



Quelle technologie pour les autobus électriques : recharge lente ou recharge rapide ?

par Pierre Langlois, Ph.D., 4 mars 2017

Présentement, il y a deux types d'autobus 100 % électriques sur le marché : les autobus avec une grosse batterie et une recharge lente (4 à 5 heures) de nuit au dépôt, et les autobus avec une petite batterie que se rechargent rapidement (5 à 7 minutes) à des stations le long ou à la fin de leur trajet. Il y a plusieurs paramètres à considérer avant de faire un choix et ce n'est pas toujours évident. Nous allons analyser tout ça afin d'y voir plus clair.

D'entrée de jeu, il faut savoir que la vitesse moyenne des autobus à Montréal est de [18 km/h](#), et qu'en demeurant en service 16 heures/jour et plus, un autobus de la STM va parcourir plus de 288 km dans sa journée. Il y a donc une partie importante des autobus dans une ville comme Montréal qui font 300 km. Un tel kilométrage quotidien ne représente pas de problèmes pour un autobus à recharge rapide sur rue. Mais, à toutes fins pratiques, c'est hors de portée des autobus à grosse batterie et à recharge lente de nuit, dans la vraie vie, en hiver. Nous allons donc nous restreindre à des parcours journaliers de 250 km pour notre analyse.

1. La consommation d'un autobus électrique de 12 m (40 pieds)

Les autobus électriques Proterra ont fait l'objet d'une étude détaillée par le *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) qui a publié [un rapport en 2016](#), intitulé «*Foothill Transit Battery Electric Bus Demonstration Results*». Les tests ont été effectués sur 12 autobus électriques de 35 pieds (10,6 m) à recharge rapide, qui ont roulé d'avril 2014 à juillet 2015, sur 640 000 kilomètres, en Californie. La consommation électrique moyenne des autobus a été de 1,34 kWh/km. En extrapolant à un autobus de 40 pieds (12 m), on aurait donc une consommation de 1,53 kWh/km, en Californie.

Plus près de nous, La Société de transport de Laval (STL) a testé un autobus électrique de 12 m en 2013, de la compagnie Designline (qui a fait faillite depuis), et ils ont obtenu une consommation de 1,61 kWh/km, rapportée dans une [présentation faite par la STL](#) et intitulée «*L'autobus électrique à recharge lente : résultats d'essais et remarques prospectives*». Les tests étaient effectués sur rue avec des sacs de sable. J'ai moi-même fait un tour à bord de cet autobus, alors que j'étais conseiller pour la politique d'électrification des transports du gouvernement québécois.

On devrait donc s'attendre à **une consommation électrique moyenne au Québec de l'ordre de 1,6 kWh/km** pour un autobus 100 % électrique de 12 m (40 pieds).

2. Le coût des batteries

Dans [une étude de la firme McKinsey](#) datée de janvier 2017, intitulée «*Electrifying insights : How automakers can drive electrified vehicle sales and profitability*», on apprend que le prix moyen des blocs batteries pour véhicules électriques légers, en 2016, était de 227 \$ US/kWh. Pour les autobus, on a besoin de batteries différentes, qui durent plus longtemps, qui peuvent se recharger très rapidement, et qui sont ultra-sécuritaires. Et, comme il y a beaucoup moins d'autobus vendus que d'automobiles, les quantités de batteries produites sont bien moindres, ce qui affecte le prix à la hausse. L'information sur le prix des batteries pour les autobus est difficile à trouver, mais heureusement le *California Air Resource Board* (CARB) a publié un rapport à ce sujet en 2016 intitulé «[Advanced Clean Transit Battery Cost for Heavy-Duty Electric Vehicles](#)».

Dans ce rapport, le CARB a demandé le prix de leurs blocs batteries à trois fabricants nord-américains : Proterra, New Flyer et BYD. BYD, qui utilise des batteries LFP (Lithium-Fer-Phosphate) a déclaré un coût de 900 \$ US/kWh, New Flyer payerait ses blocs batteries NMC (Nickel-Manganèse-Cobalt) entre 750 \$ US et 850 \$ US/kWh, et Proterra aurait un coût de plus de 1 000 \$ US/kWh pour les batteries LTO (Lithium-Titanate Oxide) qu'on retrouve dans ses autobus à recharge rapide (<10 minutes). Tous ces prix sont pour l'année 2016.

Nous retiendrons donc un coût canadien de 1 070 \$ /kWh pour les batteries LFP et NMC, et 1 540 \$ /kWh pour les batteries LTO (1 \$ US = 1,33 \$ CAN).

3. Le poids des batteries et le nombre de passagers

Pour être en mesure de parcourir 250 km, un autobus électrique qu'on recharge une fois par jour devrait donc avoir une grosse batterie de 440 kWh de capacité environ, $1,1 \times (1,6 \text{ kWh/km}) \times 250 \text{ km}$ (le facteur 1,1 assurant que la batterie ne sera jamais vidée complètement). Avec un autobus électrique à recharge rapide, une batterie de 80 kWh est amplement suffisante, puisqu'elle pourra donner une autonomie de 45 km, si nécessaire, alors que les stations de recharge rapide vont être espacées de moins de 15 km.

Il est important d'établir les capacités des batteries associées aux deux technologies, car le poids de ces batteries va dicter le nombre de passagers qu'on peut embarquer, sachant qu'un autobus à deux essieux est limité à un poids maximum par les Ministères du Transport pour éviter d'endommager la voirie. Et, le poids d'une grosse batterie entraîne nécessairement une capacité moindre de passagers, que nous allons déterminer.

Le meilleur moyen de faire cette évaluation est de prendre un fabricant qui commercialise les deux types de technologie, avec la même carcasse d'autobus. Or ce fabriquant existe, il s'agit de Proterra. En se référant aux [caractéristiques de ses différents autobus](#) électriques de 40 pieds, on constate que les deux autobus pertinents à comparer sont le Catalyst FC à recharge rapide et le Catalyst E2 à recharge lente. Ces deux autobus ont 40 places assises et le même poids à charge maximale de 39 050 livres (17 750 kg). Mais, les poids à vide de ces

deux autobus sont très différents, à cause des batteries. En soustrayant le poids à vide du poids à charge maximale, on obtient le poids des passagers qu'on peut transporter. Et en divisant le poids des passagers par un poids moyen de 70 kg, on obtient le nombre de passagers autorisés. Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Autobus Proterra de 40 pieds (12 m)	Capacité de la batterie	Poids des passagers	Nb de passagers (70 kg en moy.)
Catalyst FC recharge rapide	79 kWh	5 730 kg	82
Catalyst E2 recharge lente	440 kWh	4 180 kg	60

Ce qui n'était pas évident dans le tableau des caractéristiques des autobus Proterra devient tout d'un coup très explicite. Ça prend 36 % plus d'autobus à grosse batterie comme le Catalyst E2 pour transporter le même nombre de personnes que des autobus à petite batterie comme le Catalyst FC ! Ça veut donc dire **qu'on aura besoin de 4 autobus à recharge lente pour faire le même travail que 3 autobus à recharge rapide.**

4. Le coût des autobus

Dans un [communiqué de presse du King County](#) de l'État de Washington, en date du 10 janvier 2017, on apprend que la société de transport du comté, la *King County's Metro* va acquérir 73 autobus Proterra électriques de 40 pieds (12 m), à recharge rapide, dans les prochaines années. Les 20 premiers vont coûter 15 120 000 \$ US selon le communiqué, ce qui représente un prix unitaire de **755 000 \$ US pour des autobus Catalyst FC à recharge rapide de Proterra, soit 1 010 000 \$ CAN.**

Par ailleurs, dans le rapport du CARB, cité à la section 2, On apprend que le prix d'un autobus électrique BYD de 40 pieds (12 m), avec une batterie de 324 kWh est de 770 000 \$ US. Mais, comme nous l'avons vu à la section précédente, on a besoin d'une batterie de 440 kWh pour rouler 250 km dans la vraie vie. Il faudrait donc ajouter 116 kWh.

Et si on applique le 800 \$ US/kWh que nous avons obtenu à la section 2, **le prix d'un autobus avec une batterie de 440 kWh monte à 860 000 \$ US, soit 1 150 000 \$ CAN.** L'autobus Catalyst E2 de Proterra qui a une batterie de 440 kWh devrait avoir un prix similaire s'ils veulent être dans la compétition.

5. Le coût d'un deuxième set de batteries

Il est bon de savoir que la garantie sur les batteries des autobus Proterra est de 6 ans, et que BYD offre une garantie de 12 ans sur ses batteries, mais il n'y a pas les détails. Par ailleurs, [la vie utile des autobus de la STM](#), à Montréal, est de 16 ans.

En se référant aux sections 2 et 3, une batterie LTO de 80 kWh pour la recharge rapide avoisinerait 120 000 \$ CAN, alors qu'une batterie de 440 kWh NMC ou LFP pour un autobus à recharge lente coûterait 470 000 \$ CAN. Ces prix sont pour aujourd'hui en 2017, mais un deuxième set de batterie, si requis, ne serait pas acheté avant 6 à 8 ans. On peut alors supposer que les prix auront diminués de moitié vers 2023-2025. **Nous retiendrons donc 60 000 \$ CAN et 235 000 \$ pour les sets de batteries qui seraient achetés disons en 2024, en remplacement de la batterie originale.**

Notons que même si la batterie est encore fonctionnelle au bout de 6 ou 8 ans, si elle a perdu 20 % de sa capacité, l'autonomie pour l'autobus avec une grosse batterie passerait à 200 km au lieu de 250 km, ce qui ne permettrait plus à l'autobus de faire son travail.

6. Le coût des chargeurs

Sachant que les lignes d'autobus ont des longueurs de l'ordre de 12 km et que la vitesse moyenne des autobus se situe autour de 18 km/h dans une ville comme Montréal, ce 12 km sera parcouru en 40 minutes, auquel il faut ajouter 5 minutes de recharge pour un total de 45 minutes. **Un chargeur rapide peut donc accommoder de 6 autobus** à une cadence de 7 minutes entre les autobus. Or, Frédéric Delrieu, chef de produit électromobilité chez Novabus, m'a confié au téléphone que le coût d'un poste de recharge rapide de 450 kW était autour de 600 000 \$, plus les frais d'installation. Et, dans le [rapport du NREL](#) cité à la section 1, on y mentionne un coût de 300 000 \$ US (400 000 \$ CAN) pour l'installation de deux chargeurs rapides de 500 kW, près l'un de l'autre. En comptant une moyenne de 400 000 \$ CAN pour installer un chargeur rapide sur rue, on arrive à un coût total de 1 000 000 \$. À noter que **ces chargeurs ont une durée de vie de 25 ans et les autobus une vie utile de 16 ans. Le coût de la borne pourra donc être amorti sur 9 autobus (1,5 x 6), ce qui fait 111 000 \$ par autobus.**

Pour les autobus à grosse batterie et recharge lente au dépôt, comme le Catalyst E2 de Proterra, cette compagnie fournit des chargeurs de 120 kW. Or, [une borne de recharge rapide à 50 kW coûte environ 60 000 \\$ CAN installée](#), On peut donc s'attendre à un coût approximatif de 120 000 \$ CAN pour une borne de 120 kW, qu'on amortira sur 1,5 autobus en considérant une durée de vie de la borne de 25 ans et celle des autobus 16 ans. **Le coût de la borne par autobus sera donc approximativement de 80 000 \$ CAN.**

7. Le coût de l'électricité

Le coût de l'électricité lorsque des puissances élevées sont impliquées dépend de l'énergie électrique consommée (nombre de kWh) et de la puissance maximale atteinte (kW) sur une période de facturation. Nous calculerons le coût pour 6 autobus à recharge rapide et 8 autobus à recharge lente, qui, comme nous l'avons vu, transportent le même nombre de passagers. Pour les 6 autobus à recharge rapide, la puissance maximale sera de 450 kW, alors que pour les 8 autobus à recharge lente, elle sera de 960 kW (8 x 120 kW).

Pour l'énergie consommée, on calculera 250 km/jour en moyenne à 1,6 kWh/km pour les autobus à recharge rapide et 1,73 kWh/km pour les autobus à recharge lente, puisqu'ils consomment 8,7 % de plus d'électricité que les autobus à recharge rapide, pour un autobus à pleine charge, selon les [spécifications de Proterra](#).

Pour une période de 30 jours, chaque autobus parcourra 7 500 km, ce qui va nécessiter 12 000 kWh pour un autobus à recharge rapide et 12 975 kWh pour un autobus à recharge lente.

Dès que l'appel de puissance dépasse 5 000 kW, ce qui arrive dès qu'on a une cinquantaine d'autobus électrique, on tombe sous [le tarif L d'Hydro-Québec](#). Selon ce tarif, pour chaque période de 30 jours, il faut facturer la puissance maximale appelée (en kW) à un taux de 12,87 \$/kW. L'Énergie, elle, coûte 3,26 ¢/kWh. Il faut ajouter, bien sûr, la TPS et la TVQ.

En appliquant ce tarif, la facture d'électricité, hors taxes, pour 6 autobus électriques à recharge rapide sur 30 jours s'élèvera à

$$6 \times (12\,000 \text{ kWh} \times 0,0326 \text{ \$/kWh}) + (450 \text{ kW} \times 12,87 \text{ \$/kW}) = \mathbf{8\,138 \text{ \$ / 30 jours}}$$

dont 2 347 \$ pour l'énergie (kWh) et 5 791 \$ pour la puissance (kW). Cela fait donc 1 356 \$ par autobus par 30 jours, soit **16 500 \$ par année par autobus à recharge rapide, taxes en sus**.

Pour les autobus à recharge lente au dépôt, comme chaque autobus a son chargeur dédié de 120 kW, et que tous les autobus rechargent en même temps, le coût en électricité par autobus, pour une période de 30 jours, sera donné par

$$(12\,975 \text{ kWh} \times 0,0326 \text{ \$/kWh}) + (120 \text{ kW} \times 12,87 \text{ \$/kW}) = \mathbf{1\,967 \text{ \$ / 30 jours}}$$

dont 423 \$ pour l'énergie (kWh) et 1 544 \$ pour la puissance (kW). **La facture annuelle d'électricité par autobus à recharge lente sera par conséquent de 23 930 \$.**

8. Les salaires des conducteurs

Les salaires des conducteurs d'autobus sont un gros item dans les budgets des sociétés de transport. Et, s'il faut plus d'autobus pour transporter le même nombre de passagers on se doit d'en tenir compte. Je me suis donc informé auprès de l'ATUQ (Association du transport urbain du Québec) qui m'ont répondu qu'un conducteur débutant, dans la région de Montréal, gagnait 40 000 \$. Le salaire moyen des conducteurs devrait donc tourner autour de 50 000 \$, et, en ajoutant 20 % pour les avantages sociaux (assurances, fond de pension...), on aurait un coût annuel moyen par conducteur de l'ordre de 60 000 \$.

Maintenant, un trajet quotidien de 250 km, à une vitesse moyenne de 18 km/h sur 7 jours va nécessiter autour de 2,5 conducteurs par autobus, pour **un total de 150 000 \$ par année par autobus en salaires des conducteurs.**

9. L'empreinte écologique

Il va de soi qu'une grosse batterie de 440 kWh pour les autobus électriques à recharge lente a une empreinte écologique bien plus grande qu'une batterie de 80 kWh pour un autobus à recharge rapide. Surtout qu'en fait, on a besoin de 1,33 autobus à grosse batterie pour transporter le même nombre de passagers qu'un autobus à petite batterie et recharge rapide. C'est donc 585 kWh de batteries qu'il faut au lieu de 80 kWh, soit sept fois plus de ressources naturelles finies qu'on doit tirer du sol, avec des impacts environnementaux reliés aux exploitations minières sept fois supérieurs. Sans compter sept fois plus de recyclage de batteries, avec des pertes de matières premières sept fois plus grandes.

10. Bilan des coûts sur 16 ans

Le temps est venu d'additionner tous ces coûts, sur une période de 16 ans, la durée de vie des autobus à la STM. Nous n'avons pas considéré les coûts d'entretien qui devraient vraisemblablement être similaires pour les deux types d'autobus électriques.

Bien entendu, sur une période de 16 ans, les coûts vont varier d'une année à l'autre en raison de l'inflation principalement. Toutefois, notre but n'est pas d'avoir un estimé ultra précis, mais bien une évaluation sommaire qui donne les grandes lignes.

Le tableau ci-dessous résume notre analyse. N'oublions pas qu'on a besoin de 4 autobus à recharge lente (batterie=440 kWh) pour transporter le même nombre de passagers que 3 autobus à recharge rapide (batterie= 80 kWh), comme nous l'avons vu à la section 3. Il faut donc multiplier le total des coûts pour l'autobus à recharge lente par 1,33, puisqu'on en aura besoin de 33 % de plus. Les coûts dans le tableau sont en dollars canadiens, sans les taxes, arrondis au 5 000 \$ près.

COÛTS SUR 16 ANS (250 km / jour)	Autobus 100 % électriques	
	Recharge rapide sur rue (batterie : 80 kWh)	Recharge lente au dépôt (batterie : 440 kWh)
Achat de l'autobus	1 010 000 \$	1 150 000 \$
Coût du chargeur / autobus	110 000 \$	80 000 \$
Achat 2e batterie	60 000 \$	235 000 \$
Coût de l'électricité (tarif L)	265 000 \$	380 000 \$
Salaires des conducteurs	2 400 000 \$	2 400 000 \$
TOTAL	3 845 000 \$	4 245 000 \$
1,33 x TOTAL		5 660 000 \$

Comme on peut le constater, **lorsqu'on considère qu'il faut 33 % de plus d'autobus à grosse batterie que d'autobus à petite batterie, la différence est de 1 815 000 \$ sur 16 ans, en défaveur des autobus à grosse batterie.** Ce montant représente **une majoration des coûts évalués de 47 % par rapport aux autobus à recharge rapide et à petite batterie!** Cette importante différence est due au poids des grosses batteries, qui limite le nombre de passagers à 60 par autobus, au lieu de 82 pour les autobus à petite batterie. Si on pouvait transporter le même nombre de personnes, la différence des coûts ne serait que de 400 000 \$, toujours en défaveur des autobus à grosse batterie, soit environ 10 % des coûts évalués.

11. Conclusion

Le total des surcoûts pour les autobus à recharge lente au dépôt atteint 1,8 millions \$ CAN par rapport aux autobus à recharge rapide sur rue! Sachant que déjà un autobus à recharge rapide coûte approximativement 350 000 \$ de plus qu'un autobus hybride ordinaire (non rechargeable), on est en droit de se poser des questions sur la viabilité économique des autobus à recharge lente au dépôt. Surtout qu'on n'a même pas considéré les surcoûts associés à l'agrandissement de la surface des dépôts du tiers, si on les

remplissait d'autobus électriques à recharge lente, accommodant substantiellement moins de passagers.

Par ailleurs, n'oublions pas qu'une partie importante des autobus à Montréal font 300 km par jour. Il faudrait donc une batterie encore plus grosse (530 kWh) si on voulait ne faire qu'une recharge de nuit au dépôt. Ça n'aurait aucun sens.

Sans compter qu'au niveau de l'empreinte écologique, les grosses batteries c'est bien plus néfaste. On ne peut que se féliciter que le constructeur québécois Novabus ait développé un autobus à recharge rapide sur rue, son [LFSe](#). Nous leur souhaitons un franc succès.

Il y a toutefois un créneau qui peut accommoder des autobus électriques avec recharge lente au dépôt. Il faudrait que l'autobus ne parcoure pas plus de 200 km/jour environ, à raison de 100 km le matin et 100 km en fin d'après-midi, aux heures de pointes, avec 4 à 5 heures de pause à mi-journée pour se recharger, et une recharge de nuit. On réduirait alors considérablement la grosseur de la batterie requise et la puissance de recharge. C'est ce que fait avec succès le fabricant québécois [Autobus Lion](#) avec ses autobus scolaires électriques.

En terminant, il faut bien comprendre que mon évaluation se veut sommaire et générale. Mon but était de fournir un canevas pour aider à y voir plus clair et identifier les facteurs importants au niveau des coûts.