

---

# Mise au point d'un outil de conseil pour l'achat de bus électriques

Gzim Kryeziu et Michael Brack, ZHAW School of Engineering

## Mentions légales

Publication du Prix LITRA n° 5

*Mise au point d'un outil de conseil pour l'achat de bus électriques*

Berne, le 17 mars 2017

Rédaction: Michael Brack et Gzim Kryeziu

Tribune: Simon Gely, PostAuto AG et Alex Naef, Hess AG

Réalisation: Michael Ruefer, LITRA

Mise en page: KALUZA + SCHMID GmbH

Impression: A. Walpen AG

Copyright: LITRA

Tirage: 500

## Publications du Prix LITRA

Chaque année, la LITRA récompense des travaux de bachelor et de master consacrés aux transports publics. Elle souhaite ainsi stimuler la recherche sur les transports publics et inciter les étudiants à s'intéresser

à ce sujet. Une sélection de travaux lauréats est éditée dans la série Publications du Prix LITRA à l'attention d'un public d'experts intéressé.

## Les auteurs

Gzim Kryeziu et Michael Brack ont passé leur bachelor à la ZHAW (Haute Ecole zurichoise des Sciences appliquées) dans la filière Systèmes de transport. En juin 2016, ils ont soumis leur mémoire de bachelor *Mise au point d'un outil de conseil pour l'achat de bus électriques* sous la direction principale de Dr. Ing. Thomas Sauter-Servaes. Ce travail a vu le jour en coopération avec Siemens Mobility Suisse et a obtenu le Prix LITRA 2016. Michael Brack travaille depuis septembre 2016 chez Porta AG à Zurich dans le domaine de la planification du trafic. Gzim Kryeziu travaille à partir de 2017 chez Rapp AG dans le domaine du trafic et du transport.



Gzim Kryeziu



Michael Brack

# Résumé

---

Attendu L'augmentation mondiale des températures provoquée par les gaz à effet de serre, un accord a été signé lors de la Conférence de Paris de 2015 sur le climat afin de freiner cette hausse. Étant donné que les transports contribuent largement à cette augmentation, il faudrait encourager les moyens de transport de masse tels que le bus. Pour déployer davantage les avantages écologiques du bus, il est nécessaire de passer au moteur électrique. Le potentiel en Suisse est vaste: quelque 5000 bus diesel sont actuellement en circulation sur les routes suisses.

L'objectif de la présente étude consiste à mettre au point un outil de conseil convivial pour L'achat de bus électriques. L'outil de conseil est le produit d'une analyse quantitative de la rentabilité et d'une évaluation qualitative des facteurs environnement, flexibilité, expérience et faisabilité. L'étude compare les bus diesel, hybrides, à pile à combustible et à batterie.

L'observation de la rentabilité se fonde sur les paramètres d'achat à partir de 2016. Sur cette base, une prévision est donnée pour les achats qui seront effectués à partir de 2019. Les paramètres reposent sur une revue systématique de la littérature et sur des entretiens

réalisés en toute autonomie. Différents scénarios sont envisagés afin de prévoir L'évolution future du prix du diesel. Par ailleurs, une analyse de sensibilité concernant L'achat à partir de 2016 est également effectuée afin d'estimer les répercussions que peuvent avoir les différents paramètres.

Il résulte de ces analyses que, dans le cas d'un achat effectué à partir de 2019 supposant un prix moyen du diesel, le bus roulant au diesel demeure le plus avantageux du point de vue économique. Le bus hybride coûte environ 18 % de plus, le bus à pile à combustible environ 94 % et le bus électrique presque 10 %. La flexibilité d'exploitation parle en faveur des bus diesel, hybrides et à pile à combustible. Les bus à pile à combustible et les bus à batterie sont avantageux du point de vue écologique. Parallèlement au bus diesel, le bus hybride est celui qui a été le plus expérimenté. La faisabilité du bus à batterie dépend essentiellement de son utilisation.

On en déduit que L'électrification des bus des transports publics roulant au diesel sur les routes suisses peut grandement contribuer à la réalisation des objectifs climatiques.



# Table des matières

---

Résumé .....	3
1 Délimitation du système .....	6
2 Méthodologie d'élaboration de l'outil de conseil pour l'achat de bus électriques .....	7
2.1 Méthodologie de l'analyse de la rentabilité .....	7
2.2 Méthodologie de l'analyse de faisabilité .....	7
2.3 Méthodologie de l'évaluation des facteurs environnement, flexibilité et expérience .....	8
3 Résultats de l'outil de conseil pour l'achat de bus électriques .....	10
3.1 Résultat de l'analyse de rentabilité .....	10
3.2 Résultat de l'analyse de faisabilité .....	12
3.3 Résultat de l'évaluation des facteurs environnement, flexibilité et expérience .....	13
4 Discussion .....	15
4.1 Bilan .....	15
4.2 Perspectives .....	15
5 Références bibliographiques .....	18
Les expériences faites par CarPostal dans le domaine de la motorisation alternative .....	20
Coup d'envoi pour les bus électriques en milieu urbain .....	22

# 1 Délimitation du système

L'e-mobilité inclut différentes motorisations. La diversité des bus électriques s'explique par la demande en systèmes électriques capables de concurrencer le bus diesel. En conséquence, il faut constater qu'aucun système de bus électrique ne s'est établi à ce jour sur le marché. D'une manière générale, la motorisation des bus électriques peut se diviser en trois catégories : les trolleybus, les bus à batterie et les bus hybrides.

De même, chacune de ces catégories présente plusieurs variantes, même si elles s'articulent toutes autour d'un groupe motopropulseur électrique. Ce dernier se compose de la batterie, de l'électricité de traction et

du moteur électrique. Conformément aux exigences, différentes variantes d'alimentation en énergie et de production d'énergie doivent être réalisées (cf. Baguette 2013, 16). Pour garantir la comparabilité des différents modes d'entraînement, les bus ici comparés sont des bus standard.

La présente étude analyse les systèmes de bus électrique décrits ci-dessous. L'outil de conseil sera conçu de manière à pouvoir comparer, si besoin, des systèmes de bus similaires, et à y ajouter des réflexions. Le bus diesel sert de système de référence.

Système de bus	Désignation suivante	Avantages	Inconvénients
Bus à batterie à charge conductive aux terminus	Bus à batterie	<ul style="list-style-type: none"><li>· Faibles coûts d'exploitation</li><li>· Pas d'émission de CO<sub>2</sub> sur le lieu d'intervention</li><li>· Silencieux</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>· Frais d'investissement élevés</li><li>· Flexibilité moindre</li><li>· Absence d'expérience sur le long terme</li></ul>
Bus hybride die-sel à entraînement parallèle	Bus hybride	<ul style="list-style-type: none"><li>· Plus faible émission de CO<sub>2</sub> sur le lieu d'intervention</li><li>· Légère réduction du bruit</li><li>· Consommation moindre de carburant</li><li>· Flexibilité assurée</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>· Frais d'investissement élevés</li><li>· Frais de maintenance élevés</li><li>· Peu d'expérience sur le long terme</li></ul>
Bus à pile à combustible à moteur série	Bus à pile à combustible	<ul style="list-style-type: none"><li>· Pas d'émission de CO<sub>2</sub> sur le lieu d'intervention</li><li>· Silencieux</li><li>· Flexibilité assurée → autonomie plus courte que celle du bus diesel</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>· Frais d'investissement très élevés</li><li>· Absence d'expérience sur le long terme</li></ul>

**Tableau 1:** Avantages et inconvénients des systèmes de bus étudiés

# 2 Méthodologie d'élaboration de l'outil de conseil pour l'achat de bus électriques

L'outil de conseil pour l'achat de bus électriques comporte les champs suivants qui seront pré-sentés plus en détail par la suite: analyse de rentabilité, environnement, flexibilité, expérience et faisabilité. L'accent est d'abord mis sur l'analyse de la rentabilité, cette dernière étant citée comme le critère le plus important par les compagnies de bus (cf. Böckmann 2016) (cf. Schödler 2016). Les facteurs environnement, flexibilité, expérience et faisabilité sont étudiés de manière plus succincte.

## 2.1 Méthodologie de l'analyse de la rentabilité

Le défi de l'analyse de la rentabilité réside dans la comparabilité des différents systèmes de propulsion. Pour pouvoir calculer les coûts, il est donc nécessaire d'observer la totalité des frais sur toute la durée de détention du véhicule. L'analyse de la rentabilité est réalisée à l'aide du modèle TCO. « Le modèle TCO tient compte de tous les paramètres constitutifs des coûts pertinents pendant toute la durée de détention du véhicule » (Hacker et al. 2015, 11). En d'autres termes, l'investissement de remplacement de la première flotte n'est pas analysé plus en détail. Pour ce qui est des différents systèmes d'entraînement des véhicules, le modèle TCO prend en compte les paramètres de coûts suivants:

- Anschaffungspreis
  - Prix d'achat
  - Frais de maintenance, d'entretien et de réparation du véhicule
  - Frais de carburant
  - Coût de l'infrastructure de recharge
  - Frais d'entretien/de maintenance des bornes de recharge
  - Amortissements fiscaux
  - Valeur résiduelle en fin de détention
  - Assurance
- (cf. Hacker et al. 2015, 11-12)

Afin de diminuer la complexité de l'analyse, le modèle TCO applique un calcul statique de comparaison des coûts. Les seules valeurs dynamiques prises en compte sont celles des prix du carburant et des batteries, étant donné qu'une modification relativement importante de ces paramètres est attendue.

L'observation des coûts porte sur l'analyse de deux années d'achat, à savoir 2016 et 2019. L'année d'achat 2016 sert de base aux prévisions de l'année 2019. Ceci permet de prendre en compte les réductions escomptées sur les frais d'achat des véhicules.

L'incidence des différents paramètres sur le modèle TCO est révélée par une analyse de sensibilité. L'analyse de sensibilité se fonde sur l'année d'achat 2016. L'analyse de sensibilité n'est pas visible dans la présente version.

Les différents paramètres sont définis sur la base d'une recherche documentaire systématique et d'entretiens personnels. La réflexion corollaire approfondie relative aux paramètres n'est pas visible dans la présente version. Les paramètres choisis sont visibles dans l'outil de conseil.

## 2.2 Méthodologie de l'analyse de faisabilité

Ce chapitre vérifie uniquement la faisabilité du bus à batterie. Les autres systèmes de bus présentent une autonomie suffisamment grande en service régulier (cf. HMWEVL 2015, 21/31).

Pour la mise en service du bus à batterie, il est conseillé que la quantité d'énergie rechargée aux terminus soit au moins égale à la consommation sur le parcours. Par ailleurs, il est recommandé de pouvoir ignorer trois bornes de recharge consécutives afin de garantir une disponibilité élevée.

---

## « La capacité de la batterie détermine, avec la consommation durant le parcours, le nombre de bornes de recharge consécutives pouvant être omises. »

---

### *Consommation électrique sur le parcours*

La consommation électrique sur le parcours doit prendre en compte les heures de pointe. C'est la seule manière de garantir la disponibilité, indépendamment de la saison. L'Öko-Institut indique une valeur maximale de 2,6 kWh/km (cf. Hacker et al. 2015, 28-30). Il est cependant considéré comme judicieux de ne pas se baser sur la valeur de consommation maximale, étant donné que le fait de pouvoir ignorer trois possibilités de recharge inclut déjà des réserves. Par ailleurs, on peut partir du principe que cette consommation maximale n'est pas permanente.

Pour simplifier la faisabilité, une consommation maximale moyenne de 2,2 kWh est définie, incluant différents facteurs tels que la topologie, etc.

### *Quantité d'énergie chargée aux terminus*

La quantité d'énergie chargée aux terminus dépend d'une part de la performance du système de recharge rapide et d'autre part du temps de battement au terminus.

Siemens AG et ABB Ltd proposent par exemple des systèmes de charge rapide de 150, 300 ou 450 kW (Siemens AG 2016) (ABB Ltd AG 2015, 1). Pour son système de charge rapide de 300 kW, Siemens AG indique une puissance de charge pouvant atteindre 5 kW/min (Siemens 2015, 7). L'analyse de faisabilité de la présente étude repose sur cette puissance.

Le temps de battement détermine le temps de chargement du système de recharge rapide. Pour ce faire, un temps de battement technique de 15 secondes (s) est déduit du temps de battement défini par l'horaire. Les 15 s supposées incluent le couplage automatique nécessaire pour le rechargement du système. L'analyse des vidéos afférentes permet d'estimer le rechargement est à 3 à 6 s (cf. Volvo Bus Suisse 2016) (cf. ABB Ltd. 2016). Le temps de battement lié à l'horaire est supposé être de 5 min.

### *Capacité de la batterie du bus électrique*

La capacité de la batterie détermine, avec la consommation durant le parcours, le nombre de bornes de recharge consécutives pouvant être omises.

Aux heures de circulation de pointe (HCP) ou en cas d'événements exceptionnels, il est d'usage pour les TP de ne pas respecter les temps de battement. Pour pouvoir garantir la disponibilité du bus à batterie, il est donc important de pouvoir ignorer trois possibilités de recharge. Sur une ligne fortement sujette aux retards, il doit éventuellement être possible d'ignorer davantage de bornes de recharge. Ceci dépend fortement de la ligne et de la société de transport. Au cours de l'entretien, l'entreprise VBZ (Verkehrsbetriebe Zurich) indique qu'en principe, une ligne fortement sujette aux retards doit pouvoir ignorer cinq possibilités de rechargement durant les HCP (cf. Böckmann 2016).

### **2.3 Méthodologie de l'évaluation des facteurs environnement, flexibilité et expérience**

Les entretiens avec la BLT et les VBZ ont montré que les facteurs environnement, flexibilité et expérience sont pris en compte dans le processus d'achat.

L'évaluation de ces aspects tient compte des avantages et des inconvénients des systèmes de bus (cf. chapitre 1, délimitation du système). Les avantages et les inconvénients reposent sur différentes sources retenues pour l'évaluation. Les trois aspects sont évalués à l'aide de l'échelle définie dans le tableau 2.

Les niveaux d'évaluation et leur signification	
--	Très mauvais
-	Mauvais
O	Satisfaisant
+	Bon
++	Très bon

**Tableau 2:** Échelle d'évaluation des facteurs de l'outil-conseil

### **Le facteur environnement**

L'importance du facteur environnement varie selon la stratégie poursuivie par l'entreprise de transport. En Suisse, il s'agit toujours de sociétés de transport concessionnaires qui sont en partie fortement tributaires de la stratégie de leur donneur d'ordre respectif.

Il est difficile de chiffrer les coûts effectifs engendrés par un système de bus néfaste pour l'environnement. Ceci dépend aussi fortement de la délimitation du système. C'est la raison pour laquelle les émissions nocives ne sont pas analysées plus en détail. Les systèmes de bus sont uniquement évalués du point de vue de leur performance environnementale. Dans la présente étude, seules les émissions sur le lieu d'exploitation sont prises en compte. Ceci inclut les émissions de CO<sub>2</sub> et les nuisances sonores sur le lieu d'exploitation.

### **Le facteur flexibilité**

Ce facteur est considéré comme très important, car il est étroitement lié à la rentabilité. Une faible flexibilité, c'est-à-dire que certains véhicules ne peuvent être exploités que sur une seule ligne, entraîne des coûts supplémentaires (cf. Schödler 2016). Ces coûts sont également difficiles à chiffrer. C'est la raison pour laquelle ils sont intégrés à l'outil de conseil au moyen de la méthode « évaluation ».

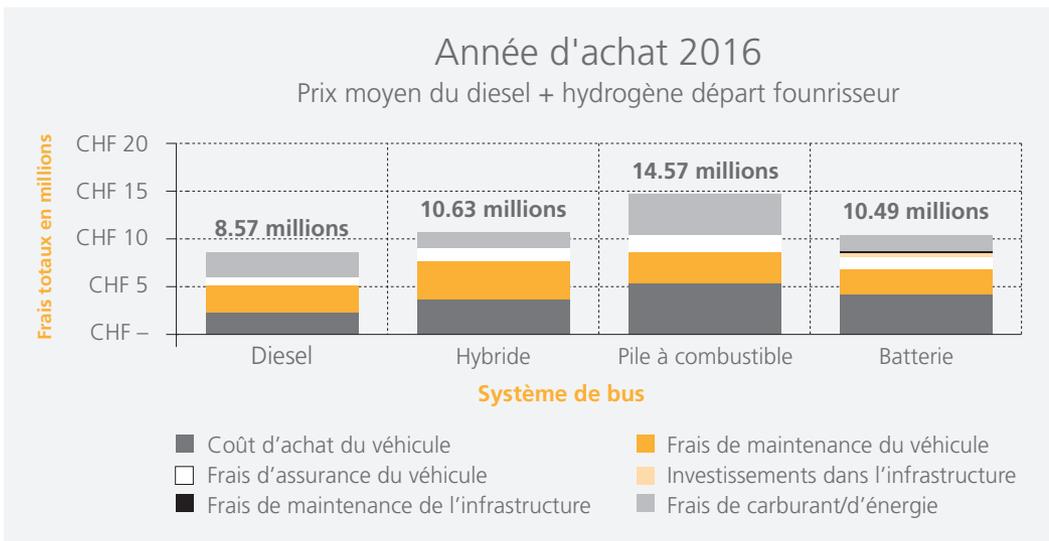
Une note élevée en termes de flexibilité indique que chaque bus peut être utilisé sur toutes les lignes.

### **Le facteur expérience**

Les entretiens menés avec la BLT et les VBZ ont révélé que les achats importants sont uniquement réalisés sur des systèmes de bus déjà établis. Les technologies plus récentes sont toujours dans un premier temps exploitées à l'essai. Ces essais permettent notamment de déterminer la disponibilité et les coûts d'exploitation (cf. Böckmann 2016) (cf. Schödler 2016).

C'est la raison pour laquelle les systèmes de bus sont évalués selon le critère de l'expérience. Une mauvaise note en termes d'expérience indique qu'un essai est nécessaire, et que l'on possède peu d'expérience à ce jour avec le système de bus en question.

# 3 Résultats de l'outil de conseil pour l'achat de bus électriques



**Illustration 1:** TCO Année d'achat 2016 - Prix moyen du diesel + hydrogène départ fournisseur

Ce chapitre présente les résultats de l'outil de conseil. Il indique d'abord les résultats de l'analyse de rentabilité, ensuite ceux de l'analyse de faisabilité, et enfin les résultats des facteurs environnement, flexibilité et expérience.

### 3.1 Résultat de l'analyse de rentabilité

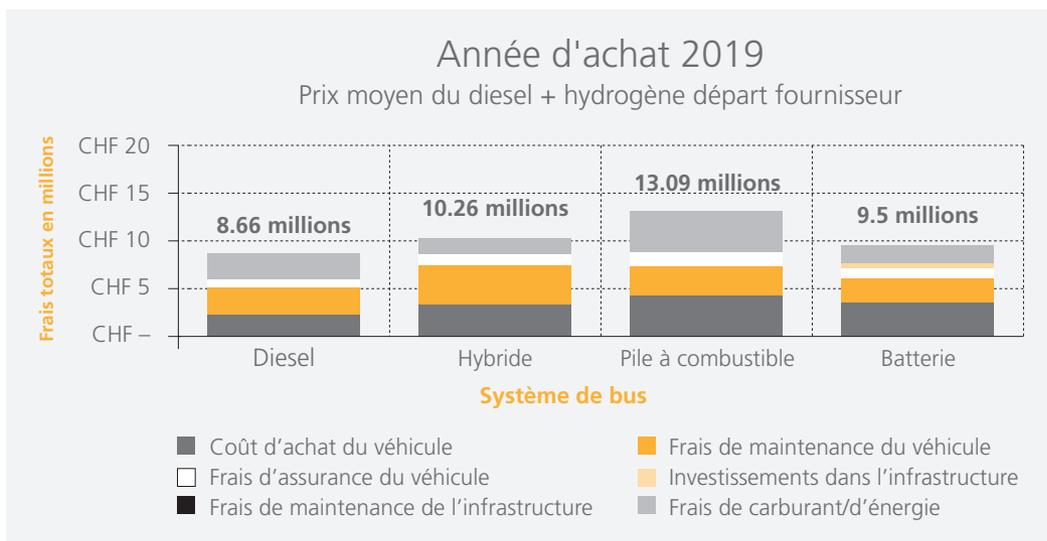
Les différents cas de figure n'ayant pas donné de grandes différences, seuls les résultats affichant la croissance moyenne du prix du diesel sont présentés dans le présent document.

Du fait des très mauvais résultats obtenus, en termes de rentabilité, par le bus à pile à combustible produisant lui-même son hydrogène, les résultats présentés ici sont ceux du bus à pile à combustible qui se fournit extérieurement en hydrogène. Ce modèle est tout à fait envisageable à l'avenir. Le prix de l'hydrogène départ fournisseur se situe entre 5,50 et 11 CHF (cf.

Seraidou 2016). Le présent cas de figure se base sur un prix moyen d'hydrogène de 8,25 CHF. Les coûts de l'infrastructure de production d'hydrogène peuvent ainsi être ignorés. Dans un esprit de simplification, on suppose que le coût du carburant reste constant sur toute la durée de détention du véhicule.

#### Année d'achat 2016

- Le bus diesel est de 1,92 million de CHF moins cher, soit 18,3 %, que le bus à batterie.
- Le bus à batterie est de 140 000 CHF moins cher, soit 1,3 %, que le bus hybride. Le bus à batterie présente donc les coûts d'exploitation annuels les moins élevés.
- Le bus à pile à combustible arrive clairement en dernière position.
- Les coûts d'achat des véhicules demeurent élevés.
- Le coût du carburant a diminué de 1,16 million de CHF par rapport au prix du carburant en autoproduction.



**Illustration 2:** TCO Année d'achat 2019 - Prix moyen du diesel + hydrogène départ fournisseur

#### Année d'achat 2019

Pour l'année d'achat 2019, les paramètres d'acquisition des véhicules doivent être adaptés, ce qui se répercute à son tour sur les frais d'assurance annuels des véhicules.

- Le bus diesel est de 840 000 CHF moins cher, soit 8,84 %, que le bus à batterie.
- Le bus à batterie est de 760 000 CHF moins cher, soit 7,41 %, que le bus hybride.
- Le bus à pile à combustible reste le système le plus coûteux, mais la différence par rapport au bus hybride classé en troisième position n'est plus aussi marquée.
- Le bus à pile à combustible est de 2,83 millions de CHF plus onéreux, soit 21,6 %, que le bus hybride.
- Le coût du carburant a diminué de 1,25 million de CHF par rapport au prix du car-burant en autoproduction.

### Parameterübersicht der Machbarkeitsprüfung

Puissance de charge	5 kW/min
Temps de charge = temps de battement défini par l'horaire – temps de battement technique – couplage automatique	4,75 min
Consommation d'électricité	2,2 kWh/km
Longueur du parcours	8 km
Capacité de la batterie	80 kWh/km

**Tableau 3:** Liste des paramètres de l'analyse de faisabilité

### 3.2 Résultat de l'analyse de faisabilité

Pour la faisabilité du bus à batterie, il est conseillé d'une part que la consommation d'électricité durant le trajet soit inférieure à l'électricité chargée au terminus; d'autre part, la capacité de la batterie du bus doit lui permettre de se passer de trois stations de chargement consécutives.

Dans les chapitres suivants, on commencera par expliquer les résultats de l'exemple d'application, c'est-à-dire que l'on analyse dans quelle mesure le système de bus à batterie respecte les points susmentionnés. En cas d'échec au contrôle de faisabilité, des améliorations seront proposées. Le tableau 3 comporte la liste des paramètres appliqués dans le cadre du contrôle de faisabilité.

### Exemple d'application

*Consommation d'électricité <= Quantité d'énergie chargée*

Quantité d'énergie chargée au terminus :	
Performance de charge	
*Temps de charge	= 23,75 kWh
Consommation d'électricité durant la conduite :	
Consommation d'électricité du bus à batterie	
*Longueur du parcours	= <u>-17,6 kWh</u>
	<u>6,15 kWh</u>

Dans le présent exemple d'application, la consommation d'électricité est inférieure à la quantité d'énergie chargée. Ce critère est donc satisfait dans l'étude de faisabilité.

### Ignorer trois stations de charge

Pour pouvoir se passer de trois stations de charge consécutives, la capacité de la batterie doit être quatre fois supérieure à la consommation d'électricité durant le temps de conduite.

Capacité de la batterie - 4\*la consommation d'électricité (durant le temps de conduite) = 9,6 kWh

La capacité de la batterie utilisée dans le présent exemple d'application permet d'ignorer trois stations de charge. Ce critère est donc lui aussi satisfait dans l'étude de faisabilité.

Système de bus	Environnement	Flexibilité	Expérience
Bus diesel	--	++	++
Bus hybride	0	++	+
Bus à pile à combustible	++	+	-
Bus à batterie	++	0	0

**Tableau 4:** Résultats de l'évaluation en termes d'environnement, de flexibilité et d'expérience

### Améliorations

En cas d'échec au contrôle de faisabilité, il existe différentes solutions susceptibles d'améliorer le système de bus à batterie. La section suivante explique les différentes formes d'amélioration possibles et leurs conséquences. Les premières améliorations proposées concernent les cas où la consommation d'électricité est supérieure à la quantité chargée. Les améliorations présentées ensuite sont indiquées s'il n'est pas possible d'ignorer trois stations de charge consécutives.

#### Consommation d'électricité > quantité chargée

En cas d'échec à ce contrôle de faisabilité, il existe en principe deux formes d'amélioration possibles.

D'une part, il est possible d'augmenter la puissance de charge du système de recharge rapide, c'est-à-dire de remplacer la station de charge de 300 kW par une station de 450 kW. Ceci n'a aucune conséquence sur les horaires, mais des conséquences financières. Une station de charge plus puissante est plus onéreuse.

Par ailleurs, il est possible d'augmenter le temps de battement et donc le temps de charge. Ceci peut impliquer la mise en circulation de davantage de bus sur la ligne concernée. Pour des questions d'horaires, il n'est pas toujours possible d'augmenter à convenance le temps de battement.

#### Ignorer 3 stations de charge

En cas d'échec au contrôle de faisabilité, il existe en principe deux formes d'amélioration envisageables.

Soit il faut augmenter la capacité de la batterie, ce qui fait grimper le coût d'achat du bus à batterie, soit il est possible d'ignorer deux stations de charge seulement, solution tout à fait envisageable sur les lignes qui ne sont pas sujettes aux retards

#### Conversion du système de charge

Une dernière possibilité consiste à passer à un autre système de recharge pour le bus à batterie. Ainsi, le bus à batterie pourrait par exemple être rechargé tous les quatre arrêts. Le temps de charge est alors très court. Ceci peut requérir quelques aménagements au niveau des horaires et engendrer des coûts supplémentaires dus au nombre plus élevé de bornes de recharge rapide.

---

## « Le rayon d'action du bus à batterie est limité dans la mesure où il est dépendant des stations de recharge rapide. »

---

### 3.3 Résultat de l'évaluation des facteurs environnement, flexibilité et expérience

Les résultats de l'évaluation se fondent sur différentes sources. Le tableau suivant présente les résultats de l'évaluation. Les résultats sont ensuite expliqués plus en détail dans les chapitres suivants.

#### *Le facteur environnement*

L'évaluation du facteur environnement résulte de l'application d'une part de l'étude « Les piles à combustible dans les transports publics » réalisée par le ministère de l'Économie, de l'Énergie, du Transport et du Développement du territoire de la Hesse (HMWEVL) et d'autre part de l'étude « Technologies de motorisation pour les bus d'aujourd'hui et de demain » réalisée par clean feets.

Le bus diesel est celui qui émet le plus de CO<sub>2</sub> et de nuisances sonores, ce qui explique qu'il reçoive la plus mauvaise note. Pour ce qui est du bus hybride, la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> dépend des économies faites en matière de consommation de carburant qui sont à proportion considérées comme faibles. Par ailleurs, le bus hybride n'apporte qu'une faible réduction du bruit. De ce fait, le bus hybride reçoit la mention « satisfaisant » en termes d'environnement. Le bus à pile à combustible et le bus à batterie n'émettent pas de CO<sub>2</sub> localement. Ces deux systèmes sont par ailleurs ceux qui présentent le niveau de bruit le plus bas. Par conséquent, les bus à pile à combustible et les bus à batterie obtiennent la meilleure note (cf. HMWEVL 2015, 21/31) (cf. Weibel 2014, 17).

#### *Le facteur flexibilité*

Pour évaluer le facteur de la flexibilité, nous considérons en premier lieu l'étude du HMWEVL « Les piles à combustible dans les transports publics » à laquelle nous ajoutons nos propres réflexions.

L'autonomie, et donc la flexibilité, est indiquée comme étant suffisamment grande pour les bus diesel, hybrides et à pile à combustible en service régulier (cf. HMWEVL 2015, 21). Dans l'évaluation, il faut

cependant tenir compte du fait que le bus à pile à combustible implique la construction de stations-service à hydrogène entraînant une certaine dépendance. Les bus à pile à combustible doivent toujours être ramenés au même dépôt. Ceci est susceptible de restreindre leur rayon d'intervention.

Le rayon d'action du bus à batterie est limité dans la mesure où il est dépendant des stations de recharge rapide. Il peut donc uniquement être utilisé sur des parcours équipés de stations de recharge rapide. L'analyse de faisabilité indique toutefois qu'il garantit malgré tout une certaine flexibilité (cf. chapitre 3.2 Résultats de l'analyse de faisabilité). Il est par exemple possible d'ignorer plusieurs stations de recharge. Pour le reste, les restrictions dépendent fortement de l'étendue du réseau de bus à batterie mis en place. En d'autres termes, plus il existe de lignes équipées de stations de recharge rapide, plus les limites en matière de flexibilité sont repoussées. Et les bus à batterie peuvent circuler sur plusieurs lignes différentes. Pour toutes les raisons évoquées précédemment, la flexibilité est considérée comme « satisfaisante ».

#### *Le facteur expérience*

L'étude de cenex « Green Fleet Technology Study for Public Transportation » a servi de base à l'évaluation de l'expérience. Elle montre le niveau technique de différentes technologies de motorisation (cf. Carroll 2015, 12-13).

Le bus diesel n'est pas pris en compte comme référence par cenex. Il est cependant tout naturel que le bus diesel obtienne la meilleure note en matière d'expérience. À ce jour, c'est probablement le système de bus le plus utilisé dans le monde. Jusqu'à présent, le bus hybride a su bien s'imposer sur le marché. C'est le système de bus électrique qui obtient les meilleurs résultats en termes d'expérience. Il est suivi du bus à batterie. Comparé au bus diesel, au bus hybride et au bus à batterie, le bus à pile à combustible présente la valeur empirique la plus faible.

# 4 Discussion

---

## 4.1 Bilan

Les résultats révèlent que les écarts financiers entre les bus diesel et électriques demeurent. Ces différences ont cependant tendance à s'estomper. Le bus à batterie est le moins cher des bus électriques. En supposant un achat à partir de 2019 et une évolution optimiste du prix du die-sel, il demeurerait environ 10 % plus onéreux que le bus diesel. Le bus à batterie marque des points en termes d'environnement, alors qu'il s'avère moins performant pour ce qui est de la flexibilité et de l'expérience.

En prenant la même hypothèse de départ, le bus hybride est au moins 16 % plus onéreux que le bus diesel, mais il présente un avantage sur le plan écologique étant donné qu'il consomme moins de diesel. Il est par ailleurs tout aussi flexible que le bus diesel, et c'est le système de bus électrique qui affiche le plus de points au niveau de l'expérience.

Le bus à pile à combustible est actuellement environ deux fois plus cher, mais c'est aussi le bus qui devrait connaître la plus forte baisse de prix. En termes d'environnement, il est clairement meilleur que le bus diesel. Avec son réservoir à hydrogène, il affiche une flexibilité comparable. Il est en revanche en retrait en ce qui concerne l'expérience.

Il convient de mentionner que pour tous les bus électriques, la note positive obtenue pour le facteur environnement dépend fortement de la manière dont l'énergie électrique ou l'hydrogène utilisés sont produits. Il faudra s'efforcer d'utiliser des énergies renouvelables et de renoncer le plus possible aux énergies fossiles. Une intensification de la recherche dans le domaine du re-cyclage des batteries et de leur réemploi est également nécessaire.

À l'heure actuelle, les sociétés de transports publics doivent se demander quel prix elles sont prêtes à payer en faveur de l'environnement. Pour finir, il ne s'agit même pas d'une décision qui appartient aux seules sociétés de transports publics, étant donné qu'elles sont en grande partie financées par les pouvoirs publics. La question doit donc être transmise à la

fonction publique. Les VBZ sont par exemple autorisés à acheter un nouveau système de bus électrique qui pourra coûter 10 % de plus sur toute la durée de son exploitation. Dans la présente étude, le bus à batterie remplit cette exigence (Böckmann 2016).

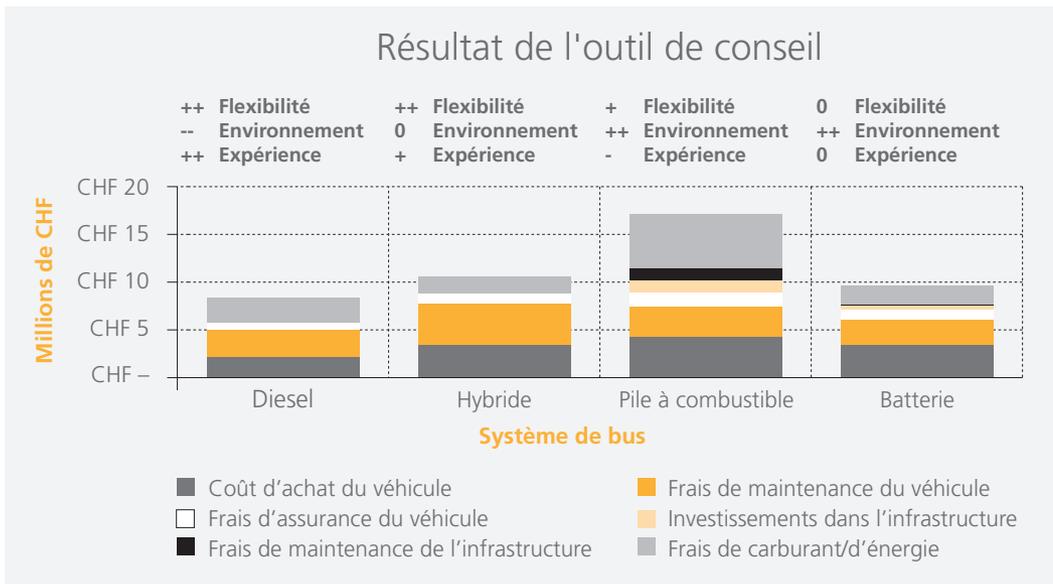
L'outil de conseil mis au point pour la présente étude est un moyen facile et rapide d'évaluer les différents systèmes de bus. La rentabilité est toujours considérée comme le critère le plus important à l'achat des bus. Grâce à l'outil de conseil, les utilisateurs peuvent obtenir sans grande difficulté une estimation consolidée des coûts totaux.

## 4.2 Perspectives

L'évolution du cadre politique est difficilement prévisible, bien qu'il puisse avoir une influence importante. Les fluctuations de la politique des prix énergétiques sont déterminantes pour les coûts d'exploitation. On peut aussi imaginer qu'il y ait un jour des restrictions, voire des interdictions de circuler pour certains types de véhicules. Par ailleurs, l'État peut décider d'accorder des programmes de soutien aux systèmes de bus électriques.

Les bus diesel se sont considérablement améliorés ces dernières années en matière d'émissions. Du fait de la nouvelle norme européenne d'émission EURO VI, les émissions de particules (PM) tout comme les émissions d'oxyde d'azote (NOx) ont pu être encore une fois nettement réduites en comparaison à EURO IV ou EURO V. Une nouvelle avancée technologique dans ces domaines n'est pas en vue actuellement, étant donné qu'il s'agit ici d'un mode de propulsion déjà extrêmement perfectionné (Wolff 2015, 7-8).

Pour ce qui est du bus hybride, les résultats des différents essais sont très différents. Les VBZ et la BLT ont testé le même bus hybride, mais obtenu des résultats différents en termes de disponibilité et d'économies sur la consommation de diesel. Les VBZ sont très satisfaits des résultats obtenus avec le bus hybride, tandis que la BLT constate une disponibilité et des économies de diesel minimales par rapport au



**Illustration 3:** Résultats de l'outil de conseil pour les valeurs par défaut

bus diesel (EURO VI). On en déduit que l'efficacité du bus hybride dépend fortement de la ligne à laquelle il est affecté (Böckmann 2015) (Schödler 2015). Les problèmes que le bus hybride a rencontrés au départ semblent être résolus. Étant donné que cette technique de propulsion n'est pas encore très perfectionnée, il y a lieu de penser que le potentiel en matière d'économies de carburant, de performance et de disponibilité n'est pas encore épuisé.

Le plus grand avantage du bus à pile à combustible est unique en son genre. Le bus à pile à combustible est le seul véhicule à posséder pratiquement la flexibilité d'exploitation d'un bus diesel tout en affichant un potentiel d'émission zéro. En revanche, les coûts totaux du bus à pile à combustible sont élevés (cf. Ammermann et al. 2015, 5). C'est pour le bus à pile à combustible que l'on escompte la plus grande évolution du prix au cours des années à venir. Ce bus va ainsi devenir de plus en plus concurrentiel (cf. Ammermann et al. 2015, 5). On suppose également que le nombre de stations-service à hydrogène en Suisse va augmenter à

l'avenir. La première station-service accessible au public doit ainsi être inaugurée fin 2016 à Schafisheim (cf. Brühwiler 2016). Ceci pourrait faire nettement baisser le prix du carburant du bus à pile à combustible.

À l'heure actuelle, le bus à batterie est sans doute la seule solution raisonnable sur le plan financier lorsque l'on veut exploiter des bus à zéro émission de CO<sub>2</sub>. On suppose que le prix du bus à batterie va continuer à baisser au cours des années à venir. Un grand progrès est attendu au cours des prochaines années au niveau de la batterie. Elle sera plus légère tout en étant plus puissante. On part du principe que dans 8 à 10 ans, la batterie sera moitié moins lourde, mais deux fois plus puissante, ceci notamment grâce à de nouvelles cellules obéissant à une technique chimique (cf. Köbel 2016). Par ailleurs, une évolution favorable est pressentie quant à l'efficacité de la consommation électrique durant le trajet. Cette dernière augmente de 15 % avec le moteur moyen (battery to wheel). Le moteur est dans ce cas entièrement intégré dans la roue (cf. Klett 2016).



# 5 Références bibliographiques

**ABB Ltd. AG (2015):** *ABB liefert Schnellladeroboter für öffentliche Busse. ABB liefert Schnellladelösung für nachhaltigen und emissionsfreien ÖPNV nach Luxemburg.* Zurich. ABB Ltd AG.

**ABB Ltd. AG (2016):** *Flash charging an electric bus in 15 seconds.*

URL: <https://www.youtube.com/watch?v=c-Fg94A2Vko>

[Version: 18/05/2016]

**Ammermann, Heiko et al. (2015):** *Fuel Cell Electric Buses – Potential for Sustainable Public Transport in Europe. A Study for the Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking.* Munich. Roland Berger GmbH.

**ARE, Office fédéral du développement territorial / OFS, Office fédéral de la statistique (2012):** *La mobilité en Suisse. Résultats du microrecensement mobilité et transports 2010.*

URL: <http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/11/22/publ.Document.155067.pdf>

[Version: 14/05/2016]

**OFEV, Office fédéral de l'environnement (2015a):** *Paris: Accord sur la politique climatique mondiale.*

URL: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/climat/dossiers/conference-paris-cop21-climat.html>

[Version: 15/05/2016]

**OFEV, Office fédéral de l'environnement (2015b):** *La Suisse réduit les émissions de gaz à effet de serre.*

URL: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/climat/dossiers/conference-paris-cop21-climat/la-suisse-reduit-les-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre.html>

[Version: 15/05/2016]

**Baguette, Stefan (2013):** Batteriebusse im Kontext von Betrieb und Infrastruktur. Herausforderungen und Lösungen für die Elektromobilität. Dans: *Der Nahverkehr, Bd. 2013 (11)*. 16-19.

**OFEN, Office fédéral de l'énergie (2013):** *Message relatif au premier paquet de mesures de la Stratégie énergétique 2050. Efficacité énergétique dans le domaine de la mobilité.*

URL: <https://www.admin.ch/opc/fr/federal-gazette/2013/6771.pdf>

[Version: 14/05/2016]

**Brühwiler, Peter (2016):** *Steht die Wasserstoff-Revolution bevor? „Der Markt könnte explodieren“.* URL: <http://www.aargauerzeitung.ch/aargau/kanton-aargau/steht-die-wasserstoff-revolution-bevor-der-markt-koennte-explodieren-130286350> [Version 08/06/2016]

**Böckmann, Christian:** Entretien avec les Verkehrsbetriebe Zürich (VBZ) le 12/05/2016 à Altstetten, Zurich.

**Carroll, Steve (2015):** *Green Fleet Technology Study for Public Transport. Prepared by Cenex for the Public Procurement of Innovation in Action Network.* Loughborough. Cenex.

**Föhn, Markus (2013):** *Carpools. Mitfahren statt rumstehen.*

URL: [http://www.beobachter.ch/natur/natuerlich-leben/mobilitaet/artikel/carpools\\_mitfahren-statt-umstehen/](http://www.beobachter.ch/natur/natuerlich-leben/mobilitaet/artikel/carpools_mitfahren-statt-umstehen/)

[Version: 14/05/2016]

**Hacker, Florian et al. (2015):** *Wirtschaftlichkeit von Elektromobilität in gewerblichen Anwendungen. Betrachtung von Gesamtnutzungskosten, ökonomischen Potenzialen und möglicher CO<sub>2</sub>-Minderung.* Berlin. Öko-Institut eigener Verein (e.V.)

**Jenk, Martin (2013):** *Elektro- und Hybridbusse. Beschreibung für Projekte zur Emissionsverminderung in der Schweiz.* Zurich. myclimate.

**Klett, Sascha:** *Elektrische Stadtbusse der Zukunft.* Conférence à l'occasion du 7e congrès VDV-Akademie Konferenz Elektrobusse - Markt der Zukunft! le 29/02/2016 à Berlin.

**Köbel, Christian:** *The future of electric mobility in public transport.* Conférence à l'occasion du 7e congrès VDV-Akademie Konferenz Elektrobusse - Markt der Zukunft! le 29/02/2016 à Berlin.

**Lange, Jürgen / Otto, Thomas (2015):** *BeSyystO: Entscheidungsmodell für den ÖPNV mit Elektrobussen. Werkzeug zur Prüfung und Bewertung eines praktikablen und wirtschaftlichen Einsatzes von E-Bussen im ÖPNV.* Dans: *Der Nahverkehr, Bd. 2015 (6)*. 16-21.

**LITRA (2015):** *Les transports en chiffre.* Édition 2015.

URL: <http://www.litra.ch/fr/index.php?section=Downloads&download=347>

[Version: 14/05/2016]

**Neumann, Peter (2016):** *Berliner Elektrobusse stottern in die Zukunft.*

URL: <http://www.berliner-zeitung.de/berlin/verkehr/bvg-berliner-elektrobusse-stottern-in-die-zukunft-23565716>

[Version: 20/05/2016]

**Pelz, Waldemar (2016):** *SWOT-Analyse. Beispiele und Tipps zum Erstellen einer SWOT-Analyse.*

URL: [www.wpelz.de/ress/swot.pdf](http://www.wpelz.de/ress/swot.pdf) [Version: 01/06/2016]

**CarPostal Suisse SA (2015):** *1 million de kilomètres avec des piles à combustible.*

URL: <https://www.postauto.ch/fr/news/1-million-de-kilom%C3%A8tres-avec-des-piles-%C3%A0-combustible>

[Version: 21/05/2016]

**CarPostal Suisse SA (2016):** *L'avenir du bus électrique commence chez CarPostal.*

URL: <https://www.postauto.ch/fr/news/bus-electrique-carpostal>

[Version: 22/05/2016]

**Pütz, Ralph (2013):** *Auf dem Weg zum Elektrobus – Analyse der Lebenszykluskosten verschiedener Busantriebskonzepte.* Bayerbach-Greilsberg. BELICON GmbH.

**Scherrer, Paul / Martin, André (2013):** *H2-Mobility Swiss. Analysis of the Situation to Realize an Initial Market for H2-Vehicles in Switzerland.* Villigen. PSI, Paul Scherrer Institut.

**Schödler, Alfred:** *Entretien avec Baselland Transport AG (BLT) le 17/03/2016 à Oberwil, Bâle-Campagne.*

**Seraïdou, Nikoletta:** *Correspondance électronique avec CarPostal Suisse SA le 04/04/2016.*

**Siemens AG (2015):** *eBus – Schnellladlösungen von Siemens.* Krefeld. Siemens AG.

**Siemens AG (2016):** *Effizienter öffentlicher Nahverkehr ohne Emissionen. Off-board Top-down-Pantograph.*

URL: <http://w1.siemens.ch/mobility/ch/de/topics/elektromobilitaet/Seiten/ladetechnik-ebusse.aspx>

[Version: 16/05/2016]

**BNS, Banque nationale suisse (2016):** *Taux d'intérêt et cours de change actuels.*

URL: [http://www.snb.ch/fr/i/about/stat/statpub/zidea/id/current\\_interest\\_exchange\\_rates](http://www.snb.ch/fr/i/about/stat/statpub/zidea/id/current_interest_exchange_rates)

[Version: 06/05/2016]

**Soffel, Christian (2012):** *Der Hybridbus und seine Entwicklung zum vollelektrischen Bus.* VCDB, Dresde. VerkehrsConult Dresden-Berlin GmbH.

**Springer Fachmedien München GmbH (2012):** *Sieben Solaris-Hybridbusse für La Chaux-de-Fonds.*

URL: <http://www.omnibusrevue.de/sieben-solaris-hybridbusse-fuer-la-chaux-de-fonds-1110162.html>

[Version: 20/05/2016]

**Stadtwerke Münster (2016):** *Busverkehr Münster. Fünf umweltfreundliche Elektrobusse für Münster.*

URL: [http://www.business-on.de/muenster/busverkehr-muenster-fuenf-umweltfreundliche-elektrobusse-fuer-muenster-\\_id7123.html](http://www.business-on.de/muenster/busverkehr-muenster-fuenf-umweltfreundliche-elektrobusse-fuer-muenster-_id7123.html)

[Version: 21/05/2016]

**Fondation myclimate (2014):** *Projets de protection climatique. Bus électriques et hybrides.*

URL: <http://www.myclimate.org/fr/projets-de-protection-climatique/projekt/suisse-efficience-energetique-7813-1/>

[Version: 23/05/2016]

**Thie, Steffen (2014):** *Dresdner Verkehrsbetriebe AG setzt auf Solaris-Elektrobus.*

URL: <http://www.elektromobilitaet-verbundet.de/dvb-setzt-auf-solaris-elektrobus.html>

[Version: 23/05/2016]

**Thöni, Thomas (2016):** *Les bus électriques genevois TOSA coûteront 28 millions de francs.*

URL: <http://www.tdg.ch/economie/Les-bus-electriques-genevois-TOSA-couteront-28-millions-de-francs/story/30562890>

[Version: 20/05/2016]

**VDE, Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik (2016):** *Durch die Umwandlung von Bewegungsenergie und Wärmeenergie in elektrische Energie lassen sich die*

*erzielbaren Reichweiten erhöhen.*

URL: <https://www.vde.com/de/e-mobility/fahrzeugtechnik/energieerueckgewinnung/seiten/default.aspx>

[Version: 06/06/2016]

**Volvo Bus Suisse (2016):** *Premiere for Volvo's Electric Hybrid in commercial service.*

URL: <https://www.youtube.com/watch?v=FseBmNiqrD0>

[Version: 18/05/2016]

**Waibel, Johannes (2014):** *Antriebstechnologien für Busse heute & morgen.*

URL: [http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:77Bww3wxsIYJ:www.clean-fleets.eu/fileadmin/files/documents/National\\_Workshops/FreiburgNW/VAG\\_NationalWorkshop\\_Busreport.pdf+%&cd=1&hl=de&ct=clnk&gl=ch](http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:77Bww3wxsIYJ:www.clean-fleets.eu/fileadmin/files/documents/National_Workshops/FreiburgNW/VAG_NationalWorkshop_Busreport.pdf+%&cd=1&hl=de&ct=clnk&gl=ch)

[Version: 30/04/2016]

**Wolff, Oliver (2015):** *Der Bus im ÖPNV. Technisch ausgereift und gleichzeitig Garant für den Ausbau des Umweltvorsprungs.* Dans: *Der Nahverkehr, Bd. 2015 (10).* 7-10.

# Les expériences faites par CarPostal dans le domaine de la motorisation alternative

**Silvio Gely, Responsable Production et Véhicules chez CarPostal**

CarPostal est la plus importante entreprise de transport par car en Suisse, avec 2200 véhicules circulant chaque jour sur tout le territoire helvétique. CarPostal assume ainsi une grande responsabilité envers les voyageurs, envers les cantons commanditaires des prestations ainsi que vis-à-vis de l'environnement. En accord avec la stratégie poursuivie par la Poste, CarPostal souhaite à moyen terme augmenter l'efficacité carbone et à long terme renoncer entièrement aux carburants fossiles. Au-delà de sa propre volonté d'améliorer le bilan environnemental, CarPostal est amenée par différents facteurs externes à tester sérieusement des alternatives aux bus roulant au diesel. Il faut en effet s'attendre à un durcissement des réglementations en matière de bruit et d'émissions de polluants à l'échelle européenne.

CarPostal a de ce fait entrepris de tester des alternatives aux moteurs purement diesel depuis un certain temps déjà. Dans ce contexte, la question de l'adéquation se retrouve au premier plan. En quelle mesure les véhicules sont-ils fiables au quotidien? L'autonomie est-elle suffisante et les moteurs sont-ils suffisamment puissants pour gravir des pentes importantes? Le personnel de conduite est-il à l'aise avec les véhicules? Parallèlement, CarPostal doit également tenir compte des critères de rentabilité, aspect que l'opinion publique a souvent tendance à négliger. Le calcul de la rentabilité inclut les coûts d'acquisition, l'exploitation ainsi que la durabilité du moteur. Les cars postaux circulent généralement pendant 12 ans. Ce délai doit donc servir de référence indicative aux solutions alternatives.

Dans le domaine des systèmes de propulsion alternatifs, CarPostal a, à ce jour, surtout expérimenté les bus hybrides alimentés au diesel. Aujourd'hui, 36 cars postaux hybrides diesel sont en service régulier. Même s'ils font désormais partie du paysage suisse, les bus hybrides diesel nécessitent encore l'engagement financier des donneurs d'ordre et bien souvent des entreprises de transport elles-mêmes. Les coûts élevés à l'achat sont en partie compensés lors de l'exploitation par le fait que les véhicules hybrides consomment en moyenne 25 %

de carburant de moins que les bus purement diesel. Au quotidien, les cars postaux hybrides alimentés au diesel demeurent toutefois près de 20 % plus onéreux que les bus diesel classiques. Les moteurs de la toute dernière génération sont nettement plus performants que ceux des premiers véhicules hybrides. Dans l'idéal, les bus doivent circuler sur un territoire présentant une topographie variée et en trafic discontinu, afin que la batterie puisse se recharger fréquemment.

Pendant cinq ans, CarPostal a testé avec succès cinq bus à pile à combustible dans la région de Brugg. La société de transport a ainsi démontré qu'il était possible d'utiliser l'hydrogène en service régulier quotidien. Les coûts d'acquisition et d'exploitation demeurent cependant nettement plus élevés que ceux des véhicules diesel. Par ailleurs, les défis que représentent les compresseurs de la station-service à hydrogène et l'approvisionnement en pièces de rechange pour les cinq bus sont devenus plus importants. CarPostal a de ce fait décidé de mettre un terme au projet comme prévu au bout de cinq ans et de continuer à suivre de près l'évolution de la technologie des piles à combustible. Il s'avère en effet que cette dernière se trouve actuellement en plein essor, ce qui devrait avoir des répercussions positives sur la rentabilité des véhicules.

Après avoir testé des bus électriques à la journée, CarPostal met actuellement en place trois interventions à plus long terme. Depuis décembre 2016, CarPostal exploite à Saas-Fee deux bus purement électriques qui, durant toute la saison, assurent la liaison entre le terminal de bus et les remontées de la station de sports d'hiver. À partir du printemps 2017, des interventions prolongées sont prévues à Sarnen et à Interlaken. CarPostal souhaite tester un véhicule roulant sur batterie dans chacune de ces deux régions pendant trois ans, et a loué les bus pour toute la durée du test. Le concept d'exploitation prévoit que CarPostal recharge les batteries des deux véhicules dans le garage durant la nuit. CarPostal travaillera pour ce faire avec des fournisseurs d'énergie locaux et n'utilisera que des énergies renouvelables. Les premières expériences faites à Saas-Fee

montrent que la capacité de charge de la batterie est suffisante pour permettre au bus de circuler pendant plusieurs heures, le défi résidant dans les fortes pentes (22 %) telles qu'on les rencontre à Saas-Fee. CarPostal circule en premier lieu en agglomération et sur les lignes interurbaines. Les conditions d'exploitation sont donc différentes de celles des services de transports urbains qui ont la possibilité recharger leurs bus électriques aux terminus.

À l'heure actuelle, les expériences faites par CarPostal en matière de bus électriques sont variables, tout comme les progrès marqués par les différents types de moteurs électriques. Alors que les bus hybrides alimentés au diesel sont parvenus à s'établir, les bus à batterie et les bus à pile à combustible en sont bien souvent encore au stade de développement. Le marché des fournisseurs est relativement petit, ce qui se traduit par des coûts d'acquisition et d'exploitation élevés et par une demande encore somnolente. CarPostal voit donc d'un bon œil les changements qui s'opèrent actuellement chez les fabricants de bus à pile à combustible et à

batterie. En effet, CarPostal ne peut utiliser ses véhicules pour assurer le transport régional des voyageurs que si les coûts sont acceptés par les donneurs d'ordre et se situent au même niveau que les coûts actuels des véhicules de référence. Alors qu'il est souvent possible de trouver des partenaires puissants pour participer au financement de projets isolés, la motorisation alternative dans le transport régional des voyageurs fait partie de l'offre. Les véhicules tout comme les coûts doivent de ce fait être en mesure de dépasser le stade de projet. Dans le domaine du transport régional par bus notamment, où certains cantons mettent au concours les prestations, le prix constitue un critère important de l'offre. L'échange d'expériences ainsi que l'outil de conseil pour l'achat de bus électriques mis au point par des scientifiques sont des instruments essentiels, susceptibles d'influencer la décision d'achat. Toutes les sociétés de transport, quelle que soit leur taille, en profitent, car l'objectif demeure le même pour toutes : réduire progressivement la consommation de diesel et améliorer l'efficacité carbone.

# Coup d'envoi pour les bus électriques en milieu urbain

---

Alex Naef, Directeur Général Hess AG

Près de 100 ans après l'électrification du chemin de fer en Suisse, nous nous trouvons à l'échelle internationale à la veille de l'électrification du réseau des bus en milieu urbain. Aujourd'hui comme à l'époque, nous devons nous départir de notre mode de réflexion habituel pour envisager cette mutation et accepter au moins en partie des approches inédites. À l'instar du chauffeur qui, même s'il en a gardé le nom, ne gagne définitivement plus sa vie en « chauffant ».

Grâce aux trolleybus, un grand nombre de trajets en bus se font déjà de manière électrique dans de nombreuses agglomérations suisses. Ils sont apparus par le passé à des époques également chargées de défis en matière de politique énergétique. Leurs « rails aériens », c'est-à-dire les lignes aériennes suspendues, fournissent une alimentation en énergie toujours fiable et suffisante. Nous pouvons nous estimer heureux de disposer d'une telle infrastructure de base, car il nous suffit aujourd'hui d'apporter certaines modifications ciblées pour pouvoir électrifier l'ensemble de notre réseau de bus. « In Motion Charging » est l'appellation moderne désignant la recharge des batteries des trolleybus durant leurs déplacements sous les lignes aériennes. Grâce à ces batteries, ils peuvent aujourd'hui augmenter leur autonomie de 100 % sans changer l'infrastructure. Lesdites batteries permettent en effet d'utiliser de manière simple l'infrastructure actuelle pour électrifier d'autres lignes de bus et les étendre à de nouveaux quartiers.

De nouvelles solutions permettent aussi maintenant, dans des agglomérations qui ne sont pas dotées de lignes aériennes, de passer des bus diesel aux bus électriques, et donc à un moyen de transport qui ne dégage pas de CO<sub>2</sub>. Le travail de Gzim Kryeziu et de Michael Brack, primé par LITRA, l'explique en détails.

Les batteries des bus électriques puisent l'énergie qui leur est nécessaire dans des stations de recharge rapide aux terminus ou à certains arrêts soigneusement sélectionnés. Mais cela n'ira pas sans une infrastructure adéquate car la demande en prestations de transport est élevée et en constante augmentation. De plus en plus, cette demande ne pourra être satisfaite qu'avec des « contenants » de grande taille, tels que des bus

articulés, des bus à double articulation, des bus trains (ou compositions) ou des horaires encore plus denses. De plus, les conditions climatiques et topologiques dans les agglomérations suisses sont gourmandes en énergie. Vouloir résoudre cette problématique par le biais d'une recharge unique des batteries durant la nuit - pour éviter des frais d'infrastructure - n'est guère judicieux. Le poids d'une telle super-batterie augmenterait de manière disproportionnée le poids à vide des bus, réduisant ainsi leur performance de manière significative. Les coûts de fabrication et d'entretien ultérieur monteraient en flèche, inutilement. Si l'on considère une flotte réaliste de 30 à 70 bus articulés rechargeant leurs batteries durant la nuit dans un dépôt, il en résulterait des pics de consommation représentant un véritable défi pour l'approvisionnement en énergie.

Ces derniers mois, l'industrie a, dans une grande mesure, clarifié les normes concernant les interfaces entre station de recharge et véhicule. Même si des améliorations doivent encore être apportées par itération ces prochaines années, les fondements sont désormais posés et la sécurité de l'investissement garantie.

Par rapport aux bus diesel, les bus électriques et leur infrastructure impliquent certes des coûts d'investissement plus importants, mais ils sont moins chers en carburant. En envisageant une durée d'amortissement raisonnable sur plus long terme, comme c'est la norme pour d'autres systèmes de transport électrique, les coûts pourraient être ramenés à l'équilibre. Personne ne pourrait imaginer amortir un système de tram ou de trolleybus sur 14 ans.

Et si l'on considère une durée d'environ 20 ans, comme c'est le cas d'habitude pour les trolleybus, les bus électriques sont déjà moins coûteux que les bus diesel ordinaires. Ce délai paraît d'autant plus raisonnable que les composants des bus électriques sont prévus pour cette durée de vie et impliquent dans l'ensemble des frais de maintenance moins élevés. Même un rafraîchissement du véhicule, envisageable après dix ans de service pour améliorer le confort des voyageurs, peut entrer dans l'équation.

Ceux qui sont favorables à l'introduction des bus électriques et disposés à l'encourager doivent tenir compte de ces circonstances et prévoir une durée d'exploitation plus longue.

Dans le contexte international, le remboursement de l'impôt sur les huiles minérales pour les bus diesel, tel qu'il est pratiqué en Suisse, paraît étrange. Les bus électriques sont bien plus rapidement rentables sur d'autres marchés qu'en Suisse, pourtant grand producteur d'électricité. Ce remboursement est d'ailleurs préjudiciable au développement des bus hybrides. Il faut se poser la question de savoir si cette situation est encore justifiable au vu de la politique climatique et énergétique de la Confédération.

Des économies de CO<sub>2</sub> atteignant 100 tonnes par bus et par an représenteraient une contribution substantielle à l'atteinte des objectifs climatiques du gouvernement. Cette contribution, à considérer comme motivante également en matière de réduction des nuisances sonores, aura toutefois de la peine à s'imposer. Il incombera aux pouvoirs politiques ou plus précisément aux commanditaires, de décider à partir de quel moment ils n'achèteront plus qu'une prestation de transport climatiquement neutre.

Du point de vue de la politique énergétique suisse, il faut encore prendre en compte le fait que les bus diesel sont à 100% tributaires d'un approvisionnement en carburant venu de l'étranger. L'électrification du réseau des bus permettra de réduire cette dépendance, sans oublier le fait réjouissant que l'utilisation publique des bus électriques augmentera grâce à l'énergie produite chez nous.

L'aptitude à fabriquer en série des bus à piles à combustion a été annoncée plusieurs fois depuis le début des années 1990 et est devenue depuis lors un « moving target » permanent, ce qui fait que cette option n'est plus considérée comme réaliste, d'autant plus que les frais sont très élevés dans le secteur international des bus.

La situation des autocars et des bus longue distance est toute autre. Pourquoi ? Parce que leur profil de mission est d'une nature entièrement différente, tout comme la part des bus dans la prestation de transport sur ces axes routiers. Ce sont les voitures et les camions qui dessinent le paysage des autoroutes et des routes nationales dans le monde. Et cela explique le nombre très modeste d'initiatives visant à électrifier cette catégorie de bus.