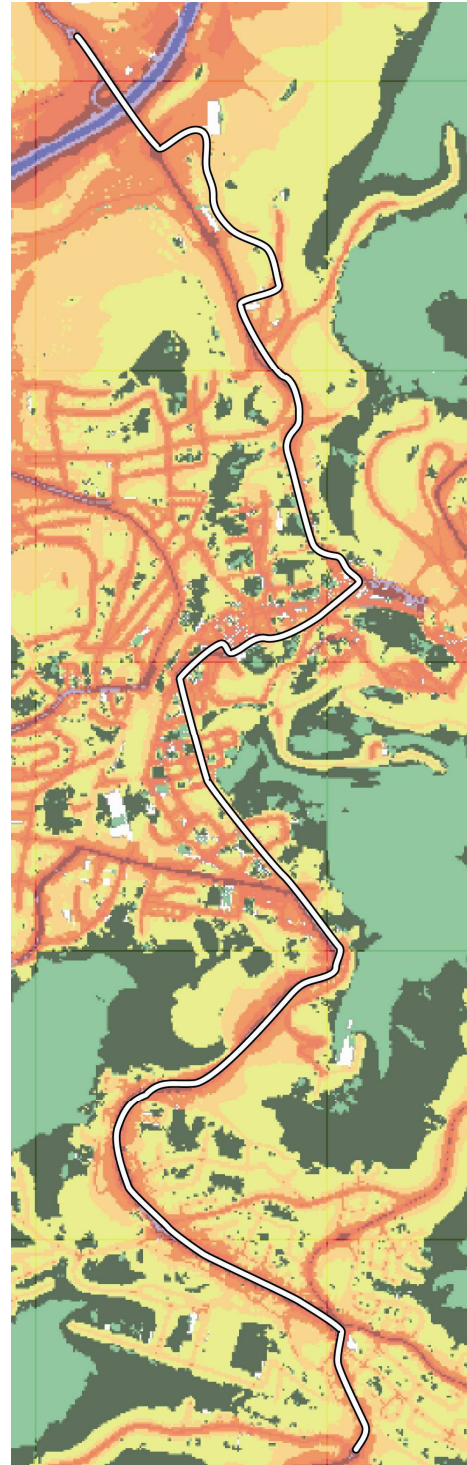
L'ensemble des cartes représentées ci-dessous provient du site <http://map.bafu.ch>. Sur chacune d'entre elles, la ligne concernée est représentée. Les couleurs représentent les niveaux d'émissions sonores liées au trafic routier selon la table ci-contre.

	<40 dB
	40-44.9 dB
	45-49.9 dB
	50-54.9 dB
	55-59.9 dB
	60-64.9 dB
	65-69.9 dB
	70-74.9 dB
	>=75 dB

4.6.1. Ligne 1

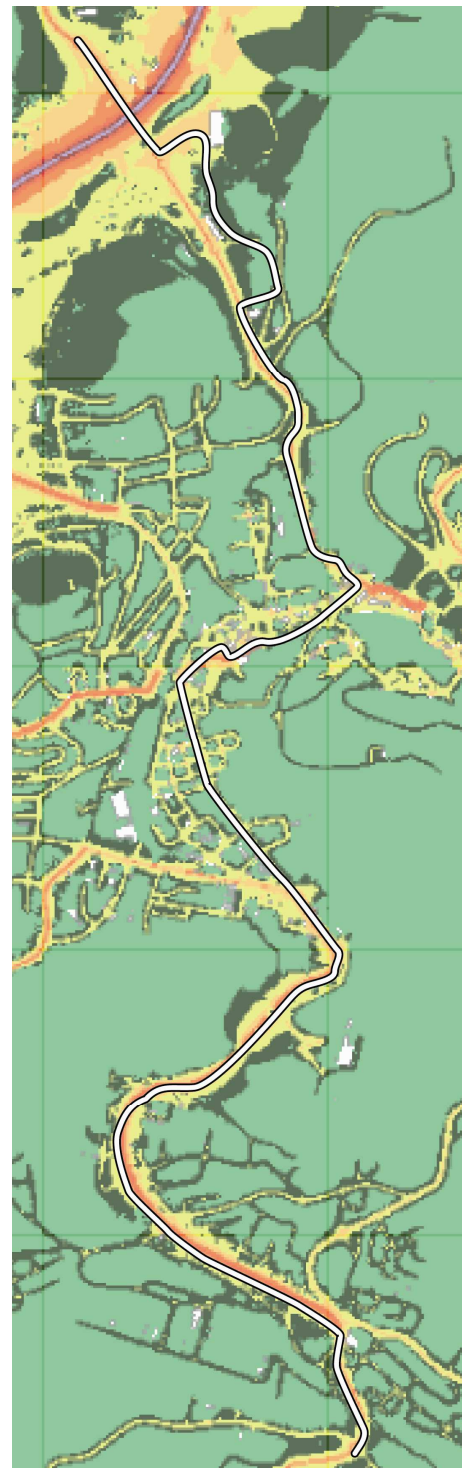
Portes-de-Fribourg Poya	-	Journée	
Fréquence des bus	Elevée	++	
Caractère sonore	Modéré	+	
Type de zone habitat	Dispersé	+	
Impact des bus	4	++++	
		Soirée	
Fréquence des bus	Modérée	+	
Caractère sonore	Calme	++	
Type de zone habitat	Dispersé	+	
Impact des bus	4	++++	

Poya - Pérolles		Journée	
Fréquence des bus	Elevée	++	
Caractère sonore	Bruyant	0	
Type de zone habitat	Dense	++	
Impact des bus	4	++++	
		Soirée	
Fréquence des bus	Modéré	+	
Caractère sonore	Modéré	+	
Type de zone habitat	Dense	++	
Impact des bus	4	++++	



Nuisances sonores le long de la ligne 1, jour

Pérolles - Marly	Journée	
Fréquence des bus	Elevée	++
Caractère sonore	Bruyant	0
Type de zone habitat	Dispersé	+
Impact des bus	3	+++
	Soirée	
Fréquence des bus	Modérée	+
Caractère sonore	Bruyant	0
Type de zone habitat	Dispersé	+
Impact des bus	2	++



Nuisances sonores le long de la ligne 1, nuit

4.6.2. Ligne 2



Nuisances sonores le long de la ligne 2, jour



Nuisances sonores le long de la ligne 2, nuit

Les Dailles - Moncor	Journée		Soirée	
	Fréquence des bus	Elevée	++	Modérée
Caractère sonore	Bruyant	0	Calme	++
Type de zone habitat	Dense	++	Dense	++
Impact des bus	4	++++	5	+++++

Moncor – St-Barthélémy	Journée		Soirée	
	Fréquence des bus	Elevée	++	Modérée
Caractère sonore	Bruyant	0	Bruyant	0
Type de zone habitat	Dense	++	Dense	++
Impact des bus	4	++++	3	+++

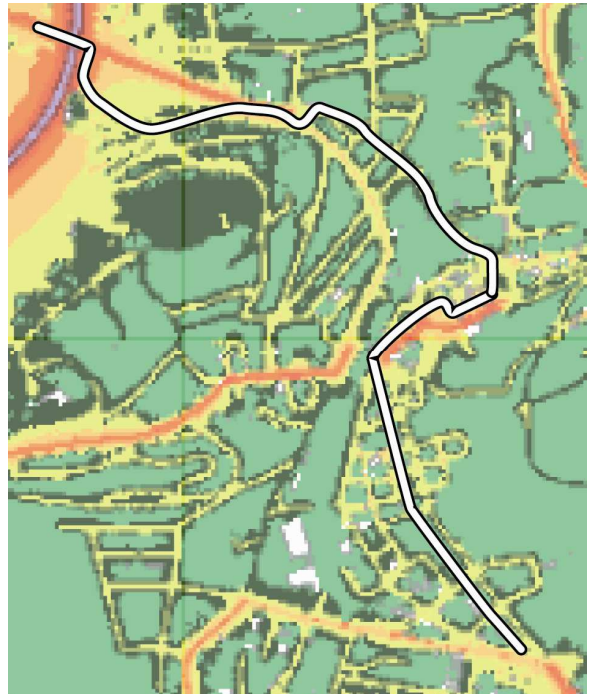
St-Barthélémy Schoenberg	Journée		Soirée	
	Fréquence des bus	Elevée	++	Modérée
Caractère sonore	Bruyant	0	Calme	++
Type de zone habitat	Dense	++	Dense	++
Impact des bus	4	++++	5	+++++

4.6.3. Ligne 3

Jura - Vuille	Journée	
Fréquence des bus	Modérée	+
Caractère sonore	Bruyant	0
Type de zone habitat	Dispersé	+
Impact des bus	2	++
	Soirée	
Fréquence des bus	Modérée	+
Caractère sonore	Modéré	+
Type de zone habitat	Dispersé	+
Impact des bus	3	+++

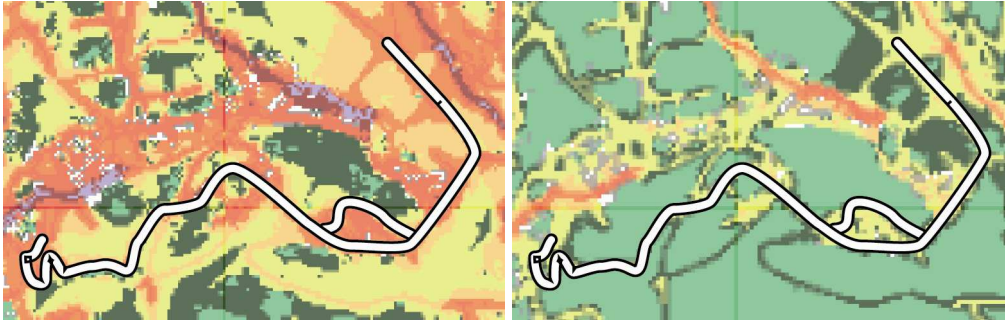


Vuille - Pérolles	Journée	
Fréquence des bus	Modérée	+
Caractère sonore	Bruyant	0
Type de zone habitat	Dense	++
Impact des bus	3	+++
	Soirée*	
Fréquence des bus	Modérée	+
Caractère sonore	Modéré	+
Type de zone habitat	Dense	++
Impact des bus	3	+++



* En soirée, ne circule qu'entre Jura et Gare.

4.6.4. Ligne 4

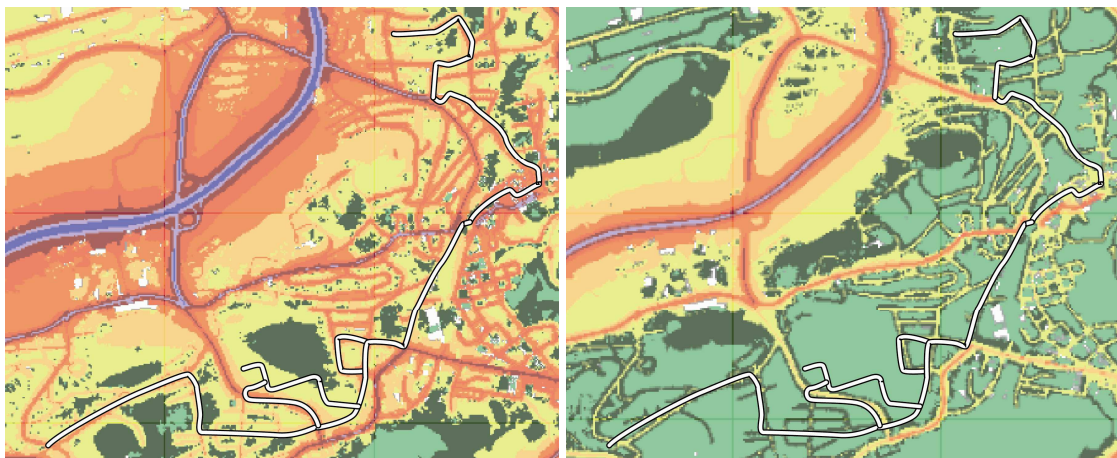


Nuisances sonores le long de la ligne 4, jour

Nuisances sonores le long de la ligne 4, nuit

Gare - Auge	Journée		Soirée	
	Fréquence des bus	Modérée	+	Faible
Caractère sonore	Bruyant	0	Calme	++
Type de zone habitat	Dense	++	Dense	++
Impact des bus	3	+++	4	++++

4.6.5. Ligne 5



Nuisances sonores le long de la ligne 5, jour

Nuisances sonores le long de la ligne 5, nuit

Torry – Ste-Thérèse	Journée		Soirée	
Fréquence des bus	Elevée	++	Modérée	+
Caractère sonore	Bruyant	0	Calme	++
Type de zone habitat	Dense	++	Dense	++
Impact des bus	4	++++	5	+++++

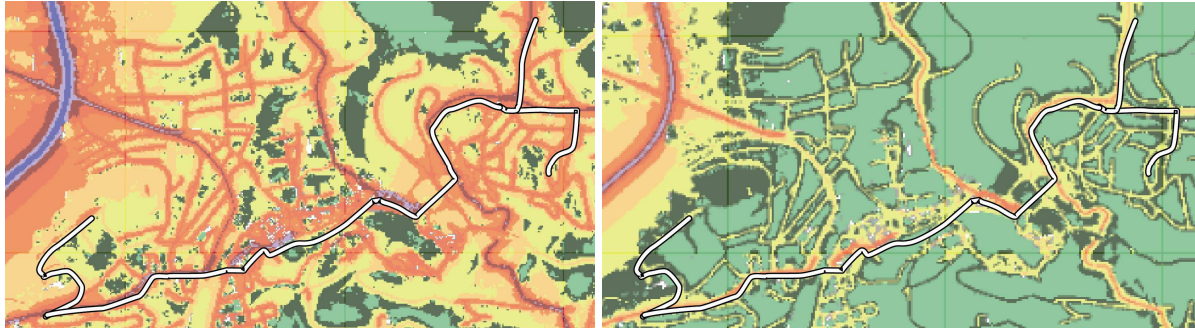
Ste-Thérèse Champriond	Journée		Soirée	
Fréquence des bus	Elevée	++	Modérée	+
Caractère sonore	Bruyant	0	Modéré	+
Type de zone habitat	Dense	++	Dense	++
Impact des bus	4	++++	4	++++

Champriond - Nuithonie	Journée		Soirée*	
Fréquence des bus	Modérée	+	Modérée	+
Caractère sonore	Modéré	0	Calme	++
Type de zone habitat	Dense	++	Dense	++
Impact des bus	3	+++	5	+++++

Champriond – Villars- Sud	Journée		Soirée*	
Fréquence des bus	Modérée	+	Modérée	+
Caractère sonore	Bruyant	0	Calme	++
Type de zone habitat	Dispersé	+	Dispersé	+
Impact des bus	2	++	4	++++

En soirée, combinaison des branches Nuithonie et Villars-Sud

4.6.6. Ligne 6



Nuisances sonores le long de la ligne 6, jour

Nuisances sonores le long de la ligne 6, nuit

Guintzet - Bertigny	Journée		Soirée	
	Fréquence des bus	Modérée	+	Pas de service
Caractère sonore	Modéré	+		
Type de zone habitat	Dense*	++		
Impact des bus	4	++++		

* Zone considéré dense en raison de la sensibilité de l'hôpital cantonal

Bertigny – St-Barthélémy	Journée		Soirée*	
	Fréquence des bus	Modérée	+	Faible
Caractère sonore	Bruyant	0	Bruyant	0
Type de zone habitat	Dense	++	Dense	++
Impact des bus	3	+++	2	++

*En soirée, service Gare – Musy uniquement

St-Barthélémy - Musy	Journée		Soirée	
	Fréquence des bus	Modérée	+	Faible
Caractère sonore	Bruyant	0	Calme	++
Type de zone habitat	Dense	++	Dense	++
Impact des bus	3	+++	4	++++

4.6.7. Ligne 7

Gare - Pérolles	Journée		Soirée	
	Fréquence des bus	Faible	0	Faible
Caractère sonore	Bruyant	0	Modéré	+
Type de zone habitat	Dense	++	Dense	++
Impact des bus	2	++	3	+++



Nuisances sonores le long de la ligne 7, jour

Pérolles - Cliniques	Journée		Soirée	
	Fréquence des bus	Faible	0	Faible
Caractère sonore	Bruyant	0	Calme	++
Type de zone habitat	Dispersé	+	Dispersé	+
Impact des bus	1	+	3	+++



Nuisances sonores le long de la ligne 7, nuit

4.6.8. Résumé

Une appréciation est obtenue pour chaque ligne par la moyenne arithmétique des valeurs « impact des bus ». Cette valeur est un indicateur qualitatif de l'importance des nuisances liées aux bus.

Ligne	1	2	3	4	5	6	7
Appréciation	3.5	4.2	2.8	3.5	3.9	3.2	2.3

L'impact sonore des bus est significatif sur la plupart des lignes de l'agglomération. La ligne la plus sensible, en raison de ses fortes densités d'habitations ainsi que des hautes fréquences qui la caractérisent est la ligne 2. Celle-ci est déjà électrifiée et serait celle qui causerait probablement le plus de désagréments si elle venait à être remplacée par des bus diesel.

La ligne 1, partiellement électrifiée, n'obtient une grande nécessité de véhicules silencieux que sur la partie Nord de son trajet (Poya – Forum), où les bus ne s'inscrivent pas dans des flux de trafic importants, alors que la cadence reste élevée. Toutefois, une prolongation intégrale de la ligne de contact est souhaitable, en raison des inconvénients de la technologie bimode (Cf. §3.5)

La ligne 3 est aujourd'hui intégralement électrifiée, principalement pour des raisons d'exploitation. Toutefois, des augmentations de cadence, ainsi que le prolongement en direction de Givisiez maintiennent la valorisation des lignes de contact. De plus, le déplacement du centre d'entretien des bus Tpf à Givisiez également confirme la nécessité d'électrifier le tronçon supplémentaire.






La ligne 4, franchissant régulièrement un quartier plutôt calme, voit un impact non négligeable des bus diesels. Toutefois, les caractéristiques de la ligne permettent moins d'entrevoir une alternative raisonnable aux actuels midibus thermiques.

La ligne 5 franchit de nombreux quartiers d'habitations denses avec des fréquences modérées à élevées. Aujourd'hui non-électrifiée, il s'agit pourtant de la seconde ligne la plus incommodée par les bruits des bus.

Les lignes 6 et 7 sont à l'instant moins nécessiteuses de véhicules silencieux. Toutefois, l'évolution du réseau, notamment par l'extension de la 7 en direction de Beaumont et Moncor via les Daillettes et son passage à une cadence de 15 minutes, augmentera la sensibilité des riverains au bruit de cette ligne. D'autre part, la ligne 6 partage sur un long trajet son parcours avec la ligne 2. De courtes extensions du réseau électrifié permettrait de faire bénéficier de cette technologie à cette ligne également.

Pour les raisons ci-dessus, les scénarios remplaçant des lignes électriques par du diesel obtiennent une appréciation négative, ceux maintenant les lignes intégrales actuelles une appréciation neutre, et ceux proposant une extension aux lignes 1 et 5 une appréciation positive.

4.7. Représentation synthétiques des avantages et inconvénients des scénarios

Scénario		Tout-diesel	Trolleybus	Trolleybus	Biberonnage	Bus bimode
Appréciation						
+	Positif					
0	Neutre					
-	Négatif					
Coûts						
Moyenne / an		+	-	+	-	0
Sensibilité au prix de l'énergie		-	0	-	0	-
Sensibilité au prix du véhicule		+	0	0	0	0
Emissions						
Dioxyde de carbone CO ₂		-	0	-	0	-
Oxydes d'azote NO _x		-	+	0	+	0
Monoxyde de carbone CO		-	+	0	+	0
Hydrocarbures HC		-	+	0	+	0
Particules fines		-	+	0	+	0
Facteurs qualitatifs						
Bruit		-	+	0	+	0
Innovation		0	0	0	+	0
Image écologique		-	+	0	+	-
Aspect visuel		+	-	0	+	0
Confort		0	+	0	+	0
Flexibilité		+	-	0	+	+
Retour d'expérience		+	+	+	-	0

5. Récapitulation et recommandations

5.1. Récapitulatif des scénarios

La variante tout-diesel est plus avantageuse que l'ensemble des autres. Elle impliquerait toutefois une forte réticence des riverains des lignes, en raison notamment du bruit et de la sensibilisation globale aux problèmes environnementaux.

Le trolleybus répond à ces critiques, mais nécessite un engagement financier. L'implantation de lignes aériennes est souvent jugé inesthétique et implique une faible flexibilité concernant l'évolution du réseau et son exploitation en cas de perturbations. Cette technologie reste toutefois sûre et éprouvée. La maintenir là où elle est déjà existante est souhaitable.

Le bus électrique à biberonnage nécessite à priori un budget similaire à celui du trolleybus. Il assure une flexibilité plus grande et a de grands potentiels d'amélioration à l'avenir. La technologie étant nouvelle, les risques liés à la mise en service et à la pérennité de la technologie sont à prendre en compte.

Le rachat de bus bimode n'est pas une solution optimale. Les véhicules spécifiques nécessitent un entretien lourd. Le gain environnemental est faible, même par rapport au tout-diesel. L'achat précédent valorisait une hypothétique transition vers une électrification complète.

5.2. Recommandations






Suite à ces éléments, il est conseillé :





De ne pas poursuivre l'exploitation du réseau sous sa forme actuelle (**abandon de la technologie bimode**).





D'opter pour une solution basée sur des **moteurs électriques**. Ceux-ci sont silencieux et limitent les émissions de gaz. Le surcoût lié est acceptable. Celui-ci s'atténuera probablement, l'augmentation du prix du carburant étant probablement plus forte que celle du courant électrique.

D'augmenter le nombre de lignes électriques, de manière à permettre une diminution de moitié des émissions de gaz nocifs et une réduction massives des nuisances sonores.

Le **choix entre trolleybus et bus électrique à biberonnage** nécessite une pesée des avantages et inconvénients de chaque variante.

<p>Tout-Diesel</p>  <p>0</p>	<p>Trolleybus</p>  <p>+</p>	<p>Trolleybus</p>  <p>0</p>	<p>Biberonnage</p>  <p>+</p>	<p>Bimode</p>  <p>-</p>
--	---	---	---	---

Avantages	Modes concernés
Mode éprouvé Technologie répandue	
Souplesse d'exploitation Esprit innovant Pas de lignes aériennes	
Préservation de l'environnement Faibles émissions sonores Efficacité énergétique Indépendance énergétique	 

Inconvénients	Modes concernés
Infrastructure lourde Peu de flexibilité quant au tracé	
Mode expérimental Incertitudes sur la pérennité	
Coût plus élevé que du « Tout-diesel » Marché plus restreint	 

6. Annexes

6.1. Tables d'abréviations

6.1.1. Abréviations citées

AU	Australie
B5	Mélange diesel (95% vol.) / biodiesel (5% vol.)
CH4	Méthane
CHF	Franc suisse
ct	Centime
CN	Chine
CO	Monoxyde de carbone
CO2	Dioxyde de carbone
D	Allemagne
dB	Décibel
DME	Diméthyl-éther (cf. §3.10.2.4)
E	Espagne
E5	Mélange essence (95% vol.) / éthanol (5% vol.)
E85	Mélange essence (15% vol.) / éthanol (85% vol.)
EMPA	Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche
EN	Norme européenne
FT	Diesel Fischer-Tropsch (cf. §3.10.2.4)
h	Heure
H2	Hydrogène
HC	Hydrocarbures
IS	Islande
km	Kilomètre
kWh	Kilowattheure
l	Litre
m	Mètre
NL	Pays-Bas
NOX	Oxydes d'azote
OFEN	Office fédéral de l'énergie
OFEV	Office fédéral de l'environnement
PA2 Fribourg	Projet d'agglomération de deuxième génération de l'Agglomération de Fribourg
SIA	Société suisse des ingénieurs et architectes
SN	Norme Suisse
SN EN	Norme Suisse et européenne
TBTS	Gazole désulfuré (cf. § 3.10.3)
TVA	Taxe sur la valeur ajoutée
UBP	Méthode suisse de saturation écologique
UK	Royaume-Uni
vhc	véhicule

6.1.2. Entreprises de transport en commun citées

AAGR	Auto AG Rothenburg
AAR Bus+Bahn	Busbetrieb Aarau - Wynental- und Suhrentalbahn
Bernmobil	Bus urbains de Berne
BGU	Busbetrieb Grenchen und Umgebung
BSU	Busbetrieb Solothurn und Umgebung
BVB	Basler Verkehrs- Betriebe
BVG	Berliner Verkehrsgesellschaft
CarPostal	La Poste
RBS	Regionalverkehr Bern-Solothurn
SBW	Stadtbus Winterthur
STI	Verkehrsbetriebe Steffisburg – Thun - Interlaken
TL	transports publics lausanne et région
TN	Transports publics du Littoral neuchâtelois
TPC	Transports publics du Chablais
Tpf	Transports publics fribourgeois
TPG	Transports publics genevois
TRN	Transports Régionaux Neuchâtelois
VB-TPB	Verkehrsbetriebe Biel – Transports publics biennois
VBL	Verkehrsbetriebe Luzern
VBZ	Verkehrsbetriebe Zürich
VBSG	Verkehrsbetriebe St.Gallen
VBSH	Verkehrsbetriebe Schaffhausen
VMCV	Vevey – Montreux – Chillon - Villeneuve
VZO	Verkehrsbetriebe Zürichsee und Oberland

6.2. Références

CUTAF, Phase préliminaire, matériel roulant, TEAM+FR, Fribourg, Août 1998

ERTRAC Research and Innovation Roadmaps, European Road Transport Research Advisory Council, Septembre 2011

Étude de faisabilité et d'impacts portant sur la mise en place d'un réseau de trolleybus à Laval, STL, Laval (Canada), Septembre 2010

Programme de démonstration du transport urbain, Rapport technique La Ligne Verte, Transports Canada, Mars 2009

Rapport technique Transport urbain électrique alimenté par dispositif de biberonnage, Centre national du transport avancé, St-Jérôme (Canada), Avril 2010

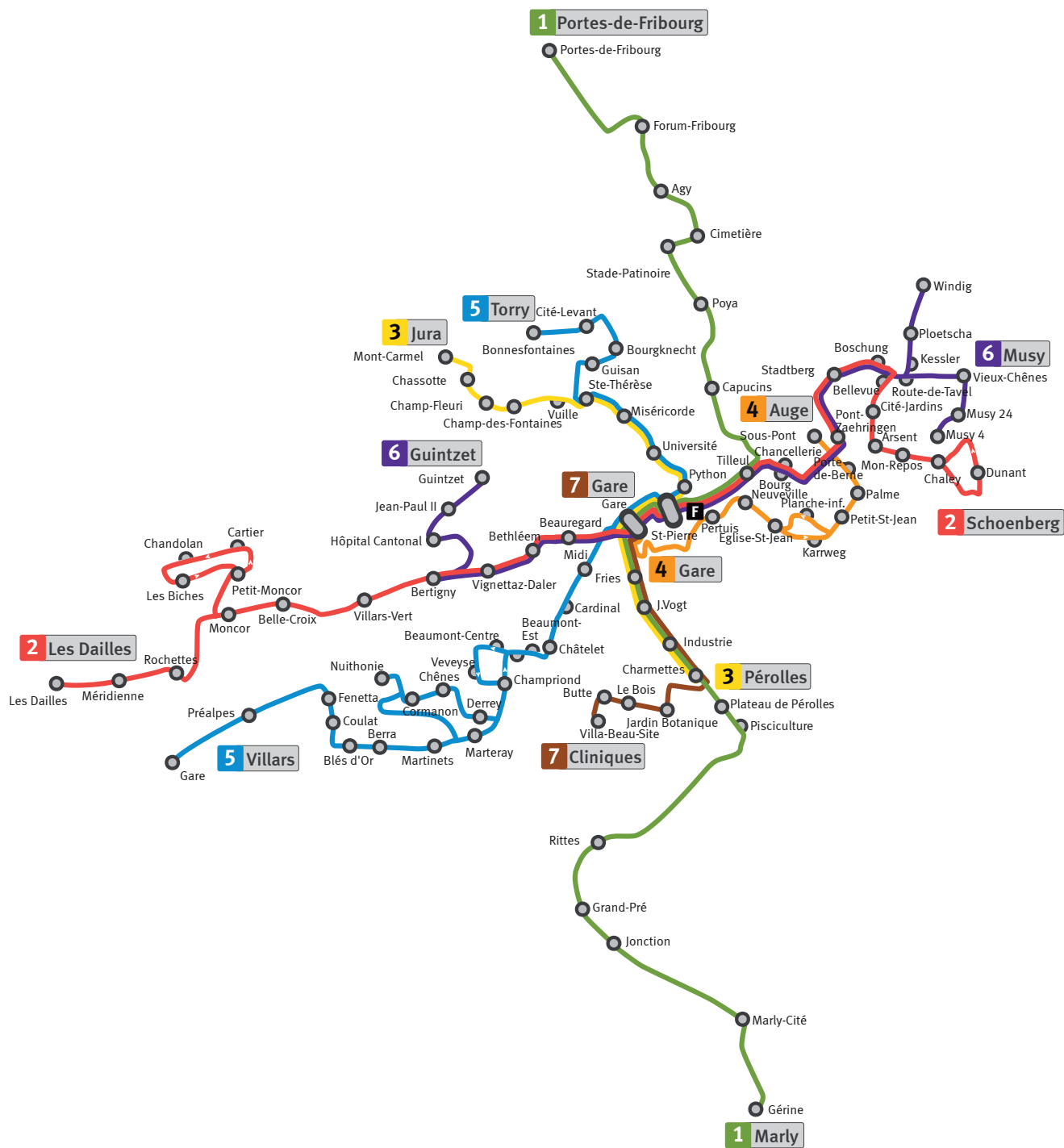
Rapport technique technologie hybride, Transports Canada, Mars 2009

Zukünftige Zusammensetzung der VBSG, Infrac, Zürich, Juillet 2008

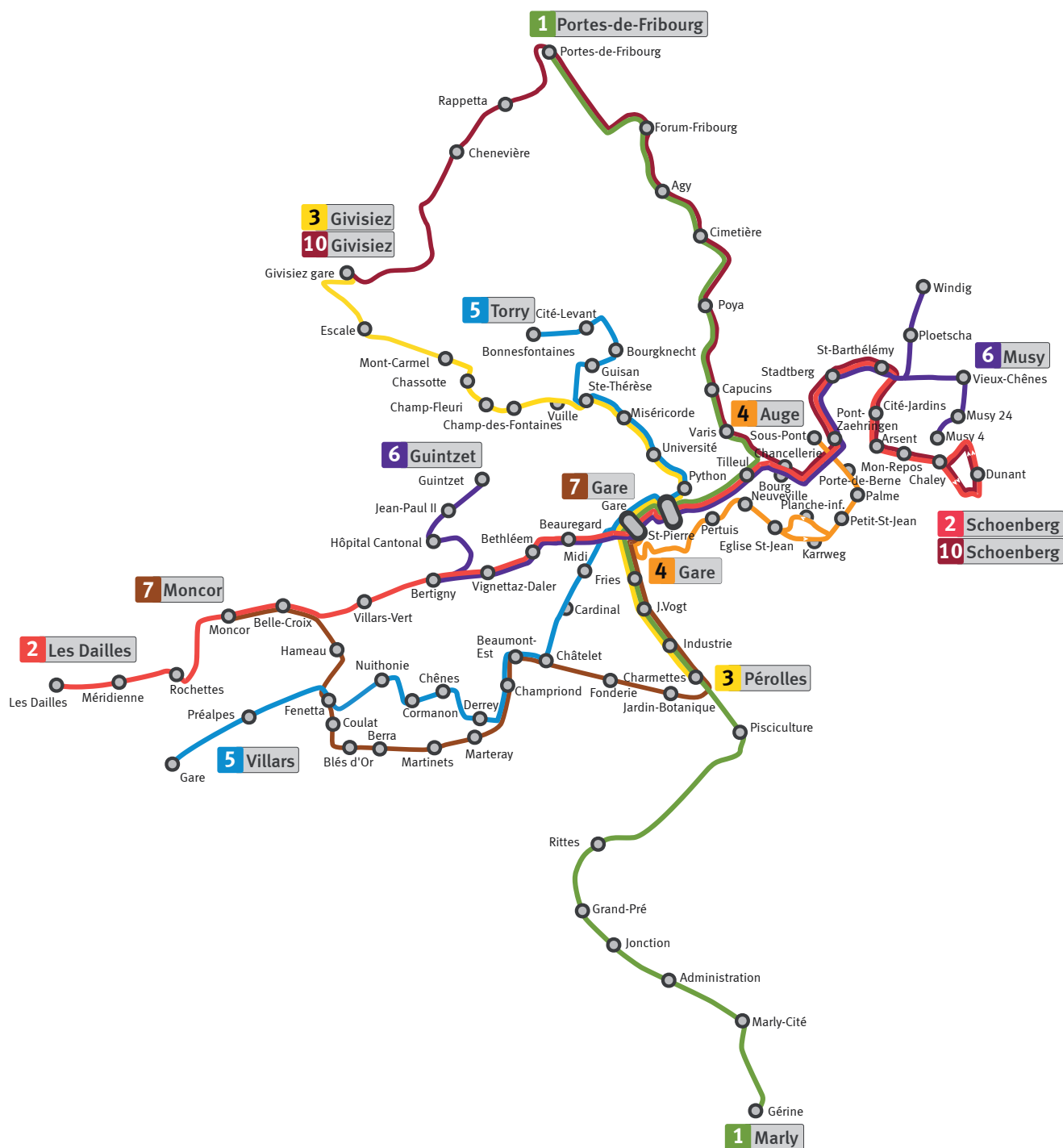
6.3. Plans de réseau

6.3.1. Plan de réseau 2012

6.3.2. Plan de réseau 2018



- | | |
|--------------------------------------|----------------------------|
| 1 Marly
Portes-de-Fribourg | 5 Villars
Torry |
| 2 Les Dailles
Schoenberg | 6 Guintzet
Musy |
| 3 Jura
Pérolles | 7 Cliniques
Gare |
| 4 Auge
Gare | |



- | | |
|--------------------------------------|----------------------------------|
| 1 Marly
Portes-de-Fribourg | 5 Villars
Torry |
| 2 Les Dailles
Schoenberg | 6 Guintzet
Musy |
| 3 Givisiez
Péroles | 7 Cliniques
Gare |
| 4 Auge
Gare | 10 Schoenberg
Givisiez |