



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Office fédéral des transports OFT
Stratégie énergétique 2050 des transports publics
SETP 2050

GUIDE PRATIQUE DES SYSTÈMES DE PROPULSION ALTERNATIFS AU DIESEL POUR LES BUS

EDITION 2019

ALTERNABUS

Ce guide constitue un aide-mémoire pour les chefs de projets, les membres des directions et services amenés à choisir de nouvelles technologies de propulsion pour leur flotte de bus. Outil généraliste et didactique, il s'adresse également aux acteurs politiques et membres des conseils d'administrations amenés à valider le choix technologique des entreprises de transports publics. Ce guide propose une évaluation des technologies selon une série de critères d'efficacité technique, économique, environnementale et sociale, et rassemble plusieurs scénarios d'usage, pour des situations urbaines et extra-urbaines.

Il est le résultat du projet de recherche 113 de l'Office fédéral des transports «Potentiel des systèmes de propulsion alternatifs pour les bus». Il s'accompagne d'un rapport d'étude (édité en français et en allemand) qui contient davantage de références et chiffres-clés.

Les technologies alternatives impliquent des changements importants en matière d'infrastructures, d'exploitation, de procédures, et de financement : il ne s'agit pas uniquement de remplacer un bus par un autre ! Raison pour laquelle l'évaluation des technologies proposée ici doit s'accompagner d'une étude détaillée des incidences pour l'entreprise et la collectivité publique concernée.

POUR CITER CE DOCUMENT

Barbey Horvath J., Delacrétaz Y., Horsky M., Robert-Nicoud T., Alternabus : Guide pratique des systèmes de propulsion alternatifs au diesel pour les bus, Office fédéral des transports, avril 2019.

RAPPORT D'ÉTUDE

Horsky M., Robert-Nicoud T., Barbey Horvath J., Delacrétaz Y., Bossoney L., Stratégie énergétique 2050 dans les transports publics : Etude du potentiel des systèmes de propulsion alternatifs pour bus, projet P-113, Office fédéral des Transports, juin 2019.

Rapport accessible gratuitement : www.bav.admin.ch/energie2050

CONTACT

Haute école d'ingénierie et de gestion du canton de Vaud
Institut insit
Route de Cheseaux 1
CH-1401 Yverdon-les-Bains
Tel : +41 (0)24 557 73 88
insit@heig-vd.ch

TABLE DES MATIÈRES

	Pages
Introduction	5
Inventaire des technologies	6
Diesel et biodiesel	8
Bus à gaz et biogaz	9
Bus hybride diesel et électrique	10
Bus à hydrogène	11
Trolleybus	12
Trolleybus à batterie	13
Bus électrique	14
Bus électrique à recharge rapide	15
Autres technologies	16
Comparaisons des technologies	17
Conseils en situation	18
Adéquation des technologies	20

INTRODUCTION

Chère lectrice, Cher lecteur,

Avec sa Stratégie énergétique 2050, la Confédération s'engage à rendre toutes les activités humaines plus efficaces, plus indépendantes de l'atome, des carburants et des combustibles fossiles. Et par conséquent à diminuer leur impact sur le climat. Lors de la votation du 21 mai 2017, les Suisses ont clairement validé l'objectif de diminuer la consommation énergétique du pays de plus de 40% d'ici à 2035.

Or le secteur des transports engendre plus du tiers de cette consommation et ne cesse de poursuivre sa croissance, contrairement à l'industrie et aux ménages. Il a donc un rôle essentiel à jouer. Quelle contribution les entreprises de transport public peuvent-elles apporter pour améliorer la situation ? Parce qu'un bus rassemble des dizaines de passagers dans un seul véhicule, il permet un gain d'efficacité important : en moyenne, on consomme deux fois moins d'énergie en effectuant un trajet en bus plutôt qu'en voiture. Malgré cela, les bus brûlent plus de 100 millions de litres de diesel chaque année. Cette énergie correspond au chauffage de 300'000 ménages et génère plus de 250'000 tonnes de CO₂.

Pour éviter ce gaspillage énergétique et ses conséquences climatiques, il faut envisager une desserte par des véhicules plus écologiques. Mais ceux-ci sont en général beaucoup moins versatiles que les bus conventionnels, alors que les besoins de chaque région, de chaque ville et de chaque entreprise de transport sont différents. Par conséquent, le choix d'un système de bus alternatif demande de pouvoir estimer ses avantages écologiques tout en considérant l'autonomie des véhicules ainsi que le financement d'investissement et d'entretien.

Pour aider les entreprises de transport et collectivités publiques à identifier le type de traction alternative qui convient le mieux à leur exploitation, les auteur-e-s ont rassemblé sous la forme du présent guide les résultats d'une analyse exhaustive de l'état de la technique et les retours d'expériences concrètes de nombreux exploitants.

Nous saluons le travail des auteur-e-s ainsi que l'engagement et l'expertise des personnes qui ont accompagné ce projet. Nous formulons le souhait que les décideurs, les spécialistes et toutes les personnes œuvrant en faveur de l'efficacité énergétique sauront tirer parti de ce guide pour trouver des solutions qui préservent la qualité de l'environnement des prochaines générations.

Tristan Chevroulet

Direction du programme Stratégie énergétique 2050 des transports publics - SETP 2050

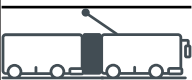
INVENTAIRE DES TECHNOLOGIES

TECHNOLOGIES	Thermique				Hybride
	Bus Diesel	Bus à Bio Diesel	Bus à Gaz	Bus à Bio Gaz	Bus Hybride Diesel-Electrique
Recharge	Ponctuelle (Bio) Diesel 		Ponctuelle (Bio) GNV 		Ponctuelle (Bio) Diesel  -20% 
Batteries (de traction)					
Expériences exemples non exhaustifs	tous		Bernmobil		Bernmobil
Détails	p. 8		p. 9		p. 10

SCÉNARIOS



Morphologie urbaine	Centre urbain	Centre urbain Fortes pentes
Type de ligne TP	Ligne urbaine principale	Ligne urbaine principale
Capacité de la ligne	Forte capacité	Forte capacité
Besoins spécifiques	Disponibilité	Puissance
Besoins de protection	Bruit, Air, Paysage	Bruit, Air, Paysage
Voir page	18	18
ADÉQUATION DES TECHNOLOGIES		Voir page 20

Hybride	Électrique				Divers
Bus à Hydrogène (pile à combustible)	Trolleybus	Trolleybus à batteries	Bus à biberonnage	Bus Electrique	• GPL • (Bio) Ethanol • Solaire + E • Multi-hybride • Moteur à Hydrogène
Ponctuelle  	Continue 	(Dis) Continue 	A l'arrêt 	Au dépôt Au terminus 	
					
Car Postal	divers	VBZ (Zürich)	TPG (Genève)	Car Postal	
p. 11	p. 12	p. 13	p. 15	p. 14	p. 16



Suburbain	Périurbain	Montagne
Ligne de quartier, ligne de rabattement	Ligne de campagne, transport scolaire	Ligne de montagne
Capacité faible à moyenne	Capacité moyenne	Capacité moyenne
Autonomie	Autonomie	Puissance, autonomie
Bruit, Air	Air	Air, Paysage
19	19	19

DIESEL [ET BIODIESEL]

IDÉAL POUR



Ligne de montagne

Voir pages 18-19

PERFORMANCES

La **puissance de propulsion** du moteur diesel est efficace, mais à pleine puissance, il est bruyant (score=4)

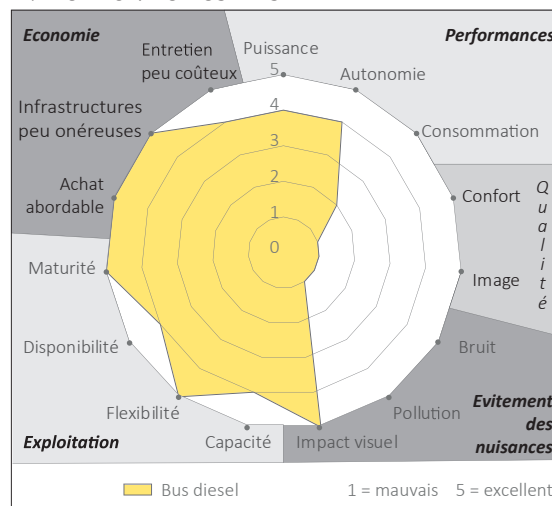
L'**autonomie** du bus diesel est importante (4)

Le bus diesel ne permet pas la récupération d'énergie, désavantage comparatif en terme de **consommation d'énergie** (2)

AUTRES CRITÈRES

Qualité	Confort	Faible. Vibrations, à coups lors des accélérations, décélérations dus à la transmission automatique. Odeur du diesel. Bruit du moteur à l'arrière (1)
	Image	Mauvaise image du diesel (pollution, bruit, vétusté) (1)
Nuisances	Bruit	Le bruit du moteur diesel est très important, en particulier dans les montées et au démarrage. Des améliorations peuvent le diminuer (protections, éco-conduite, échappement), mais de façon marginale (1)
	Pollution	Les particules fines (PM<10) cancérigènes produites par le diesel sont en augmentation, ce que Euro6 ne résout pas
	Impact visuel	Aucun impact visuel, l'alimentation se faisant au dépôt
Exploitation	Capacité	De nombreuses gammes de capacité permettant de couvrir quasiment tous les besoins jusqu'à 135-150 passagers (4)
	Flexibilité	Très bonne flexibilité (déviations de ligne possible), faibles contraintes d'exploitation (5)
	Disponibilité	Disponibilité élevée, son ravitaillement se faisant généralement au dépôt, et en 3 minutes maximum (5)
	Maturité	Grande maturité technologique (seuil d'évolution atteint pour le moteur) (5)
Économie	Coût achat	Comparativement le plus avantageux à l'heure actuelle (5)
	Coût infra	Pas d'infrastructure hormis installations de dépôt (service, maintenance) (5)
	Entretien peu coûteux	Coût du carburant avantageux (rétrocession taxes). Coût de maintenance, révisions un peu plus onéreux (4)

EVALUATION DU BUS DIESEL



DIESEL

Points forts	Points faibles	A propos du biodiesel
- Puissance, permettant le franchissement des fortes pentes - Coûts d'achat, d'exploitation faibles - Ne nécessite que peu de maintenance - Technologie éprouvée (niveau de connaissance élevé) - Evolution possible vers le biodiesel	- Impact important sur la santé et l'environnement (émission de polluants et particules fines) - Impact important sur le climat (émission de CO2) - Bruit important à pleine puissance - Technologie vouée à être remplacée: il y a vraisemblablement peu d'évolutions dans les normes d'émissions - et peu d'évolutions technologiques à attendre pour limiter les émissions	- Gains en termes d'image par rapport au diesel - En Suisse, le biodiesel provient d'huiles usagées ou de colza - Aides financières insuffisantes pour les entreprises de transport souhaitant opter pour le biodiesel : la rétrocession des taxes sur le carburant ne se fait que pour une part de biodiesel n'excédant pas 7%. - Les constructeurs ne garantissent pas l'utilisation d'une part importante de biodiesel, à moins de pouvoir réaliser des tests d'acclimatation en vue d'augmenter la concentration de biodiesel dans les véhicules - Emission de CO2 plus faible que le diesel

BUS À GAZ [ET BIOGAZ]

IDÉAL POUR



Ligne de montagne



Ligne de quartier,
ligne de rabattement

Voir pages 18-19

PERFORMANCES

Puissance de propulsion intéressante mais légèrement moindres que celle du bus diesel (score=4)

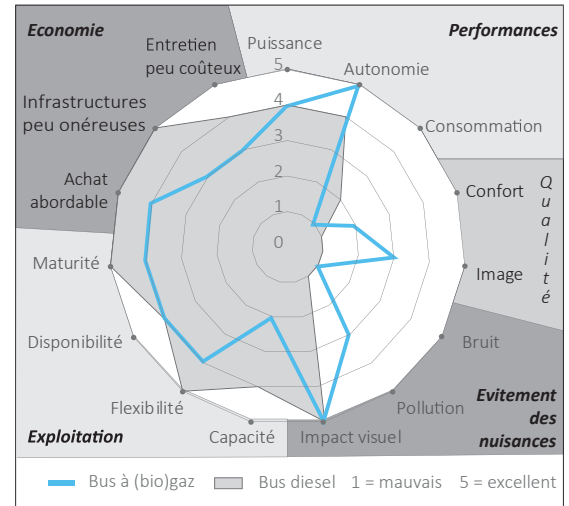
Les données varient concernant l'**autonomie**, qui peut être supérieure à celle des bus diesel (5)

Consommation très élevée, et péjorée par la nécessité de compresser le gaz pour le stocker (1)

AUTRES CRITÈRES

Qualité	Confort	Faible niveau de confort (bruit, à-coups de la transmission, etc.), mais légèrement supérieur au diesel (odeurs moins désagréables p.ex) (2)
	Image	Image légèrement meilleure que le diesel (mais peu de différence apparente pour le grand public) (3)
Nuisances	Bruit	La technologie permet une amélioration par rapport au diesel sur certains modèles, mais d'autres se montrent encore plus bruyants (1)
	Pollution	Les bus à gaz émettent moins de polluants que le diesel, mais rejettent davantage de CO2 (3)
	Impact visuel	Aucun impact visuel, l'alimentation se faisant au dépôt (5)
Exploitation	Capacité	Gamme de capacité importante (jusqu'à 125-140 passagers), mais limitée par le faible nombre de modèles commercialisés (2)
	Flexibilité	Bonne flexibilité
	Disponibilité	Disponibilité élevée, son ravitaillement se faisant généralement au dépôt (4)
	Maturité	Bonne maturité technologique, bien que la technologie évolue (biocarburants, p.ex) (4)
Économie	Coût achat	Un peu plus onéreux que le diesel à l'achat (4)
	Coût infra	Coût d'infrastructure important lié à la station de ravitaillement (station de compression) (3)
	Entretien peu coûteux	Coût d'usage moyen (3)

EVALUATION DU BUS À GAZ



BUS À GAZ

BUS À BIOGAZ (BIOGNV)

Points forts	Points faibles	A propos du biogaz
- Prix du carburant très économique par rapport au diesel, ce qui peut compenser le plus faible rendement énergétique du bus à gaz - Puissance de propulsion équivalente au diesel - Evolution vers le biogaz	- Les risques d'incendie impliquent des normes de sécurité supplémentaires et plus strictes que celles du diesel - Nécessite une bonne maîtrise de la technologie chez l'exploitant - Consommation très élevée, mais compensée par le coût du carburant. - Le gaz étant une ressource naturelle limitée, le biogaz est plus intéressant (voir ci-contre)	- Le biogaz provient de déchets fermentescibles alimentaires ou industriels (p.ex. déchets de restaurants et de magasins d'alimentation) ou d'eaux usées - Cette ressource n'entre pas en concurrence avec l'alimentation (comme le colza, p.ex). - Améliore l'indépendance énergétique : possibilité d'une production locale de biométhane - Nécessite un contrôle de la qualité du biocarburant produit, qualité qui n'est pas encore aussi stable que celle du gaz de raffinerie.

BUS HYBRIDE [DIESEL + ÉLECTRIQUE]

IDÉAL POUR



Ligne urbaine principale de forte capacité

Voir pages 18-19

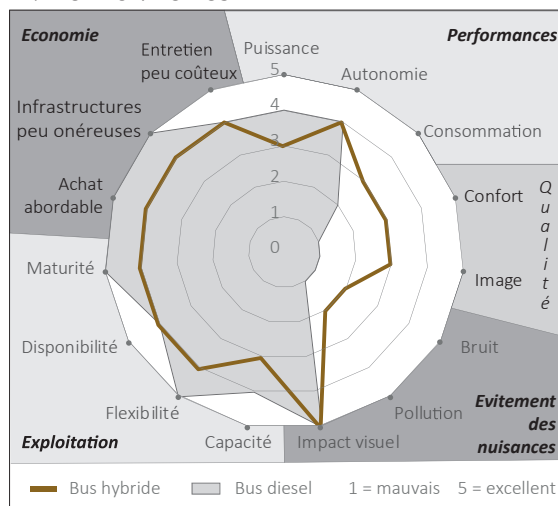
PERFORMANCES

Puissance de propulsion peu efficace, ce qui représente un handicap dans les pentes (3)

L'autonomie de l'hybride est globalement augmentée par rapport au diesel, sauf pour les petits véhicules (minibus) (4)

Consommation améliorée par rapport au diesel (3)

EVALUATION DU BUS HYBRIDE



AUTRES CRITÈRES

Qualité	Confort	Conduite agréable au démarrage où le bus se passe du moteur diesel (3)
	Image	Image légèrement meilleure qu'un bus diesel, la motorisation hybride est plus connue du grand public que les autres bus à moteur thermique (3)
Nuisances	Bruit	Faible bruit au démarrage et à l'arrivée des arrêts, mais lorsque le bus a recours à son moteur thermique, il émet davantage de bruit qu'un bus diesel en raison de la taille réduite de son moteur (2)
	Pollution	Petite amélioration par rapport au diesel en raison du moindre recours au moteur diesel (2)
	Impact visuel	Aucun impact visuel, l'alimentation se faisant au dépôt (5)
Exploitation	Capacité	Grande gamme de capacités, couvrant également les mégabus à double-articulation (135-180 passagers) (4)
	Flexibilité	Bonne flexibilité (4)
	Disponibilité	Disponibilité élevée, son ravitaillement se faisant généralement au dépôt (4)
	Maturité	Bonne maturité, technologie maîtrisée (4)
Économie	Coût achat	Un peu plus onéreux que le diesel à l'achat (4)
	Coût infra	Faible coût d'infrastructure, lié à la maintenance des batteries (4)
	Entretien peu coûteux	Coûts d'entretien supérieurs et plus complexes que le diesel, étant donné les deux systèmes à entretenir (4)

BUS HYBRIDE

Points forts	Points faibles
- Utilisation de l'électrique au démarrage et à l'arrivée aux arrêts : effet très positif sur le bruit et sur les émissions de polluants, ce pour la plupart des modèles. - Bus de très grandes capacités (double-articulés) - Gains en terme de consommation	- Technologie de transition, encore basée sur le recours au diesel - Sa plus faible puissance de propulsion limite son utilisation à des contextes sans grandes pentes - Coût écologique des batteries

BUS À HYDROGÈNE [PILE À COMBUSTIBLE]

IDÉAL POUR



Ligne de quartier,
ligne de rabattement



Ligne de campagne,
transport scolaire

Voir pages 18-19

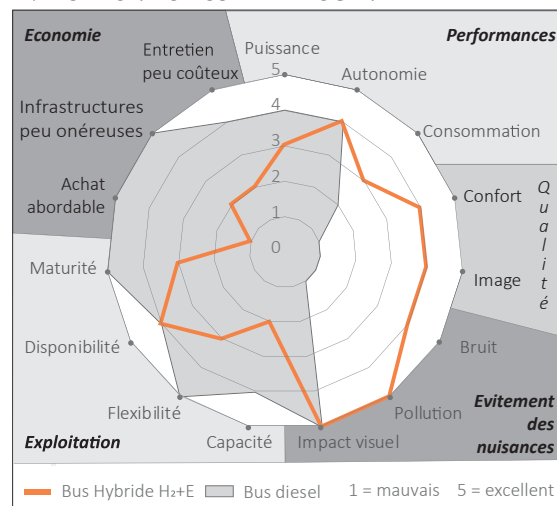
PERFORMANCES

Puissance de propulsion dépendant des performances encore en évolution de la (ou des) pile(s) à combustible (score=3)

Les données varient concernant l'**autonomie**. Elle semble égaler le diesel pour toutes les gammes de capacité (4)

Consommation globale péjorée par la production et stockage de l'hydrogène, hormis ceci, rendement efficace (3)

EVALUATION DU BUS À HYDROGÈNE



AUTRES CRITÈRES

Qualité	Confort	La conduite douce et le faible niveau de bruit procurent un bon niveau de confort, de même que l'absence d'odeurs (4)
	Image	Image positive parmi les clients qui ont testé la technologie: l'absence d'émission de bruit est bien perçue (4)
Nuisances	Bruit	Très faible niveau de bruit tant intérieur qu'extérieur, toutefois légèrement supérieur aux bus électriques (4)
	Pollution	Absence d'émissions du bus (qui ne rejette que de la vapeur d'eau) mais un approvisionnement électrique d'origine renouvelable est nécessaire pour un bilan positif (5)
	Impact visuel	Aucun impact visuel, l'alimentation se faisant au dépôt (5)
Exploitation	Capacité	Gamme de capacité importante (jusqu'à 125-140 passagers), mais limitée par le faible nombre de modèles commercialisés (2)
	Flexibilité	Bonne flexibilité (3)
	Disponibilité	Bonne disponibilité liée à la grande vitesse de remplissage du réservoir. Qui doit toutefois pouvoir tenir la journée (4)
	Maturité	Technologie encore en cours de perfectionnement, mais retours d'expérience déjà suffisamment intéressants (3)
Économie	Coût achat	Les bus à l'hydrogène sont encore très coûteux à la fabrication (1)
	Coût infra	Infrastructure importante (station de production/ravitaillement en hydrogène) (2)
	Entretien peu coûteux	Vu la jeunesse de la technologie, des coûts d'entretien plutôt élevés devraient être calculés (2)

BUS À L'HYDROGÈNE

Points forts	Points faibles	A propos de la pile à combustible
- Aucune émission de polluants de façon directe, très bonne image - Technologie permettant d'exploiter la production excédentaire d'électricité hydraulique et solaire (stockage d'énergie sous forme d'hydrogène). - Investissements dans les stations de recharge à mutualiser avec des privés (secteurs logistique, grands groupes alimentaires, etc.)	- Puissance moteur pas encore suffisante pour contextes en pente. - Réseau de distribution et de stockage de l'hydrogène pas encore au point. - Il est indispensable de tenir compte de l'énergie nécessaire pour comprimer l'hydrogène, car cette compression est très consommatrice en énergie. Si on excepte la possibilité d'utiliser les surplus d'énergie pour la production de l'hydrogène, le bilan énergétique de cette technologie n'est pas très favorable. - L'essai récent en Suisse donne plutôt une image d'une technologie coûteuse et d'investissements très importants.	La pile à combustible est également destinée à être utilisée pour augmenter l'autonomie des bus électriques (range extender) (voir page 14).

TROLLEYBUS

IDÉAL POUR



Ligne urbaine principale avec fortes pentes



Ligne urbaine principale de forte capacité

Voir pages 18-19

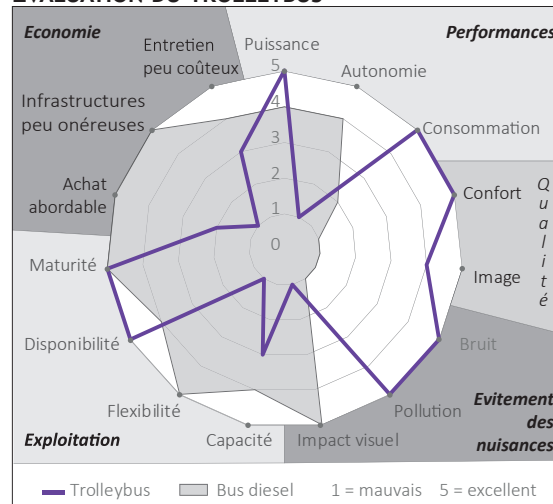
PERFORMANCES

Puissance de propulsion très forte (score=5)

L'autonomie du trolley, alimenté par ses perches à des caténaires, est pratiquement infinie sur sa ligne, atout important pour son exploitation durant toute la journée. Mais son fonctionnement est dégradé hors de son réseau (vitesse réduite, bruit de la génératrice diesel) (1)

Consommation faible liée au haut rendement de la chaîne de traction et à la récupération d'énergie possible (5)

EVALUATION DU TROLLEYBUS



AUTRES CRITÈRES

Qualité	Confort	La conduite douce et le faible niveau de bruit procurent un confort maximal (5)
	Image	Bonne image, liée à la source de l'énergie - électrique. Image pouvant être péjorée par l'impact visuel des lignes aériennes, enjeu toutefois très peu présent dans les villes à réseau de trolley implanté depuis de nombreuses années (4)
Nuisances	Bruit	Très faible niveau de bruit tant intérieur qu'extérieur (bien qu'en cas de panne ou de déviation, la génératrice diesel soit très bruyante) (5)
	Pollution	Absence d'émissions de polluants (5)
	Impact visuel	Impact important lié à la présence des lignes aériennes, perçues comme peu esthétiques dans le paysage urbain. Ces lignes sont toutefois efficaces pour signaler le parcours du bus (1)
Exploitation	Capacité	Gamme de modèles orientée sur les grands véhicules, jusqu'au double-articulé. Ce mode de traction étant destiné aux grandes capacités, peu de petits modèles sont commercialisés (4)
	Flexibilité	Minimale. Une déviation de son parcours ou une panne de l'alimentation électrique implique le recours à l'alimentation diesel de secours occasionnant perte de temps et bruit (1)
	Disponibilité	Maximale, la recharge se faisant en continu par les caténaires il n'y a pas d'immobilisation (hormis les cas de panne cité plus haut) (5)
	Maturité	Grande maturité technologique (évolution vers les trolley à batteries) (5)
Économie	Coût achat	Coût d'achat important, largement amorti sur sa longue durée de vie (2)
	Coût infra	Coût important, lié à l'équipement des lignes de contact (1)
	Entretien peu coûteux	Coût d'usage moyen (3)

TROLLEYBUS

Points forts	Points faibles	A propos du trolleybus
- Bruit minimum - Grande capacité de transport - Rendement, puissance et accélération excellents - Importante puissance au démarrage compatible avec de fortes pentes - Récupération d'énergie et injection au réseau possibles. - Technologie éprouvée, plusieurs constructeurs, matériel suisse disponible	- Coût et emprises des installations fixes (mâts, lignes aériennes) et de leur entretien - Procédure d'approbation des plans pour toute nouvelle ligne ou tronçon, qui devrait être simplifiée - Moteur thermique d'appoint peu performant et bruyant - Acceptabilité politique et image souvent négatives des lignes aériennes	- L'aménagement d'axes forts de transports publics (voies réservées, priorités aux carrefours) renforce l'attractivité du trolleybus conventionnel et limite le risque de perturbation nécessitant déviations, déperchage et utilisation de la génératrice/batterie d'appoint. - Difficultés notables de déploiement de nouvelles lignes, en raison des points faibles du trolleybus (cf ci-contre). A noter, plusieurs démantèlements de réseau (Bâle, La Chaux-de-Fonds, Lugano). - L'évolution technologique va vers le trolleybus à batterie (cf. ci-contre), les TP à génératrice diesel tendent à être progressivement remplacés par des trolleybus à batteries - Le trolley circule dans 11 villes suisses, totalisant 50 lignes, sur 309 km au total

TROLLEYBUS À BATTERIES

IDÉAL POUR



Ligne urbaine principale avec fortes pentes



Ligne urbaine principale de forte capacité

Voir pages 18-19

PERFORMANCES

Puissance de propulsion très forte (score=5)

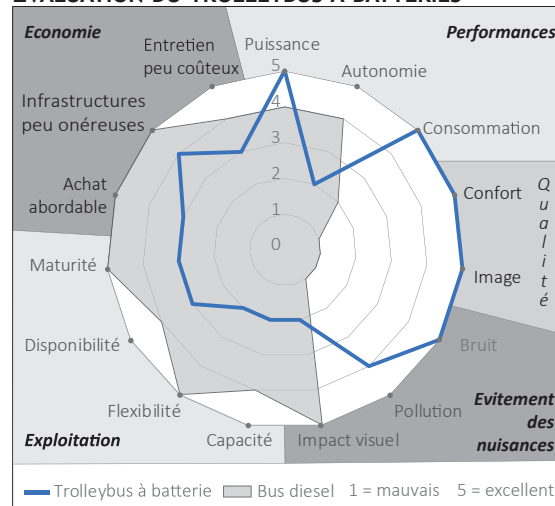
L'**autonomie** est augmentée en fonctionnement hors caténares (+10km environ), grâce à ses batteries hautes performances (2)

Consommation faible liée au haut rendement de la chaîne de traction et à la récupération d'énergie possible (5)

AUTRES CRITÈRES

Qualité	Confort	La conduite douce et le faible niveau de bruit procurent un confort maximal. (score=5)
	Image	Très bonne image, liée à la source de l'énergie - électrique (score=5)
Nuisances	Bruit	Très faible niveau de bruit tant intérieur qu'extérieur (score=5)
	Pollution	Absence d'émissions de polluants (score=5)
	Impact visuel	Impact important lié à la présence des lignes aériennes, perçues comme peu esthétiques dans le paysage urbain (mais permettent de signaler le parcours du bus). Le trolley électrique offre la possibilité de limiter cet impact en supprimant les lignes aériennes aux abords des sites particulièrement sensibles (monuments, art public, ...) (score=1)
Exploitation	Capacité	Gamme encore un peu réduite dans les très grandes capacités par rapport aux trolleybus classiques (score=3)
	Flexibilité	Le fonctionnement sur batteries permet davantage de flexibilité, pouvant être mis à profit pour des déviations ponctuelles
	Disponibilité	Bonne disponibilité : la recharge de la batterie se fait en mouvement, mais nécessite tout de même un petit temps de recharge au dépôt (score=3)
	Maturité	Fiabilité des batteries en autonomie encore à éprouver pour les longs trajets hors des lignes aériennes (score=3)
Économie	Coût achat	Coût d'achat important. À considérer, l'achat des batteries (devant être remplacées sur une durée de vie plus courte que le matériel roulant) (score=3)
	Coût infra	Si l'on part de l'idée que le trolley à batteries utilise un réseau de lignes aériennes existantes (ou des prolongements limités), le coût d'infrastructure n'est pas si important (score=4)
	Entretien peu coûteux	Coût d'usage moyen (score=3)

EVALUATION DU TROLLEYBUS À BATTERIES



TROLLEYBUS À BATTERIES

Points forts	Points faibles	À propos du trolleybus à batteries
- Grande capacité de transport - Rendement, puissance et accélération excellents, autonomie hors lignes aériennes - Importante puissance au démarrage compatible avec de fortes pentes - Récupération d'énergie et injection au réseau possibles, nivellement des pics de charge - Technologie déjà éprouvée - Prolongement de lignes et aménagement d'espaces publics possible sans lignes aériennes	- Gestion du recyclage des batteries pas encore au point - Coût écologique des batteries - Inconnues sur la durée de vie des batteries - Selon la législation suisse : l'électrification ou le prolongement de ligne doit être > 50%	- À moins d'une transition vers le tramway, qui offre plus de capacité, le maintien des réseaux existants et la transition progressive vers le trolleybus à batteries est une stratégie rentable à long terme pour les villes déjà équipées de lignes de trolley. - Elle suppose une capacité des collectivités à investir (en complément des fonds d'agglomération).

BUS ÉLECTRIQUE

IDÉAL POUR



Ligne périurbaine, transport scolaire

Voir pages 18-19

PERFORMANCES

Puissance de propulsion très forte (score=5)

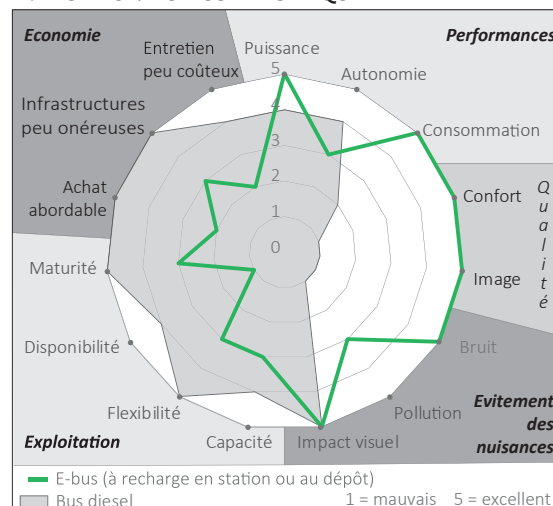
L'**autonomie** des bus électriques est un point crucial. Elle n'est pas encore assurée pour une utilisation intensive (3)

Consommation faible lié au haut rendement de la chaîne de traction et à la récupération d'énergie possible (5)

AUTRES CRITÈRES

Qualité	Confort	La conduite douce et le faible niveau de bruit procurent un confort maximal (5)
	Image	Très bonne image, liée à la source de l'énergie - électrique (5)
Nuisances	Bruit	Très faible niveau de bruit tant intérieur qu'extérieur (5)
	Pollution	Absence d'émissions du bus mais un approvisionnement électrique d'origine renouvelable, tout comme une élimination des batteries non polluante est nécessaire pour un bilan positif (3)
	Impact visuel	Aucun impact visuel, l'alimentation se faisant au dépôt (5)
Exploitation	Capacité	La gamme de capacité n'est pas complète (pas de grands véhicules), le poids des batteries nécessaires limite fortement l'évolution vers des bus électriques de grande capacité. (2)
	Flexibilité	La flexibilité est importante mais vu l'autonomie restreinte, toute modification de parcours doit être réalisable en conservant une charge suffisante (3)
	Disponibilité	Mauvaise : le temps de chargement au dépôt est long, quoiqu'appelé à se réduire avec les progrès technologiques attendus (1)
	Maturité	Technologie relativement éprouvée, mais encore limitée pour les grands véhicules, et batteries encore en cours de perfectionnement (3)
Économie	Coût achat	Coût relativement important, essentiellement lié aux batteries (jusqu'à 30% du prix du bus). On pourrait opter pour un système de location des batteries, à comptabiliser dans les coûts d'usage/d'entretien (3)
	Coût infra	Infrastructure de charge au dépôt importante (3)
	Entretien peu coûteux	Coût d'usage important (prix électricité, batteries) (2)

EVALUATION DU BUS ÉLECTRIQUE



BUS ÉLECTRIQUE

Points forts	Points faibles	A propos du e-bus
- Déploiement possible dans des contextes non urbains - Charge «unique» aux terminus ou au dépôt, possible en charge lente - Pas d'infrastructure supplémentaire le long de la ligne - Pas de lignes aériennes de contact - Confort maximal (à part régulation thermique moindre), bruit minimal	- Limité à ce jour à des bus de faible capacité - Coût des véhicules environ deux fois plus élevé que les bus diesel et 50% plus que les trolleybus - Infrastructure de recharge spécifique à chaque système de E-Bus, onéreuse (exploitant captif d'une technologie) - Faible disponibilité et autonomie - Gestion du recyclage des batteries pas encore au point, coût écologique des batteries - Inconnues sur la durée de vie des batteries - Pics de charge dans le réseau électrique si charge rapide (charge au dépôt, la nuit) - Équipement de sous-stations électriques complémentaires éventuellement nécessaire	- Dans le dépôt, l'infrastructure de charge doit être optimisée (ordonnancement des bus dans le dépôt, solutions automatiques pour charger les bus) de manière à limiter la durée d'immobilisation des bus et pouvoir assurer le service dès l'aube - Le recours à une pile à combustible (range extender) pourrait permettre à terme d'augmenter l'autonomie du bus électrique

BUS ÉLECTRIQUE À BIBERONNAGE

IDÉAL POUR



Ligne urbaine principale avec fortes pentes

Voir pages 18-19

PERFORMANCES

Puissance de propulsion très forte (score=5)

L'**autonomie** est restreinte entre deux points de recharge (~25km) (2)

Consommation faible lié au haut rendement de la chaîne de traction et à la récupération d'énergie possible (5)

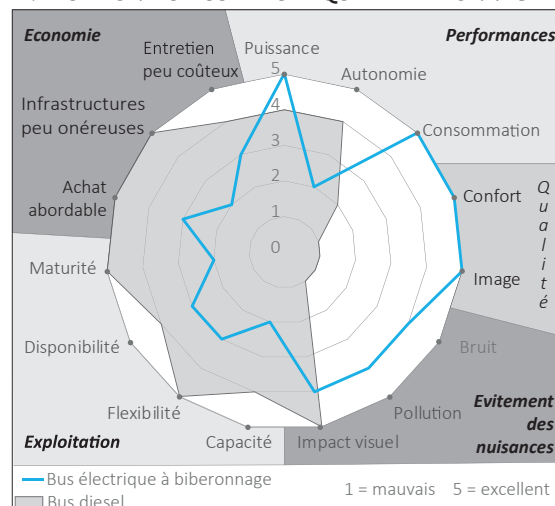
AUTRES CRITÈRES

Qualité	Confort	La conduite douce et le faible niveau de bruit procurent un confort maximal (5)
	Image	Très bonne image, liée à la source de l'énergie - électrique (5)
Nuisances	Bruit	Très faible niveau de bruit tant intérieur qu'extérieur. Le bruit de la recharge rapide peut être gênante aux arrêts, des améliorations ont dû être apportées (4)
	Pollution	Absence d'émissions du bus, mais un approvisionnement électrique d'origine renouvelable, tout comme une élimination des batteries non polluante est nécessaire pour un bilan positif (4)
	Impact visuel	Impact visuel limité aux stations équipées du dispositif de recharge rapide (mât et bras d'alimentation, armoires électriques) (4)
Exploitation	Capacité	La gamme de capacité n'est pas encore très large mais la technologie devrait rapidement évoluer dans ce sens (ex. double articulé en construction pour Nantes) (2)
	Flexibilité	Les stations de recharge rapide aux arrêts limitent la flexibilité, qui reste tout de même un atout de la technologie par rapport au trolleybus pour des changements d'itinéraires ponctuels (3)
	Disponibilité	Disponibilité optimisée par les recharges intermédiaires et une charge de 3 à 5' au terminus, à prendre en compte, avec une marge d'exploitation vu la capacité des batteries (3)
	Maturité	Système encore jeune, dont la fiabilité va rapidement augmenter à mesure des nouveaux systèmes et constructeurs venant sur le marché (2)
Économie	Coût achat	Coût relativement important, essentiellement lié aux batteries. On pourrait opter pour un système de location des batteries, à comptabiliser dans les coûts d'usage/d'entretien (3)
	Coût infra	Équipement des stations de recharge important, pouvant par la suite être mutualisé pour plusieurs lignes (2)
	Entretien peu coûteux	Coût d'usage moyen (3)

BUS ÉLECTRIQUE À BIBERONNAGE

Points forts	Points faibles	A propos du bus à biberonnage
- Grande capacité de transport - Rendement, puissance et accélération excellents - Compatible avec de fortes pentes - Récupération d'énergie et injection dans la batterie possible en pente. - Pas de lignes aériennes de contact	- Coût et emprises des installations fixes (mâts de recharge, stations électriques) et entretien - Coût des véhicules deux fois plus élevé que les bus diesel - Pics de charge dans le réseau électrique - Gestion du recyclage des batteries pas encore au point, coût écologique des batteries - Système encore peu mature - Inconnues sur la durée de vie des batteries - Recharge au terminus (3-5') à prendre en compte pour l'exploitation de lignes urbaines à l'horaire très contraint.	- Retours d'expérience après 1 an de mise en service du bus TOSA à Genève - Le système mise sur une optimisation de la durée de vie des batteries (10 ans attendus) - Le faible niveau de bruit extérieur du bus TOSA nécessite que le chauffeur enclenche une sonnerie continue en traversée des zones à priorité piétonne

EVALUATION DU BUS ÉLECTRIQUE À BIBERONNAGE



AUTRES TECHNOLOGIES

GAZ DE PÉTROLE LIQUÉFIÉ

Le gaz de pétrole liquéfié (GPL) est facile à transporter et à stocker car liquéfié à basse pression. Il pollue cinq fois moins que l'essence et procure une nette réduction des émissions polluantes par rapport à un diesel (65 à 80%). Par contre, la consommation est jusqu'à deux fois supérieure à un moteur diesel.

BIOÉTHANOL

L'ED95 utilisé est un mélange d'éthanol (95%) et d'additif non pétrolier (5%) destiné en priorité aux bus. Son énorme désavantage réside au niveau de la provenance du carburant, car celui-ci utilise des denrées alimentaires telles que maïs, blé et betteraves sucrières. L'on obtient une réduction importante des émissions de CO₂ (jusqu'à 90%), et des particules fines de 70%, ainsi qu'une amélioration des performances, mais la consommation reste de 30 à 50% plus importante qu'avec un carburant diesel. Ce système est plutôt utilisé dans les pays d'Amérique du Sud.

ÉLECTRIQUE ET SOLAIRE

Des panneaux solaires sont installés sur le toit du bus et servent de « range extender » aux batteries qui alimentent les moteurs électriques. Cette technologie a été pensée pour des endroits très ensoleillés, comme l'Ouganda, où le bus solaire Kayoola a été conçu. Bien que l'ensoleillement soit moindre en Suisse, avec le développement et l'utilisation de panneaux solaires de haute qualité, il serait envisageable d'appliquer cette technologie dans certaines régions afin de bénéficier de quelques kilomètres d'autonomie en plus.

ELECTRIQUE, DIESEL ET HYDRAULIQUE (MULTI-HYBRIDE)

Une curiosité a fait son apparition sur le marché français, le Businova : un bus de 12 m multi-hybride couplant en parallèle à la fois un moteur électrique de 250 kW, et un moteur hydraulique de 110 cm³. Enfin, un moteur thermique de 80 kW sert de « range extender ». Le tout est connecté à une batterie de 132 kWh lui permettant une autonomie de 200 km. Ce bus est censé réduire la consommation et les émissions polluantes de façon significatives, mais dans l'attente de tests concrets et de retours d'expérience, ce dispositif est plutôt à voir comme une curiosité, mettant en avant une propulsion multi-hybride qui pourrait se révéler intéressante dans le futur, quoique compliquée, à l'heure où la technologie « simple » de bus à batterie évolue rapidement.

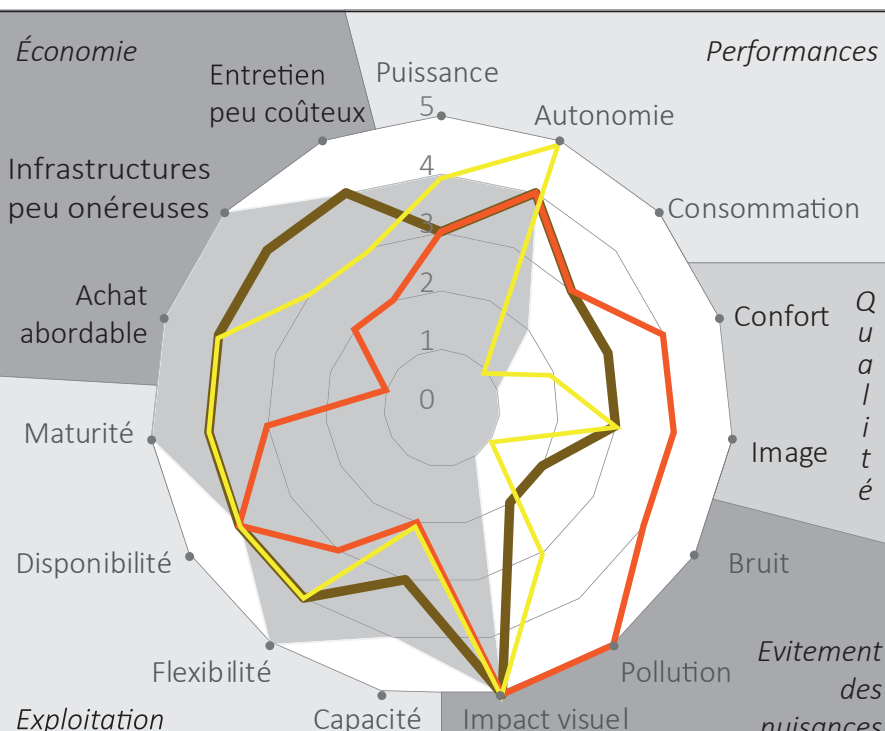
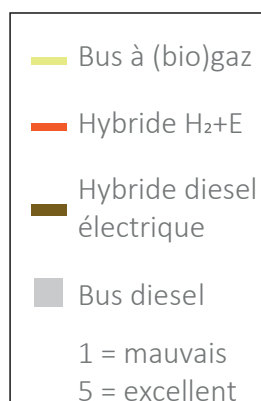
BUS À HYDROGÈNE À COMBUSTION INTERNE

Cette technologie a été développée dans les années 1990, notamment par le constructeur MAN, et a fait l'objet d'applications en service public à Berlin, puis à Francfort, dès 2006. Elle se fonde sur un moteur à combustion interne classique, utilisant l'hydrogène comme carburant. Le dihydrogène (H₂) « explose » dans le dioxygène (O₂), cette réaction aboutissant à la production d'eau (H₂O) et à une libération d'énergie. Cette énergie est utilisée pour propulser le véhicule. L'intérêt est que la combustion d'un kilogramme de dihydrogène libère trois fois plus d'énergie que celle d'un kilogramme d'essence. Une variante consiste à ajouter du dihydrogène à un carburant classique pour en diminuer les émissions polluantes.

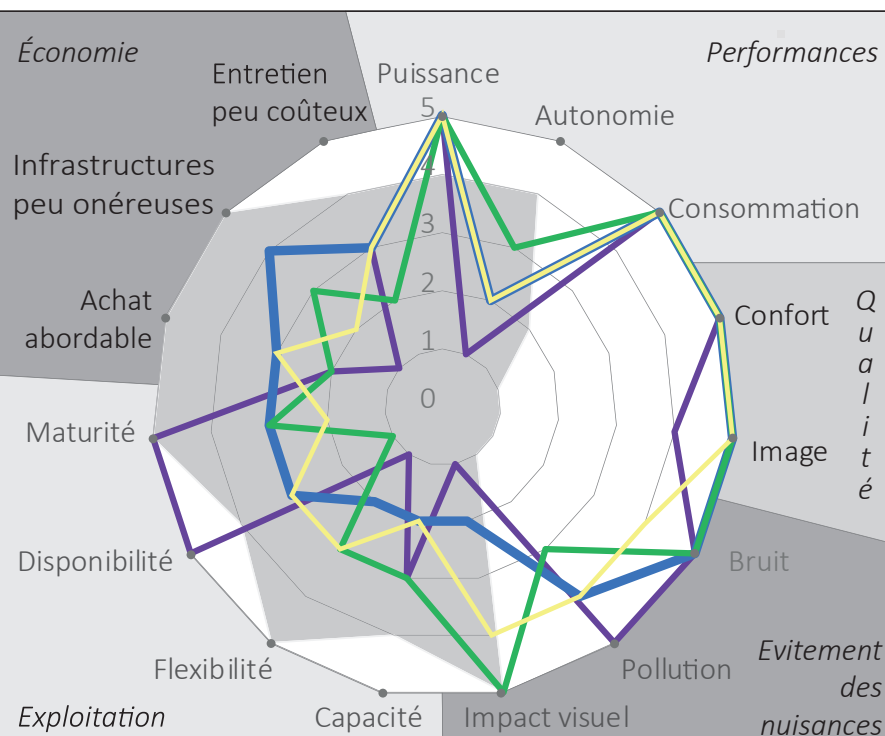
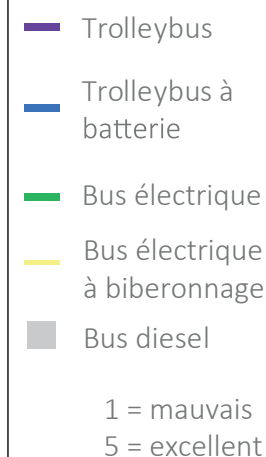
Le rendement est toutefois nettement plus faible que celui de la pile à combustible, la complexité mécanique est plus importante aussi. C'est pourquoi les développements se concentrent aujourd'hui sur l'hydrogène à pile à combustible.

COMPARAISON PAR FAMILLES TECHNOLOGIQUES

COMPARAISON DES TECHNOLOGIES THERMIQUES ET HYBRIDES



COMPARAISON DES TECHNOLOGIES ÉLECTRIQUES



COMMENTAIRE

Dans l'ensemble, les technologies alternatives offrent de nouvelles solutions écologiques et des avantages importants pour les passagers et la qualité de vie dans les villes.

Cette évaluation présente des disparités importantes dans les scores obtenus : il n'existe donc pas de solution universelle aussi flexible que le diesel, mais les alternatives offrent des réponses technologiques tout à fait adaptées pour de nombreux critères. L'entreprise va devoir établir des compromis en fonction de ses conditions d'exploitation, car il est à l'heure actuelle difficile de choisir un moyen de propulsion économique et irréprochable du point de vue de la qualité de service, de l'évitement des nuisances et de la souplesse d'exploitation. Un critère clé est l'autonomie des batteries, encore restreinte pour les bus électriques.

Il est par conséquent essentiel de choisir des technologies bien adaptées aux différentes conditions d'exploitation envisagées. Les pages suivantes vont permettre d'identifier les technologies pertinentes en fonction de différents scénarios, ou profils d'utilisation du réseau de bus.

CONSEILS EN SITUATION

LIGNE URBAINE PRINCIPALE À FORTE CAPACITÉ



Caractéristiques

- Grande à très grande capacité (bus articulé ou double-articulé)
- Puissance nécessaire standard
- **Disponibilité importante**
- Grande autonomie nécessaire (>400 km/jour/bus)
- Impact visuel important
- Pollution et bruit minimum

Option A **Trolleybus à batterie**

Option B **Hybride diesel/électrique**

Au stade actuel d'avancement technologique, la solution électrique hors trolley n'existe pas encore pour une desserte de grande capacité.

Le trolleybus à batterie représente une solution pour poursuivre le développement des réseaux de trolleybus tout en les adaptant aux sites sensibles du point de vue du patrimoine.

Les bus hybrides offrent une alternative pour les contextes urbains sans grandes pentes, dans le cas d'un réseau non équipé en lignes aériennes de trolleybus.

LIGNE URBAINE PRINCIPALE À FORTES PENTES



Caractéristiques

- Grande capacité (bus articulé)
- **Puissance nécessaire élevée**
- Disponibilité importante
- Impact visuel important
- Pollution et **bruit** minimum

Option A **Trolleybus à batterie**

Option B **Bus électrique à recharges rapides**

En raison de la puissance instantanée nécessaire, le moyen de propulsion à privilégier sera électrique.

Si un réseau de trolleybus existe déjà, le choix se portera sur le trolleybus à batterie. Si la ligne ou le réseau à équiper est dépourvu de caténaires, le bus électrique à recharge rapide est une solution à privilégier.

LIGNE URBAINE DE RABATTEMENT OU DE QUARTIER



Caractéristiques

- Petite à moyenne capacité (minibus ou bus standard)
- Capacité d'accélération et de freinage important
- Rayon d'action **moyennement important**
- Pollution et bruit important
- Gabarit des véhicules restreint

Option A **Hybride hydrogène/électrique**

Option B **Biogaz**

Option C **Bus électrique**

Le bus à hydrogène est extrêmement intéressant dans cette situation, tout comme le bus au (bio)gaz. Leur grande autonomie permettrait une exploitation intéressante de ces lignes. Reste à mettre en place les conditions cadres pour limiter les coûts et contraintes d'approvisionnement.

CONSEILS EN SITUATION, SUITE

LIGNE RÉGIONALE AVEC FAIBLES PENTES



Caractéristiques

- Capacité moyenne (bus standard)
- Puissance nécessaire moyenne
- Rayon d'action important
- Pollution et bruit moyennement important

Option A

Bus électrique

Option B

Hybride hydrogène/électrique

Cette situation est celle des lignes «de campagne» où le bus électrique est une solution intéressante, pour autant que son autonomie soit adaptée, en raison de sa réserve de puissance et de son silence.

Le bus à hydrogène pourrait également s'y adapter si les coûts et contraintes d'approvisionnement diminuent, et si une fréquentation élevée de la ligne permet un bon taux de couverture.

LIGNE RÉGIONALE AVEC FORTES PENTES



Caractéristiques

- Capacité moyenne (bus standard)
- **Puissance nécessaire élevée**
- Rayon d'action important (plus de 400 [km])
- Impact visuel important
- Pollution et bruit moyennement important
- Climat hivernal marqué

Option A

Biogaz

Option B

Diesel

Le bus électrique n'est pas adapté au profil «montagne» en raison de sa trop faible autonomie, et le bus hybride y serait pénalisé par sa faible puissance. Le gaz est une solution si l'approvisionnement s'y prête, à plus forte raison si des centrales à biogaz permettent de valoriser les déchets locaux. A défaut, le diesel restera une référence pour ce contexte.

COMMENTAIRES

A PROPOS DE LA CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE

Le chauffage en hiver peut entraîner une consommation supplémentaire de l'ordre de 50%! (selon tests réalisés sur des trolleybus).

Il est dès lors indispensable de choisir des bus avec une bonne **isolation thermique** (qui sert également d'isolation phonique!). D'autre part, le **niveau thermique de confort** pourrait peut-être être légèrement abaissé (les passagers n'enlevant généralement pas leurs manteaux dans un bus).

Les conducteurs ont une responsabilité dans la consommation énergétique des bus. Une nette diminution de la consommation est possible en adoptant une **conduite «éco»**, et ce, quel que soit le mode de propulsion du bus.

ADÉQUATION DES TECHNOLOGIES



Ligne urbaine principale
à forte capacité

Ligne urbaine principale
à forte pentes

Ligne urbaine de rabat-
tement ou de quartier

Ligne régionale avec
faibles pentes

Ligne régionale avec
fortes pentes

Trolleybus conventionnel					
Trolleybus à batterie - «Trolley+»					
Bus électrique à recharge rapide					
Bus électrique «Electrobus»					
Bus hybride Diesel + Electrique					
Bus à hydrogène (pile à combustible)					
Bus à gaz / à biogaz					
Bus diesel / à biodiesel					

- Bonne adéquation entre la technologie et la situation décrite
- Adéquation entre la technologie et la situation selon certaines conditions ou tendances d'évolution