

RAPPORT TECHNIQUE

*Transport urbain électrique alimenté
par dispositif de biberonnage*

Pour



Société de transport de Laval

A/S Sylvain Boucher, Ing.

2250, avenue Francis-Hughes

Laval (Québec) H7S 2C3

21 AVRIL 2010

Partenaire Corporatif

Table des matières

1	Description sommaire de la technologie	6
1.1	Véhicules compatibles au biberonnage.....	6
1.1.1	Spécifications des véhicules	6
1.1.2	Conditions d'utilisation	6
1.1.3	Projets de démonstration/exploitants	7
1.2	Systèmes de stockage de l'énergie.....	7
1.2.1	Batteries	8
1.2.2	Super-condensateurs	15
1.2.3	Roues d'inertie	19
1.3	Principe de fonctionnement du biberonnage.....	22
1.3.1	Tableau comparatif	22
1.4	Description des infrastructures	23
1.4.1	Recharge en bout de ligne.....	23
1.4.2	Recharge ultra-rapide distribuée	23
1.4.3	Recharge quasi-continue.....	24
2	Historique.....	25
2.1	Gyrobus	25
2.2	Optare MetroRider	26
2.3	Power Electronic Research Group de la Nouvelle-Zélande	26
2.4	Bus à super-condensateurs en Russie	27
2.5	Minibus par induction en Italie.....	28
3	Situation Actuelle	31
3.1	Expériences en cours	31
3.1.1	Montmartrobus.....	31
3.1.2	Trolley bus #90 Express de Rome	33
3.1.3	Ville de Turin	34

3.1.4	Évolution du biberonnage	35
3.2	Comparaison des approches	36
3.3	Disponibilité commerciale	37
3.3.1	Elfo de EPT	37
3.3.2	Technobus	38
4	Développement prévisible	39
4.1	Accumulateurs	39
4.1.1	Batteries	39
4.1.2	Super-Condensateurs	39
4.2	Postes de biberonnage et systèmes entiers	40
4.2.1	Système WATT de PVI	40
4.2.2	Proterra	41
4.2.3	Sinautec	43
4.2.4	Système OLEV, du Korea Advanced Institute of Science and Technology	45
4.2.5	Numexia	46
4.2.6	IPT Charge de Conductix-Wampfler	46
5	Analyse	48
5.1	Analyse énergétique	48
5.1.1	Besoins énergétiques d'un véhicule de 60 pieds	48
5.2	Scénarios technologiques	51
5.2.1	SCÉNARIO 1 : biberonnage en fin de ligne	51
5.2.2	SCÉNARIO 2 : biberonnage ultra-rapide	52
5.2.3	Volume, poids et prix de stockage d'énergie	53
5.3	Comparaison avec trolleybus	53
6	Perspectives globales et horizon temporel	54
7	Discussion	55
7.1.1	Conclusion	55

7.1.2	RecommAndation.....	55
-------	---------------------	----

Table des figures

Figure 1,	Vaporetto E1, Ansaldo Sistemi Industriali.....	6
Figure 2,	graphique de puissance et d'énergie des diverses formes de stockage.....	7
Figure 3,	diagramme d'un condensateur.....	15
Figure 4,	image d'un super-condensateur.....	16
Figure 5,	photo Irisbus et Tramway de Paris.....	16
Figure 6,	système Mitrac de Bombardier.....	17
Figure 7,	récupération d'énergie cinétique par volant d'inertie.....	20
Figure 8,	restitution d'énergie d'un volant à inertie.....	20
Figure 9,	système Kinergety de Ricardo.....	21
Figure 10,	tableau comparatif des types de biberonnage.....	22
Figure 11,	schéma de fonctionnement de biberonnage en bout de ligne.....	23
Figure 12,	schéma de fonctionnement de biberonnage à recharge ultra-rapide.....	24
Figure 13,	schéma de fonctionnement de biberonnage à recharge quasi-continue.....	24
Figure 14,	gyrobus exposé au musée d'Anvers.....	25
Figure 15,	perches d'alimentations du Gyrobus.....	26
Figure 16,	optare metrorider sous charge.....	26
Figure 17,	véhicule à recharge par induction de 20kW à Whakarewarewa.....	27
Figure 18,	bus à super-condensateurs de Moscou.....	28
Figure 19,	bobine mobile secondaire sous le bus, Gênes.....	29
Figure 20,	bus italien Elfo à recharge inductive.....	30
Figure 21,	plan du Montmartrobus.....	31
Figure 22,	Oréos 55E rue de l'Abreuvoir.....	32
Figure 23,	Montmartrobus sous charge.....	32
Figure 24,	capacité résiduelle au fil de la journée du Montmartrobus.....	33

Figure 25, trolleybus #90 express de Rome 33

Figure 26, système de recharge par induction de la ville de Turin 34

Figure 27, diagramme du système de la ville de Turin..... 35

Figure 28, évolution temporelle du biberonnage 35

Figure 29, EPT Elfo..... 38

Figure 30, Écolobus 38

Figure 31, système WATT de recharge de biberonnage 40

Figure 32, photos du bus de Proterra 41

Figure 33, trajet 291 de la Foothill Transit Authority 42

Figure 34, Capabus de Sinautec 44

Figure 35, système OLEV de KAIST 45

Figure 36, Automated People Mover de Numexia..... 46

Figure 37, borne inductive de Conductix-Wampfler 47

Figure 38, profils des vitesses Des Laurentides et De la Concorde 49

Figure 39, profils des puissances Des Laurentides et De la Concorde 49

Figure 40, graphique de l'énergie consommée entre chaque arrêt..... 50

1 DESCRIPTION SOMMAIRE DE LA TECHNOLOGIE

Selon le Larousse, le biberonnage constitue une « succession de recharges partielles d'accumulateurs ». Ce terme générique, dans le monde du transport, fait référence à des véhicules électriques ayant une faible autonomie, mais étant capables de recharge très rapide tout au long de leur parcours. Cette technique n'est utilisable que sur un parcours prédéterminé et convenablement équipé. Elle est applicable tant au transport maritime, principalement au niveau des traversiers qu'au transport terrestre, comme mode d'alimentation pour des autobus ou des tramways.



Figure 1, Vaporetto E1, Ansaldo Sistemi Industriali

1.1 VÉHICULES COMPATIBLES AU BIBERONNAGE

Le présent rapport ne s'attarde qu'au transport terrestre public. Les applications individuelles, industrielles, militaires et hors route ne sont pas considérées. Seul les autobus de tous gabarits ainsi que les tramways seront retenus.

1.1.1 SPÉCIFICATIONS DES VÉHICULES

Actuellement, les véhicules de transport public compatibles avec le biberonnage sont généralement des autobus classiques, de petite taille, qui ont été modifiés en bus électrique. En leur greffant une banque de batteries capable d'accepter une recharge rapide ou une banque de super-condensateurs, ils deviennent compatibles au biberonnage. Certains fabricants de trolleybus et de tramways présentent aussi des modèles avec une banque de batteries leur permettant de parcourir une distance sans alimentation, se rechargeant une fois rebranchés au réseau de fils aériens. Dans tous les cas, les caractéristiques souhaitables des véhicules sont un poids minimum, pour minimiser la taille et le coût de l'élément de stockage, une capacité à opérer le freinage en mode régénératif, un accumulateur capable d'accepter une recharge rapide et une connexion fiable et si possible automatisée vers la source de puissance. En effet, comme le véhicule à biberonnage est rechargé plusieurs dizaines de fois par jour, le stress mécanique et électrique imposé sur le lien avec la source est beaucoup plus grand que dans le cas d'un véhicule électrique conventionnel. L'automatisation de cette connexion est à prioriser, afin de réduire la tâche de l'opérateur et les risques d'erreurs humaines, tout en assurant une opération dans un délai minimal. Les expériences en cours ou sur le point de démarrer s'éloignent toutefois de ces spécifications. La tendance est définitivement à la mise en service de véhicules de taille « standard », soit de 40'.

1.1.2 CONDITIONS D'UTILISATION

Les contraintes inhérentes à un véhicule alimenté par biberonnage sont principalement liées à l'accumulateur. Le système de stockage doit avant tout être capable d'accepter une charge très rapide, on peut donc le caractériser de système de puissance. Par le fait même, il présente généralement une faible capacité. Ceci confine l'utilisation de véhicules par biberonnage sur des trajets où une faible autonomie est requise entre les recharges. Un véhicule léger, circulant à faible vitesse, donc requérant peu d'énergie, est aussi à privilégier pour atteindre un espacement raisonnable entre les postes de biberonnage. Si un modèle de recharge en fin de ligne est considéré, il est important, encore une fois, de minimiser la taille de la banque de batteries. Cette contrainte vient du temps nécessaire pour recharger une banque de batteries de forte capacité. Il n'est pas acceptable, pour un véhicule en service commercial, de passer une portion significative de son trajet immobilisé à un poste de recharge.

Toutes ces contraintes limitent, en pratique, l'utilisation des véhicules par biberonnage en milieu urbain, à relativement faible vitesse, à un parcours avec arrêts fréquents et compatible avec de plus petits véhicules. Par contre, tel que mentionné précédemment, les nouveaux projets de démonstration tendent à se démarquer de cette règle générale avec l'utilisation de véhicule de plus fort gabarit et à des vitesses plus élevées.

1.1.3 PROJETS DE DÉMONSTRATION/EXPLOITANTS

Les projets de démonstration de cette technologie sont peu fréquents et souvent le fruit de la collaboration entre un manufacturier et une société de transport public. Très peu de systèmes sont en exploitation commerciale à ce jour. Plus d'informations sont disponibles dans les sections « Historique » et « Situation Actuelle » du présent document.

1.2 SYSTÈMES DE STOCKAGE DE L'ÉNERGIE

Les diverses technologies de stockage d'énergie, outre le carburant (diesel ou essence) peuvent être classées dans trois catégories :

- Electrochimique (batteries)
 - Lithium-ion (li-ion)
 - Acide-plomb ($PbSO_4$)
 - Hydrure métallique de nickel (Ni-MH)
 - Nickel-cadmium (Ni-Cd)
 - Sodium – chlorure de métal (Zebra)
- Electrostatique (super-condensateurs)
- Electromécanique (volant d'inertie)

Chacune de ces technologies sera présentée dans les pages qui suivent, car elles peuvent toutes être utilisées dans un véhicule à recharge par biberonnage.

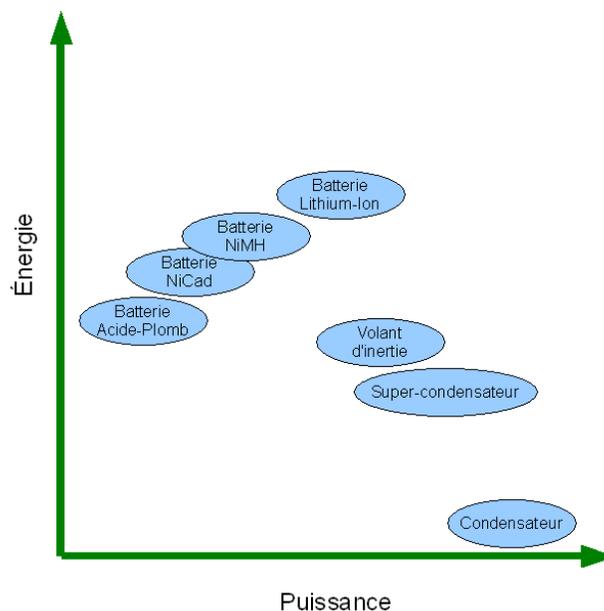


Figure 2, graphique de puissance et d'énergie des diverses formes de stockage

1.2.1 BATTERIES

Voici un récapitulatif de l'évolution et de l'état actuel des batteries utilisables dans un véhicule à biberonnage. La majorité de ces informations ont déjà été présentée à la STL dans le rapport « Étude de faisabilité et d'impacts sur l'implantation d'un réseau de trolleybus à Laval ».

1.2.1.1 HISTORIQUE

La batterie, plus spécifiquement la cellule, fût inventée par le physicien italien Alessandro Volta dans les années 1800. Elle était constituée de deux électrodes, l'une faite en zinc et l'autre en cuivre. L'électrolyte dans lequel baignait les deux électrodes consistait en de l'acide sulfurique. La différence d'électronégativité entre les deux matériaux permet l'échange d'ions et donc, un transfert d'énergie.

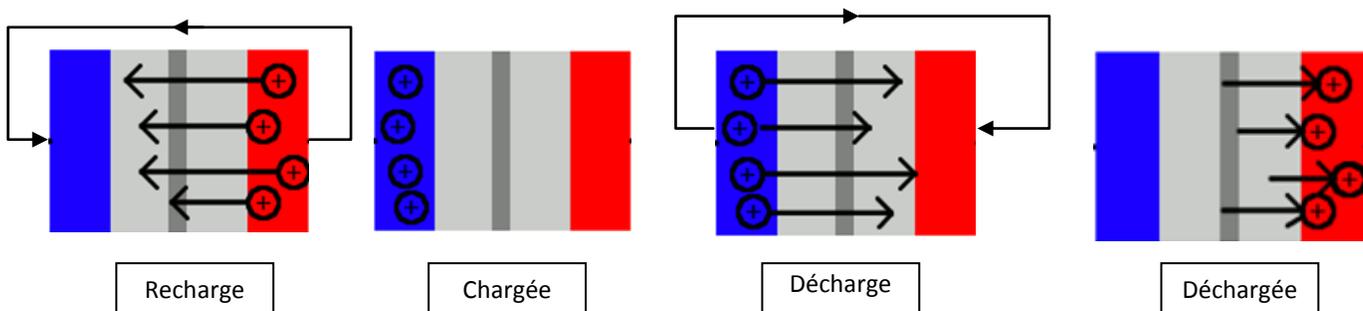
Plusieurs « chimies » de batteries existent. Le principe d'une batterie repose sur le fait d'avoir deux électrodes de matériaux différents. Ces matériaux doivent aussi présenter une électronégativité différente. Un électrolyte entre les deux électrodes permet l'échange d'ions et donc, le transfert d'énergie chimique. S'il existe diverses chimies, dans le domaine des transports les principales sont :

- Ni-MH (Nickel-hydrure métallique) – se retrouve sur la plupart des voitures hybrides actuelles comme la Toyota Prius. Ce type de batterie est passablement sensible au froid;
- Li-ion ou Li-polymère (Lithium) – se retrouve dans la plupart des voitures électriques actuelles et à venir comme la Tesla Roadster et la Chevrolet Volt, ainsi que dans les ordinateurs portatifs, les caméras et les téléphones cellulaires. Moyennement sensible au froid;
- Ni-Cad (Nickel-Cadmium) – se retrouve dans les voitures électriques des années 90. Le Cadmium étant une substance bannie en Europe, ce type de batterie n'est plus fabriqué. Très sensible au froid;
- Acide-plomb – se retrouve dans les voitures comme batteries de démarrage (12V) et dans les voiturettes de golf. Très sensible au froid.

1.2.1.2 PRINCIPE D'OPÉRATION

De façon analogue au système hydraulique et mécanique, le système chimique contient un accumulateur qui emmagasine l'énergie qui lui est transférée, soit la batterie.

Bleu = Anode (borne négative) Gris = Séparateur et électrolyte Rouge = Cathode (borne positive)



Dans le contexte actuel, pour les raisons énumérées ci-dessous, la seule batterie qui mérite de s'y attarder est la Lithium-Ion. Voici tout de même un tableau récapitulatif des différentes technologies de batteries.

1.2.1.3 BATTERIE – LITHIUM-ION

DESCRIPTION

Le lithium est le métal le plus léger et il possède une grande électronégativité (3.6 V). Ces deux caractéristiques font du lithium un élément au potentiel de densité de puissance et d'énergie très intéressant pour une batterie nécessitant un faible volume et poids, donc tout indiqué pour les applications de transport. D'ailleurs, leur poids est de 4X inférieur à une batterie au plomb pour une même énergie emmagasinée. Les cellules dites lithium-polymère diffèrent des lithium-ion principalement au niveau de leur électrolyte. Ce dernier étant un polymère solide au lieu d'un électrolyte liquide. L'objectif étant la réduction des coûts, l'amélioration de la durabilité et la possibilité de formes plus complexes.

Plusieurs électrochimies existent et ont chacune leurs caractéristiques.

Phosphate LiFePO₄

Les chimies utilisant le lithium phosphate sont considérées plus stables que les autres, possédant une résistance thermique tout en étant plus stable en cas de surcharge. De plus, elles ne sont pas sujettes à s'enflammer lors de surcharges. Elles ont toutefois un plus faible potentiel électrochimique et sont donc de plus faible puissance et énergie. Leur impact environnemental est perçu plus faible et plusieurs recherches se font présentement pour améliorer leur performance.

Cobalt LiCoO₂

Les chimies utilisant le cobalt sont populaires dues à leur grande puissance potentielle (3.7V). Elles sont les plus utilisées à ce jour et sont disponibles chez nombre de manufacturiers. Malheureusement, leur instabilité et inflammabilité, quoique réduite avec l'utilisation de polymère, ont condamné ces dernières dans les applications de grande puissance. Enfin, le cobalt étant onéreux, leur coût n'est pas appelé à diminuer avec le temps. De plus, le cobalt est considéré comme un métal toxique. Elles restent toutefois utilisées dans les applications courantes comme les appareils électroniques portatifs.

Manganèse LiMn₂O₄

L'utilisation du manganèse dans les cellules au lithium est considérée plus stable que celle au cobalt. Leur puissance est supérieure (3.8 à 4V). Mais leur densité énergétique est un peu plus faible. Leur coût devrait toutefois être inférieur et leur performance thermique supérieure. Les cellules au manganèse sont très répandues, quoiqu'un peu moins que celles au Cobalt, mais elles ont un impact moindre sur l'environnement.

Amalgame

Le concept de l'amalgame, quelques fois appelé 1/3, est d'utiliser une variété de réactants, incluant le cobalt et le manganèse, afin d'obtenir une chimie stable mais performante, combinant les avantages de chacun tout en réduisant les risques et le coût associé aux métaux précieux.

Lithium métal polymère

Développées spécifiquement pour les applications de transport et les grandes densités énergétiques, ces batteries emploient un film de lithium métallique comme anode, dans l'optique d'une grande longévité. Elles ne sont toutefois pas disponibles commercialement pour l'instant.

Les cellules au lithium furent considérées dangereuses initialement, à cause de la grande réactivité du lithium à l'eau, pouvant résulter en flammes. Les cellules récentes n'utilisent plus de lithium à l'état métallique mais davantage des ions de lithium.

Par ailleurs, plusieurs formes de cellules existent. Les plus répandues sont de petits cylindres nommé 18650, semblable à des piles AA. Ces dernières sont très répandues dans les ordinateurs portables et dans les téléphones cellulaires.

Elles ne sont toutefois pas adaptées aux systèmes à très grande énergie, tel que dans un véhicule. Cela est dû à leur trop grand nombre pour arriver à une énergie considérable (une Tesla, par exemple, a plus de 6500 cellules). Récemment, plusieurs manufacturiers présentent des cellules de plus grande dimension dites prismatiques, dont l'anode, la cathode et le séparateur, au lieu d'être enroulés comme sur la cellule cylindrique, sont superposés en couche de plus grande dimension. D'ailleurs, si la fabrication en grande série des cellules 18650 est répandue, la fabrication des cellules prismatiques ou de plus grandes tailles nécessaires pour les applications de transport n'est pas encore répandue. Ainsi, les prix pour les applications de transport sont encore très élevés. Ils sont toutefois appelés à baisser à moyen terme grâce aux nombreux investissements actuels dans le domaine.

Densité énergétique : 100-160 Wh/kg

Densité de puissance : 250 – 750 W/kg

AVANTAGES

- Grande puissance
- Grande énergie
- Très bonne densité énergétique (faible poids)
- Potentiel de développement très élevé
- Courbe de décharge plate – perte de puissance en fin de cycle réduite ce qui permet de long cycle de décharge
- Décharge à forte capacité possible
- Aucun effet de mémoire
- Faible décharge lorsque non-utilisée
- Ne « perd » pas de cycle si déchargé faiblement
- La chimie peut être modulée pour obtenir une plus grande énergie ou une plus grande puissance

DÉSAVANTAGES

- Plus faible puissance qu'un super condensateur
- Coût très élevé pour l'instant
- Architecture pour transport en développement (cellules prismatiques)
- Spécialisé dans les petits formats de cellules (18650)

PRINCIPAUX MANUFACTURIERS

A123, Enerdel, Électrovaya, LG Chem, Kokam, etc.

1.2.1.4 BATTERIE – HYDRURES MÉTALLIQUES DE NICKEL (NI-MH)

DESCRIPTION

Les batteries au nickel et hydrure métallique (Ni-MH) sont liées au nickel-cadmium (Ni-Cd) et diffèrent principalement à l'anode qui utilise l'hydrogène au lieu du cadmium comme élément actif, regroupé sur une électrode faite d'hydrure métallique utilisant des métaux rares. Cette chimie est d'une électronégativité plus faible (1.2V), mais grâce à leur faible poids, elles ont une densité énergétique de plus du double par rapport à une batterie acide-plomb et de près de 40% plus élevée qu'une nickel-cadmium.

Densité énergétique : 70-80 Wh/kg

Densité de puissance : 250 –1000 W/kg

AVANTAGES

- Grande puissance
- Densité énergétique meilleure que les batteries acide-plomb
- Fiabilité reconnue grâce à l'utilisation dans les voitures hybrides
- Ne « perd » pas de cycle si déchargé faiblement
- Effet de mémoire très faible

DÉSAVANTAGES

- Coût très élevé
- Potentiel de développement limité / atteint
- Densité énergétique relativement faible par rapport au lithium
- Disponibilité en retrait
- Décharge relativement élevée lorsque non-utilisée

PRINCIPAUX MANUFACTURIERS

Ovonic, Panasonic, Sanyo, etc.

1.2.1.5 BATTERIE – ACIDE-PLOMB (PbSO₄)

DESCRIPTION

Les batteries au plomb se prêtent très bien à des applications stationnaires, grâce à leur faible coût et à leur grande accessibilité. Elles ont une électro-négativité de 2V et reste la technologie de choix pour les applications de démarrage automobile et de support aux accessoires en transport, grâce à leur faible coût et à leur robustesse éprouvée depuis plusieurs décennies. Elles ne sont toutefois pas adaptées à des hautes tensions et ont un potentiel de décharge relativement limité. Elles bénéficient toutefois d'un très grand réseau de recyclage et presque 100% de la batterie est récupérée. Plusieurs variétés de batteries acide-plomb existent et varient par la dimension de leurs composantes internes.

Densité énergétique : 30-40 Wh/kg

Densité de puissance : 180 W/kg

AVANTAGES

- Recyclable
- Technologie éprouvée depuis plusieurs décennies
- Faible coût
- Grande disponibilité
- Bonne puissance
- Aucun effet de mémoire

DÉSAVANTAGES

- Extrêmement lourde
- Faible densité énergétique
- Potentiel de développement atteint
- Possibilité d'émanation de gaz lors de la recharge

PRINCIPAUX MANUFACTURIERS

Energys, Varta, Johnson Controls, Hawker, Powerbat, Exide, etc.

1.2.1.6 BATTERIE – SODIUM – CHLORURE DE MÉTAL (ZEBRA)

DESCRIPTION

Le sodium, comme le lithium, possède un haut niveau d'électronégativité (2.7V) et une masse atomique faible (23) en faisant un élément intéressant pour une batterie; dans la batterie Zebra, il est utilisé sous forme de NaAlCl₄. L'électrode positive se compose de chlorure de nickel (NiCl₂) ou de chlorure de fer (FeCl₂). Ces batteries sont composées d'éléments relativement moins coûteux que les batteries au lithium. Elles sont fiables et sécuritaires dans la plupart des conditions. Toutefois, elles ont une température d'utilisation entre 270 et 350 °C. Elles ont une densité de puissance de 150 W/kg et une densité énergétique de 90 Wh/kg. Elles peuvent effectuer plus de 1500 cycles de recharge. Par contre, elles doivent être maintenues en température lorsqu'elles ne sont pas utilisées, puisqu'elles opèrent à haute température et que le réchauffage des batteries peut prendre plusieurs heures, voir quelques jours. Les batteries peuvent toutefois prendre quelques jours pour se refroidir. Notons que c'est ce type de batterie qui équipe l'Écolobus de Québec.

Densité énergétique : 90 Wh/kg

Densité de puissance : 150 W/kg

AVANTAGES

- Technologie éprouvée - Système sécuritaire et fiable
- Bonne densité énergétique
- Coût relativement abordable par rapport aux batteries lithium
- Bonne disponibilité des matières premières

DÉSAVANTAGES

- Doit fonctionner à haute température
- Nécessite, lorsque déchargée ou laisser au repos pour plusieurs jours, une longue période pour remonter en température et être utilisable.

PRINCIPAUX MANUFACTURIERS

MDS-DEA – Zebra

1.2.1.7 BATTERIE – NICKEL CADMIUM (NI-CD)

DESCRIPTION

Ces batteries sont dans les premières réalisées pour palier aux désavantages des batteries au plomb. Leur composition de nickel cadmium offre une plus grande densité énergétique et de puissance que les batteries au plomb. Elles présentent toutefois deux désavantages majeurs, soit un grand effet de mémoire et l'utilisation de cadmium considéré toxique. D'ailleurs, les piles au cadmium sont bannies dans l'Union Européenne.

Densité énergétique : 40-60 Wh/kg

Densité de puissance : 150 W/kg

AVANTAGES

- Technologie éprouvée depuis plusieurs décennies
- Puissance intéressante

DÉSAVANTAGES

- Effet de mémoire très important
- Considérée toxique et bannie de l'Union Européenne
- Potentiel de développement atteint
- Courbe de décharge importante, donc perte de puissance importante lorsque l'énergie emmagasinée est faible.

1.2.2 SUPER-CONDENSATEURS

1.2.2.1 HISTORIQUE

Le condensateur fût inventé au 18^e siècle, en Europe. Il fût toutefois utilisé de façon pratique par un chimiste anglais du nom de Michael Faraday, qui a d'ailleurs donné son nom à l'unité de mesure d'un condensateur, soit le farad (F).

Un condensateur est constitué de deux « plaques » conductrices séparées par un élément non conducteur, appelé diélectrique. Cet élément est polarisable, la charge se trouve donc en surface d'un côté du diélectrique – voir la figure ci-dessous.

Bleu = borne négative Gris = diélectrique Rouge = borne positive

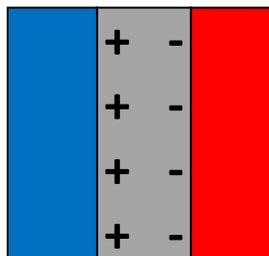


Figure 3, diagramme d'un condensateur

Ainsi, l'accumulation d'énergie peut aussi se faire sur des condensateurs. Similairement à une batterie, ils servent à emmagasiner l'énergie électrique; ils fonctionnent toutefois complètement différemment. Si une batterie emmagasine l'énergie grâce à des réactions chimiques produisant des électrons, un condensateur fonctionne plus simplement, il emmagasine directement les électrons. Comme aucune réaction chimique n'a lieu, un condensateur peut relâcher son énergie de façon presque instantanée et est donc beaucoup plus puissant qu'une batterie. De plus, il peut se charger presque instantanément, il est donc tout indiqué pour un freinage régénératif puissant. Toutefois, la faiblesse d'un condensateur réside dans la faible énergie qu'il peut emmagasiner. Ainsi, si des condensateurs sont employés dans la plupart des éléments électroniques, les applications de transport demandent énormément d'énergie. Des condensateurs pouvant emmagasiner davantage d'énergie furent donc développés; on appelle ces derniers des super-condensateurs. Ces super-condensateurs se distinguent des condensateurs habituels par le fait qu'ils utilisent un électrolyte et des électrodes spécifiques. Ils peuvent se charger en très peu de temps et ils ont un nombre de cycle charge-décharge presque infini, comparativement à une batterie qui a une limite à se niveau et s'use avec le temps. La puissance, c'est-à-dire la capacité à restituer rapidement de l'énergie, d'un super-condensateur est beaucoup plus faible que celle d'un condensateur conventionnel, mais reste largement supérieur à n'importe quelle batterie. Une batterie de puissance moderne peut exhiber jusqu'à 750W/kg, alors que le super-condensateur remporte la palme avec 4000W/kg. Par contre, au niveau de la densité d'énergie, le rapport de force est inversé; 130Wh/kg dans le cas d'une batterie de pointe mais seulement 30Wh/kg pour le super-condensateur. Ces chiffres mettent en lumière la caractéristique transitoire de cet accumulateur. Il est tout indiqué pour un système régénératif ou par biberonnage mais ne peut que servir d'appoint dans un véhicule à batteries de grande autonomie.

1.2.2.2 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU SUPER-CONDENSATEUR

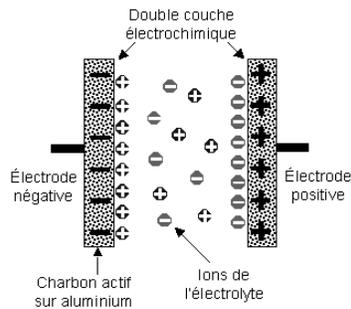


Figure 4, image d'un super-condensateur

Étape 1 – Accumulation

Dans un véhicule, le super-condensateur prend le même rôle que la batterie, il emmagasine l'énergie électrique. Il peut être rechargé de deux façons, soit par le mouvement du véhicule lui-même, dans le cas du freinage régénératif, soit lorsque le véhicule est chargé. Cependant, contrairement à la batterie qui serait rechargée durant la nuit par exemple, le super-condensateur pourrait être chargé de façon très rapide durant les arrêts d'un trajet. Cette méthode est appelée « biberonnage » et est présente dans certains prototypes de transport en commun, comme les bus. Enfin, il existe certains modes de transports électriques, comme les trains électriques, les tramways et les trolleybus qui utilisent des super-condensateurs dans des sous-stations de la ligne de transmission électrique, pour récupérer l'énergie de freinage. Le tramway par exemple, qui est relié au réseau électrique par une perche lié à des fils aériens qui lui transfèrent de l'énergie; il est alimenté en permanence. L'énergie régénérée lors d'un freinage est ainsi retransmise via la perche directement dans le réseau électrique, au lieu de l'être dans une batterie ou un super-condensateur. Ainsi, elle peut être réutilisée par un autre tramway présent sur la même ligne qui lui, accélérerait au même moment. S'il y a trop d'énergie régénérée par le freinage et la demande n'est pas assez grande, l'énergie en surplus dans le réseau est stockée dans des super-condensateurs qui sont au sol, dans des sous-stations. Le tramway ou le trolleybus n'a ainsi pas besoin de transporter un encombrant et lourd système d'emmagasinage d'énergie, ce dernier étant accessible dans le réseau.



Figure 5, photo Irisbus et Tramway de Paris

Étape 2 – Relâchement

L'objectif du système est de retransmettre l'énergie emmagasinée de façon électrique en énergie cinétique servant à déplacer le véhicule. Ainsi, l'énergie emmagasinée dans le super-condensateur est transmise au moteur électrique embarqué sur la voiture, le bus ou le train. Ce dernier fournit ainsi un couple qui fait tourner les roues du véhicule afin de le faire avancer.

1.2.2.3 EXEMPLES D'APPLICATIONS

Tel que mentionné précédemment, les super-condensateurs peuvent être soit embarqués dans le véhicule, ce qui est habituellement le cas, soit localisés dans le réseau pour recevoir l'énergie. Les applications les plus fréquentes dans le transport à l'heure actuelle sont les applications de transport collectif comme les bus et les tramways. Ces derniers font des cycles arrêts/départs fréquents, ils sont donc tout indiqués pour des systèmes ayant une forte puissance et une énergie relativement faible.

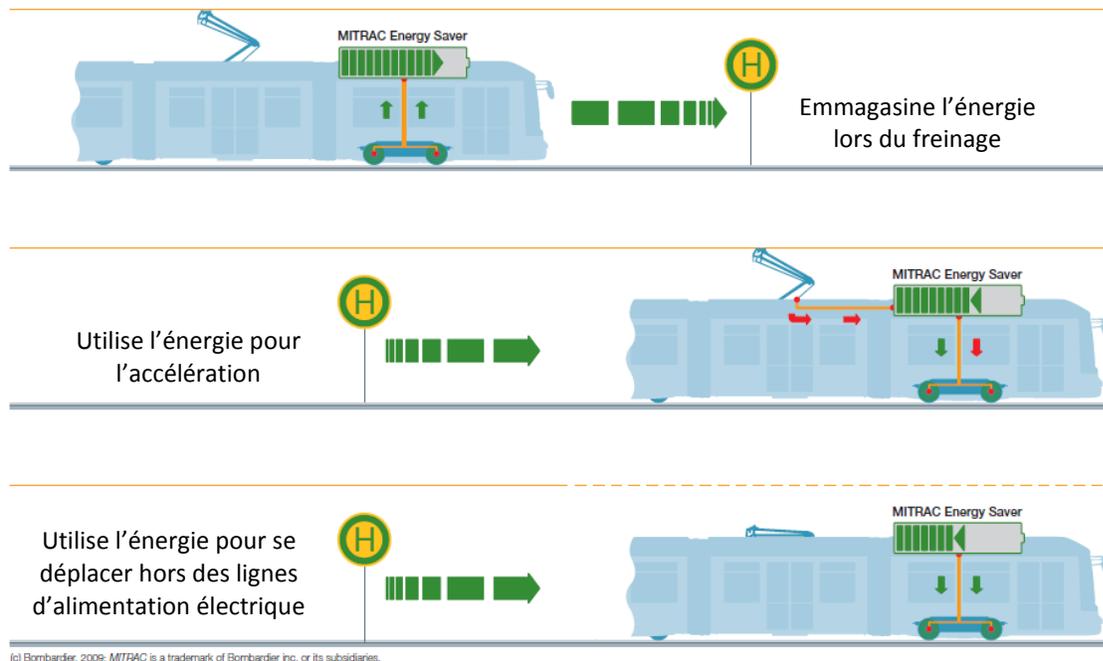


Figure 6, système Mitrac¹ de Bombardier

AVANTAGES

- Très grande puissance
- Durée de vie plus longue que les batteries
- Impact environnemental faible
- Très grande efficacité (près de 95-97%)
- Tension de « cellule » élevée
- Très haute densité de puissance

¹ <http://www.bombardier.com/wps/portal/fr/transport/produits-et-services?docID=0901260d8000e737>

- Recharge extrêmement rapide
- Faible maintenance et simplicité de construction

DÉSAVANTAGES

- Coût élevé
- Moins grande densité énergétique, donc solution moins avantageuse que d'autres lorsqu'une autonomie pure électrique est demandée.

PRINCIPAUX MANUFACTURIERS

WIMA, Nesscap, Maxwell, etc.

1.2.3 ROUES D'INERTIE

1.2.3.1 HISTORIQUE

Le principe du volant d'inertie est connu depuis plus de 1000 ans². Le volant ou roue d'inertie sert généralement à réguler la vitesse de rotation en sortie, en absorbant les variations mineures en entrée grâce à sa masse. Plus récemment par contre, il a commencé à être utilisé comme moyen de stockage d'énergie.

1.2.3.2 PRINCIPE D'OPÉRATION

Le principe d'un volant d'inertie, appelé « flywheel » en anglais, est de conserver l'énergie du mouvement en rotation, appelée énergie cinétique, dans un disque ayant assez d'inertie, c'est-à-dire une masse élevée, pour conserver cette énergie. Le disque absorbe l'énergie en accélérant et la conserve en tournant sur lui-même de façon continue, même lorsque l'approvisionnement en énergie est coupé. Par la suite, lorsque le système a besoin d'énergie, elle est restituée à partir du disque en rotation et relâchée en le ralentissant par application d'une force mécanique sur l'arbre de rotation.

Si ce système est relativement simple en théorie, il implique l'utilisation d'un disque relativement lourd et dont la friction est minimale. Certaines variations impliquent un disque moins lourd, fait de composite, mais qui tourne à très grande vitesse. Cette très grande vitesse de rotation d'une masse constitue un potentiel de danger.

Par ailleurs, tel que mentionné plus haut, un volant d'inertie est souvent utilisé pour stabiliser les irrégularités ou les vibrations d'un système en rotation. Par exemple, sur un moteur thermique ordinaire, le volant d'inertie agit pour absorber la vibration du vilebrequin moteur qui ondule à cause de l'explosion dans chacun des cylindres. En entrée du volant d'inertie, après le vilebrequin, le mouvement est saccadé, tandis qu'en sortie du volant d'inertie, le mouvement est plus fluide et continu afin d'être transmis aux roues de façon régularisée.

Étape 1 – Accumulation

Dans la phase d'accumulation, une source électrique est utilisée pour alimenter un moteur relié à l'arbre du volant d'inertie. Ce moteur accélère la masse en rotation tant qu'il est alimenté. Aussi longtemps que la vitesse de rotation de la masse augmente, le système emmagasine de l'énergie. Évidemment des contraintes mécaniques limitent la vitesse maximale du disque. Il en résulte donc une accumulation d'énergie limitée. Ce système peut aussi être utilisé pour la récupération d'énergie du freinage. La source d'alimentation est à ce moment un générateur électrique intégré à la transmission d'un véhicule.

² <http://en.wikipedia.org/wiki/Flywheel>

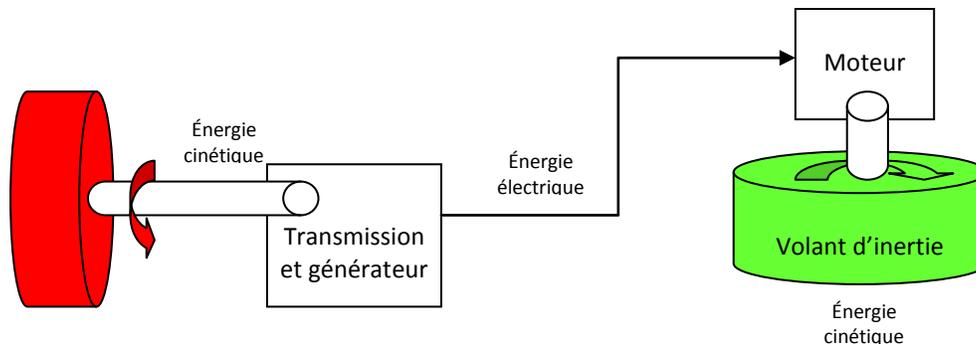


Figure 7, récupération d'énergie cinétique par volant d'inertie

Étape 2 – Restitution

Le moteur qui entraîne la roue d'inertie est contrôlé de façon à présenter un couple inverse à la masse en rotation. Ceci a pour effet de ralentir le volant d'inertie et générer un courant électrique qui peut être utilisé à d'autres fins. Dans le cas d'un système embarqué sur un véhicule, l'énergie électrique est transférée dans le moteur électrique situé dans la transmission et ce dernier accélère le véhicule.

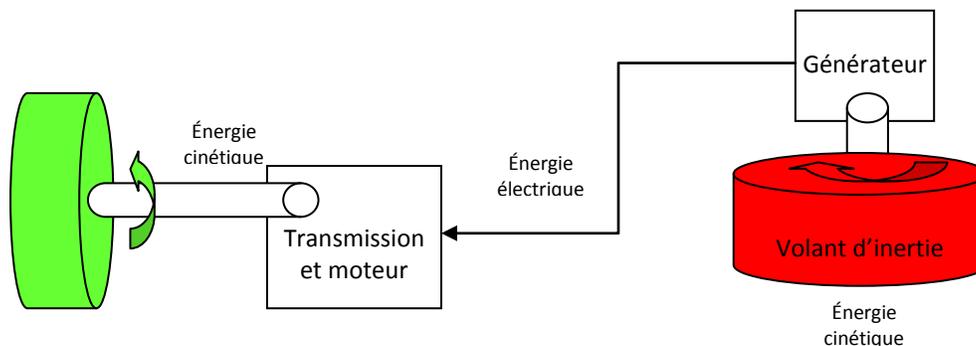


Figure 8, restitution d'énergie d'un volant à inertie

AVANTAGES

- Densité d'énergie importante
- Absorption et restitution d'énergie rapide
- Insensibilité au froid
- Aucun effet de mémoire
- Impact environnemental faible, ne contient aucun produit chimique

DÉSAVANTAGES

- Système connu depuis longtemps mais toujours peu développée
- Potentiel impact sur la stabilité du véhicule
- Sécurité à démontrer

1.2.3.3 UTILISATION MODERNE

Ce principe a été utilisé, de façon commerciale dans au moins un véhicule, soit le Gyrobus. La section « Gyrobus » du présent document en parle plus largement.

En 2009, certaines voitures Formule 1 furent équipées d'un système de récupération d'énergie, appelé SREC ou KERS en anglais. Bien que la plupart des écuries choisissent un système électrique récupérant l'énergie sous forme chimique dans des batteries, l'écurie Williams utilisa un système incluant un volant d'inertie tournant à très haute vitesse. En effet, ce dernier tournait à près de 40 000 tours par minute. Pour donner un élément de comparaison, un moteur à essence d'une voiture conventionnelle tourne à un maximum de 6000 tours par minutes et un moteur de Formule 1 moderne révolutionne à 19 000 tours. Le système ajoute près de 30 kg à la voiture³. Le système emmagasine l'énergie au freinage et la délivre lorsque le pilote appuie sur un bouton situé sur le volant, actionnant le système et renvoyant l'énergie emmagasinée dans la transmission pour aider à accélérer davantage le véhicule.

L'importante firme de consultation en développement de véhicule, Ricardo, a d'ailleurs annoncé un système d'accumulation d'énergie par volant d'inertie pour véhicules hybrides abordables. Le système nommé Kinergy⁴ contourne un problème majeur des systèmes de volant à inertie, soit la conservation d'un vide partiel. Afin de minimiser la perte d'énergie par friction dans un système « conventionnel », un vide partiel est créé dans le caisson contenant le volant d'inertie. Ceci demande donc une pompe à vide et un système de sceau d'étanchéité rotatif pouvant résister à des vitesses de rotation extrêmes. Le système Kinergy utilise le principe du couplage magnétique et présente donc un caisson entièrement scellé, mis sous vide à l'usine. La transmission de puissance se fait magnétiquement au travers des parois du caisson.

Dans tous les systèmes de volant à inertie, si la force centrifuge exercée dépasse la résistance de la masse en rotation, une explosion du volant se produit. Cette explosion libère instantanément toute l'énergie emmagasinée. Le caisson doit être extrêmement robuste pour pouvoir contenir les fragments.



Figure 9, système Kinergy de Ricardo

Par ailleurs, il existe plusieurs autres applications pour les volants à inertie dans le domaine ferroviaire, dans les satellites et autres.

³ <http://www.gizmag.com/formula-one-kers/11324/>

⁴ <http://www.ricardo.com/en-gb/News--Media/Press-releases/News-releases1/2009/Ricardo-Kinergy-delivers-breakthrough-technology-for-effective-ultra-efficient-and-low-cost-hybridisation/>

1.3 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU BIBERONNAGE

Tel que mentionné précédemment, le biberonnage constitue une « succession de recharges partielles d'accumulateurs ». Cette façon de procéder permet de contourner deux des obstacles majeurs des véhicules électriques. L'utilisation de recharges successives donne une autonomie effective infinie au véhicule. Tant qu'il peut se rendre au prochain point de biberonnage avec l'énergie résiduelle à bord, il peut rester en service. La seconde limitation contournée est celle du coût des batteries. Un véhicule fonctionnant par biberonnage nécessite beaucoup moins de batteries qu'un véhicule rechargeable conventionnel, étant donné la faible distance à parcourir entre les recharges.

Trois types de biberonnage se distinguent. Le premier consiste à effectuer une recharge partielle, assez longue, en bout de ligne d'un trajet prédéfini. Cette option ne permet pas la recharge complète de la batterie, mais seulement de recharger une quantité d'énergie suffisante pour compléter à nouveau le parcours. Le second type de biberonnage est d'effectuer une recharge très sommaire mais fréquente le long du parcours. Pour minimiser le temps d'arrêt du véhicule, la recharge ne permet pas un grand transfert d'énergie vers le véhicule. Par contre, sa rapidité la rend possible à plusieurs arrêts le long du parcours. L'utilisation de cette technique peut nécessiter des infrastructures de recharge ayant une capacité d'accumulation locale. Étant donné la forte puissance transmise très rapidement au véhicule, un accumulateur local permet de réduire considérablement la taille de l'interconnexion au réseau électrique. Cet accumulateur est rechargé à un taux acceptable par le réseau entre le passage de deux véhicules. Le troisième type de biberonnage est celui de la recharge quasi continue. Dans ce cas, le véhicule est alimenté presque en continu, soit par un système de fils aériens ou par induction sous le tracé. Le véhicule possède une très faible autonomie sans cette alimentation, mais peut tout de même parcourir une portion du trajet où l'alimentation est impossible.

1.3.1 TABLEAU COMPARATIF

Type de biberonnage	Ultra-rapide avec accumulateur local	En bout de ligne	Quasi continu
Coût des accumulateurs embarqués	Élevé, appelé à baisser	Élevé, peu appelé à changer	Peu élevé
Coût des postes de recharge	Élevé	Peu élevé	N/A
Autonomie entre les recharges	Faible	Élevé	Très faible
Temps des recharges	Faible	Moyen à élevé	Élevé, continu
Flexibilité des trajets	Faible	Moyen	Très faible
Quantité de postes de recharge	Élevé	Faible	N/A
Coût des infrastructures	Élevé	Moyen	Très élevé
Coût des véhicules	Élevé, appelé à baisser	Moyen	Moyen à élevé
Maturité de la technologie	Peu mature	Moyenne	Variable

Figure 10, tableau comparatif des types de biberonnage

Pour fin de comparaison, la permutation de batteries a volontairement été omise, car elle ne constitue pas en soi une forme de biberonnage. Cette option est décrite à la section 3.3.2 du présent document.

1.4 DESCRIPTION DES INFRASTRUCTURES

1.4.1 RECHARGE EN BOUT DE LIGNE

Les infrastructures nécessaires à l'implantation d'un système avec recharge en bout de ligne sont les plus simples et les moins coûteuses. Les équipements nécessaires sont très près des équipements traditionnels de recharge. Généralement, un chargeur de très forte puissance est branché manuellement au véhicule par un cordon d'alimentation surdimensionné. Évidemment, un système de contact automatisé ou même de transmission d'énergie par induction est possible. Aucune autre infrastructure n'est nécessaire le long du parcours.

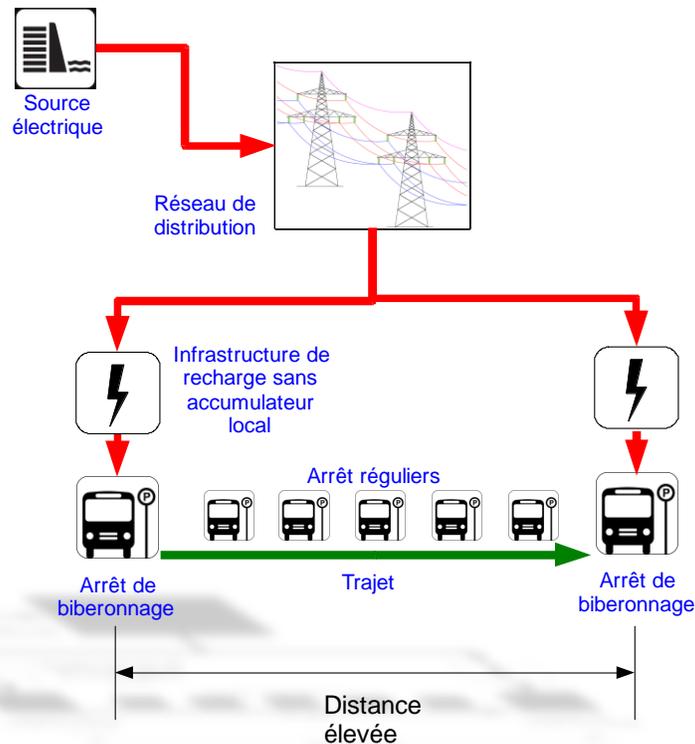


Figure 11, schéma de fonctionnement de biberonnage en bout de ligne

1.4.2 RECHARGE ULTRA-RAPIDE DISTRIBUÉE

Dans le cas d'un modèle à recharge ultra-rapide distribuée sur le parcours, le coût et la complexité des infrastructures augmentent considérablement. Dû au nombre très fréquents de recharges par parcours, le poste de charge doit être capable d'opérer sans intervention humaine. Des systèmes automatisés de contact par le toit ou par induction sous le véhicule doivent être privilégiés. Les postes de recharges doivent potentiellement être équipés d'un accumulateur local afin de diminuer la charge instantanée sur le réseau électrique. En effet, la demande instantanée est très importante. Prenons par exemple un véhicule efficace qui consomme 1.5kWh/km. Si une recharge est prévue à tous les 2 km du parcours et qu'elle doit s'effectuer en 10 secondes, cela fait une demande instantanée de 1MW. Pour mettre cette puissance en perspective, cela représente la charge moyenne de

290 maisons. De par la nature de ce type d'installation, le coût augmente significativement par rapport à un simple chargeur haute vitesse.

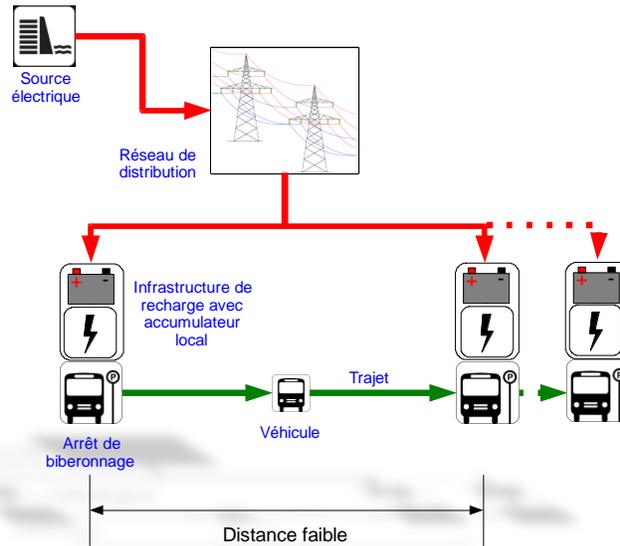


Figure 12, schéma de fonctionnement de biberonnage à recharge ultra-rapide

1.4.3 RECHARGE QUASI-CONTINUE

Finalement, les infrastructures requises pour la recharge quasi-continue sont encore plus imposantes. Que ce soit par réseau de fils aériens ou par boucle d'induction sous le parcours, le coût d'installation est important. Dans le cas du réseau aérien l'entretien est aussi à considérer. Par contre, l'interconnexion avec le réseau électrique est assez simple. La demande en puissance est assez faible donc les équipements classiques de trolleybus ou tramway peuvent être utilisés tels quels.

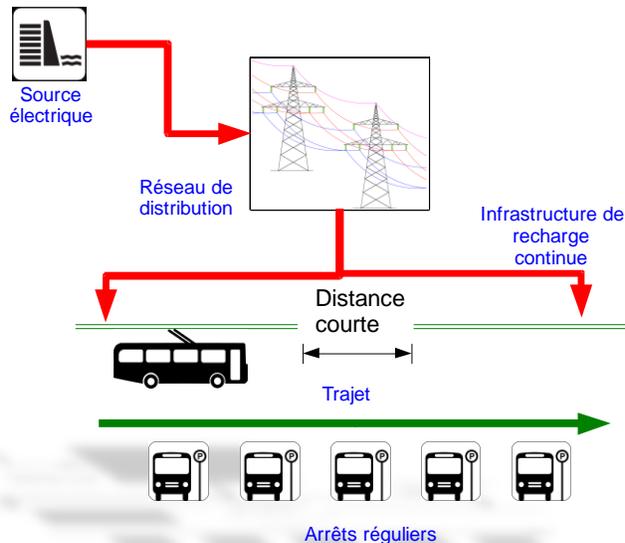


Figure 13, schéma de fonctionnement de biberonnage à recharge quasi-continue

2 HISTORIQUE

2.1 GYROBUS

Le Gyrobus est un bus par biberonnage qui utilise un volant d'inertie au lieu d'une batterie comme forme de stockage d'énergie. Les premiers travaux sur ce type de propulsion sont attribués à Auguste Scherl en 1909 dans la région de Berlin. Il a été développé dans une optique commerciale en 1944 par la société Oerlikon de Suisse, pour mouvoir des tracteurs ferroviaires. Le premier prototype de bus a été dévoilé en 1950. Il n'en existe toutefois plus en service. Selon la topographie du parcours, la distance franchissable entre 2 « recharges » était de 6 à 10km. La mise en vitesse du volant à inertie prenait entre 30 secondes et 3 minutes selon la tension disponible sur les perches montées sur le toit.



La première mise en service du système Gyrobus, entre Yverdon-les-Bains et Grandson, a eut lieu en 1953 et l'exploitation commerciale a cessé en 1960. La deuxième utilisation commerciale a vue le jour en Afrique, à Léopoldville au Congo belge (aujourd'hui Kinshasa en République démocratique du Congo). Douze véhicules ont été exploités sur quatre lignes, avec des postes de recharge à tous les deux kilomètres. Ces bus de 10.4 mètres pesaient 10.9 tonnes et transportaient jusqu'à 90 passagers à 60km/h. Leur utilisation a été abandonnée en 1959 principalement dû à une usure excessive du volant d'inertie. En effet l'utilisation fréquente de « raccourcis » dans le trajet résultaient en opération sur des routes non-asphaltées.

Le dernier système mis en fonction est celui de Gand, en Belgique. Là aussi l'expérience n'a été que de courte durée. La route Gand - Merelbeke devait être le début d'un réseau étendu, mais seulement cette ligne a été opérée, sporadiquement, entre 1956 et 1959. Les bus passaient effectivement plus de temps à l'atelier que sur la route. La consommation électrique par kilomètre (2.9 kWh/km) était supérieure à celle d'un tramway, qui avait pourtant une plus grande capacité de passagers.

Bien qu'il ne subsiste plus d'exemplaire en service, des recherches se poursuivent sur cette technologie. En voici les principaux avantages et inconvénients :



Figure 14, gyrobus exposé au musée d'Anvers

Avantages du système Gyrobus

- Peu bruyant
- Non polluant, si l'électricité provient d'une source renouvelable
- Fonctionne sans lignes de contact, apprécié en milieu urbain
- Les lignes peuvent facilement être modifiées par rapport à une technologie avec alimentation par caténaire

Désavantages du système Gyrobus

- Pour un bus de 20 personnes le volant d'inertie pèse 3 tonnes

- La sécurité doit être examinée. La vitesse de rotation du disque de 3000 tours/minutes donne une vitesse tangentielle de 900 km/h.
- Le volant à inertie complique la conduite du bus. En effet, il se comporte comme un gyroscope lors de changements de directions.
- Le temps de « recharge » est trop long, il peut atteindre 3 minutes par arrêt.

En 1979 l'entreprise GE a reçu une subvention de 5 millions de dollars US du « Department of Energy » et du « Department of Transportation » pour concevoir un prototype de bus mu par volant à inertie. Cette technologie a aussi été expérimentée par Volvo dans les années 80 dans un prototype où la roue d'inertie était entraînée par un petit moteur diesel. L'accélération de la masse pouvait aussi se faire par freinage régénératif. Ces essais ont été abandonnés en faveur d'un système d'accumulateur hydraulique.



Figure 15, perches d'alimentations du Gyrobus

2.2 OPTARE METRORIDER



Figure 16, optare metrorider sous charge

La firme Optare, de Grande-Bretagne, a produit en 1993 une version électrique de son midibus Metrorider. Quatre de ces véhicules ont été en service dans le centre-ville d'Oxford. Ces derniers étaient rechargés en bout de ligne à deux abribus aménagés en conséquence. La charge était de type conductive par câble, que le chauffeur devait brancher et débrancher manuellement. Leur opération a cessé dû à l'arrêt des subventions d'opérations. Ils ont été par la suite utilisés sur les îles de Bailiwick et Islay. Peu d'informations subsistent sur ce programme. Par contre la société

Optare a tout de même poursuivi ses efforts de bus électrique avec le Solo EV lancé en 2009. Il n'a toutefois pas été mis en service à l'heure

actuelle. De plus, ses batteries Lithium-Ion de grande capacité permettent d'envisager une utilisation sans biberonnage, avec recharge complète nocturne.

2.3 POWER ELECTRONIC RESEARCH GROUP DE LA NOUVELLE-ZÉLANDE

Les professeurs John Boys et Grant Covic de l'Université de Auckland ont développé un système de biberonnage par induction au cours des années 80 et 90. Leurs travaux sont la suite de ceux du professeur Don Otto qui était parvenu à mouvoir un petit trolley seulement par induction en 1971. Ils ont mis en place un système composé de 5 bus à recharge inductive et un poste de recharge de 20kW. Les bus, équipés de 30 batteries 12V, se rechargent en moins de 20 minutes. Un autre de leur système a été mis en service dans la ville thermale de Whakarewarewa. Les travaux de Boys sont aussi à la source du projet de bus par induction dans le vieux port de Gênes, en Italie.

La technologie développée par Boys est disponible via l'office de commercialisation des brevets de l'Université d'Auckland, Uniservices. Deux entreprises utilisent actuellement cette technologie sous licence.



Figure 17, véhicule à recharge par induction de 20kW à Whakarewarewa

2.4 BUS À SUPER-CONDENSATEURS EN RUSSIE

Peu avant l'an 2000 un bus de 50 passagers mu par super condensateur à été développé et mis en service dans un des grands parcs de Moscou. Ce dernier effectue un trajet de 6.5km et se recharge pendant quelques minutes. Le fabricant des modules de super-condensateurs est toujours en affaires, sous le nom de ESMA⁵. La banque de 300 super-condensateurs pèse tout près de 950 kg et a une capacité de 8.6kWh. Ceci procure au bus de 9500kg une autonomie de 9.5km, avec une vitesse maximale de 20km/h. Le choix de condensateurs a été fait à cause de leur insensibilité au froid. En effet, une batterie perd de la capacité en opération froide, ce qui était encore plus vrai à cette époque et les températures peu clémentes de Moscou étaient incompatibles avec l'offre commerciale à l'époque. Les condensateurs choisis ont une plage d'opération de -50°C à + 50°C.

La puissance crête du moteur DC est de 40kW, avec une cote de 20kW continue à 2700 tours/minute. La recharge s'effectue à 220V avec un courant de 360A. Elle prend environ 12 minutes.

⁵ <http://www.esma-cap.com>



Figure 18, bus à super-condensateurs de Moscou

2.5 MINIBUS PAR INDUCTION EN ITALIE

Un projet d'utilisation de minibus avec recharge par induction a eu lieu en Italie au début des années 2000. En effet entre 28 et 30 de ces véhicules ont circulé dans plusieurs grandes villes du pays, dont 22 unités à Turin en 2002. Les bus doivent s'immobiliser un certain temps par-dessus une plaque d'induction dans la chaussée. L'alignement avec les plaques d'induction est critique. Le chauffeur doit immobiliser précisément le bus pour un couplage magnétique efficace. Peu d'information est disponible sur ces essais. Les résultats de ces essais ont donné naissance au bus Elfo du fabricant italien EPT.

Le système mis en place dans la ville de Gênes comporte une plaque d'induction de 60kW. Les bus doivent s'arrêter au dessus de la plaque pour 10 minutes à chaque heure d'opération. Dans un article intitulé « Fast inductive recharge for public transport on medium dimension electric buses : the first experience in Genoa » les auteurs du Centre interuniversitaire en transport de Gênes expliquent leur démarche et les résultats de la mise en place initiale d'un trajet de bus à recharge par induction. La société de transport de Gênes a acquis 8 bus Cacciamali – EPT Elfo (42 passagers, 7.5m) pour améliorer la qualité de l'air dans une zone très congestionnée et touristique de la ville. Le bus comprend 11 sièges, un poids maximal de 11 000kg, une vitesse de pointe de 70km/h et est capable de gravir des pentes de 22% à 18km/h. Les essais préliminaires ont suggéré qu'une recharge par induction par trajet serait suffisante pour maintenir le niveau de charge de la batterie tout au long de la journée. Par contre, il était très difficile pour les chauffeurs de positionner précisément le bus pour maximiser le couplage magnétique du système inductif. Des caméras accessibles du poste de pilotage ont par la suite été ajoutées.

En février 2003 la ville met en service 4 bus, en remplacement de modèles diesels sur le court trajet 518 de 2.4km. Les bus parcourent 25 fois le trajet par jour, qui comprend 14 arrêts distancés en moyenne de 170m, avec une pente maximale de 15%. Les mesures préliminaires d'émission électromagnétique prises aux abords du système d'induction de 20kHz sont acceptables selon l'Université de Gênes. La boucle inductive secondaire sous le bus doit être abaissée par un levier dans le poste de pilotage pour réduire l'entrefer du transformateur ainsi créé. Plus les deux enroulements sont près l'un de l'autre, plus le couplage magnétique est bon, permettant le transfert d'une plus grande puissance.



Figure 19, bobine mobile secondaire sous le bus, Gênes

Une étude approfondie d'opération en conditions réelles de cette première ligne a permis de créer une matrice multicritères pour évaluer la faisabilité d'implanter un tel système sur un trajet donné. Cette évaluation a été conduite pour 18 trajets de bus de Gênes afin de déterminer lesquels seraient exploitables. Les critères qui déterminent la faisabilité de l'utilisation des Elfo sur un trajet sont :

- Compatibilité du véhicule avec la topographie du trajet
- Distance acceptable avec le dépôt de bus le plus près
- Arrêts significatifs (hôpitaux, station de train, etc...)
- Attrait touristique, patrimoniaux, ou zone à forte pollution atmosphérique
- Demande assez élevée pour justifier un tel investissement
- Autonomie demandée et vitesse de pointe compatible avec le véhicule
- Densité du trafic automobile

De plus, l'utilisation des véhicules en condition réelle a permis la création d'un outil de simulation. La municipalité peut désormais entrer les différents paramètres d'un trajet dans le logiciel de simulation et valider la faisabilité de l'implantation. Les résultats de simulation concordent avec la réalité. Ainsi le niveau de charge restant et le temps de recharge optimal requis par trajet peut être déterminé avant même le premier jour de service. Le premier trajet mis en fonction requiert un arrêt de recharge de 10 minutes, par contre le simulateur a permis de déterminer quelles autres lignes seraient utilisables en allongeant le temps de recharge jusqu'à 20 minutes.



Figure 20, bus italien Elfo à recharge inductive

3 SITUATION ACTUELLE

3.1 EXPÉRIENCES EN COURS

3.1.1 MONTMARTROBUS

Le Montmartrobus est en fonction depuis le 27 juin 2001. Ce midibus par biberonnage sillonne les rues de la Butte entre Pigalle et Mairie du XVIII^e, à Paris. Les douze exemplaires sont opérés par le RATP⁶. Le matériel roulant est constitué d'Oréos 55 E, produit du groupe Gruau-Ponticelli (Gépébus)⁷. L'équipement de recharge rapide en bout de ligne est un poste de 720V à 160A (115kW). Le graphique de charge (Figure 24, capacité résiduelle au fil de la journée du Montmartrobus) dans les pages suivantes montre une recharge d'environ 10kWh à chaque trajet. On peut donc supposer un arrêt d'environ 6 minutes par recharge. Le véhicule a une vitesse de pointe de 45km/h, une capacité de 30 passagers et la capacité de gravir une pente de 19% malgré ses 8400kg. Il est intéressant de noter qu'une vieille technologie de batterie (Nickel-Cadmium) est utilisée. Ce type de batterie semble particulièrement mal adapté à la recharge par biberonnage dû à son inhérente tendance à « l'effet mémoire » si elle n'est pas déchargée à fond.

Les premiers tests du Montmartrobus, faits en 1996, montrent une consommation énergétique moyenne de 1.48kWh/km. Une recharge lente et complète était aussi faite la nuit au dépôt d'autobus, car la charge de biberonnage à chaque bout de la ligne n'était pas suffisante pour recharger complètement les batteries. Il en résulte donc une succession de charge/décharge négative au fil de la journée.

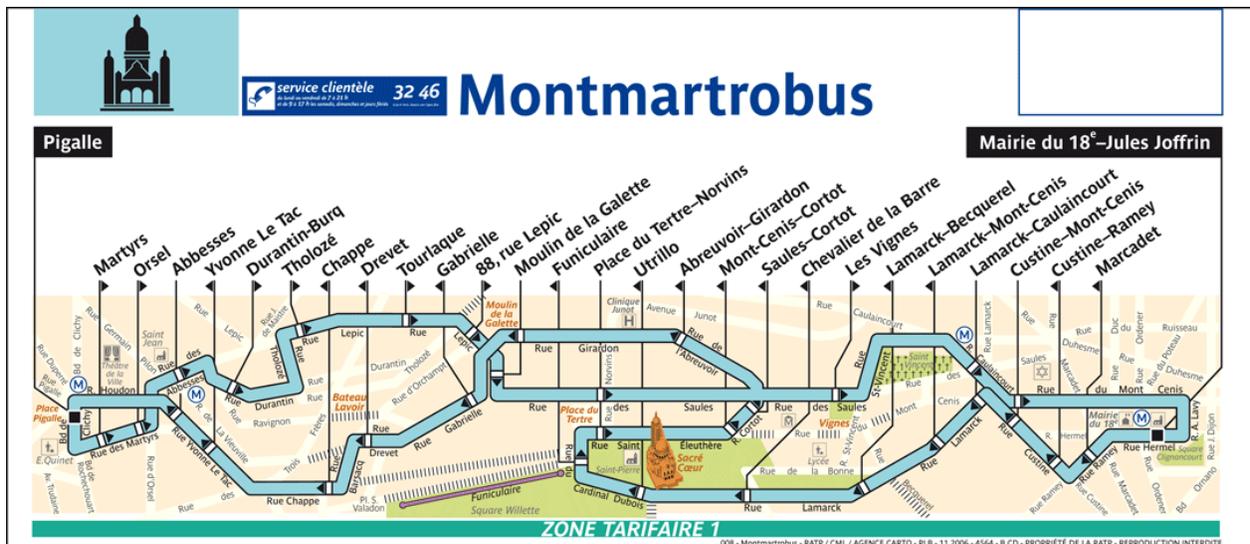


Figure 21, plan du Montmartrobus

⁶ Régie autonome des transports parisiens, <http://www.ratp.fr>

⁷ Gepebus, Zone Industrielle, 77220 Gretz Armainvilliers



Figure 22, Oréans 55E rue de l'Abreuvoir



Figure 23, Montmartrobus sous charge

Ah/ kWh restant dans les batteries

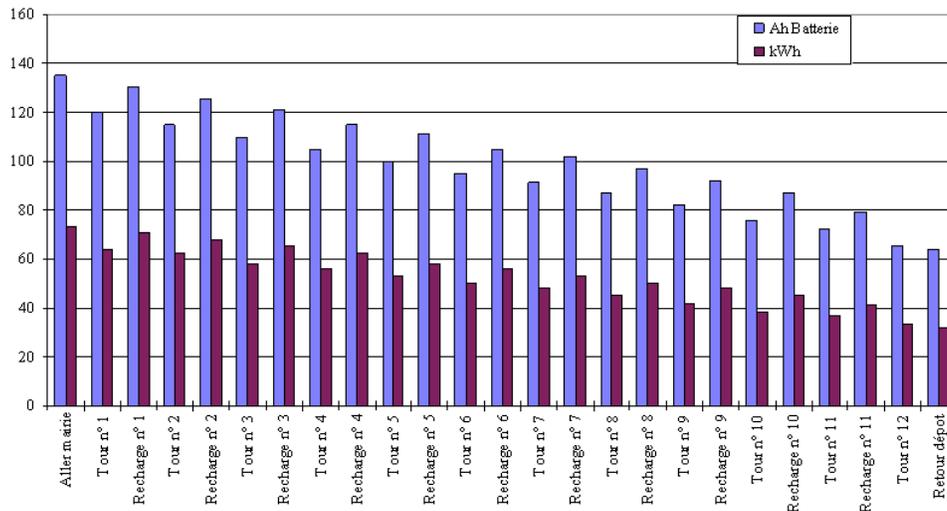


Figure 24, capacité résiduelle au fil de la journée du Montmartrobus

3.1.2 TROLLEY BUS #90 EXPRESS DE ROME

La compagnie ATAC de Rome opère depuis peu un Solaris Trollino sur un parcours qui n'est pas 100% équipé de fils aériens. Le trajet 90 express comporte une portion de 3.6km, dans le cœur historique de la ville, qui est parcouru à l'aide d'une grosse banque de batteries de type NiMH entre la Stazione Termini et Via Nomentana. Il n'est pas clair si cette portion de 3.6km est continue ou consiste en la distance totale du parcours qui n'est pas électrifié. Le bus se recharge sur les 20km restants du parcours qui sont équipés de bifilaire aérien conventionnel.



Figure 25, trolleybus #90 express de Rome

3.1.3 VILLE DE TURIN

La technologie de recharge par induction a déjà été décrite dans la section « Minibus par induction en Italie » et « Elfo de EPT » du présent document. Voici les informations obtenues de la société de transport de la ville de Turin (Gruppo Torinese Trasporti). 23 autobus Elfo sont en service depuis juin 2003. Les bus parcourent en moyenne 120 km par jour. La recharge se fait par induction dans certains terminus par un système à courant alternatif de 20kHz. Le positionnement du bus par rapport à la plaque d'induction est mesuré automatiquement et la recharge est déclenchée de façon autonome lors d'un bon alignement. Une communication radio à courte portée est utilisée entre le module de gestion des batteries du bus et la station de recharge. Le système embarqué rectifie cette tension et peut fournir jusqu'à 120A DC à la banque de batteries. Les stations de recharges sont reliées au réseau électrique par une connexion de 80kW sur une ligne de 380V AC triphasée. Les batteries acide-plomb au gel de 6V ont une capacité de 180Ah. Une banque de 56 de ces batteries est installée à bord de chaque bus. Cette banque de 336V a une capacité d'environ 60kWh. Selon l'opérateur, le système s'est avéré très fiable jusqu'ici.

Le diagramme suivant présente le principe de fonctionnement (la version originale est disponible sur demande). Le suivant a été fourni en anglais, il n'a donc pas été traduit.

Recharge Inductive

Schéma du système

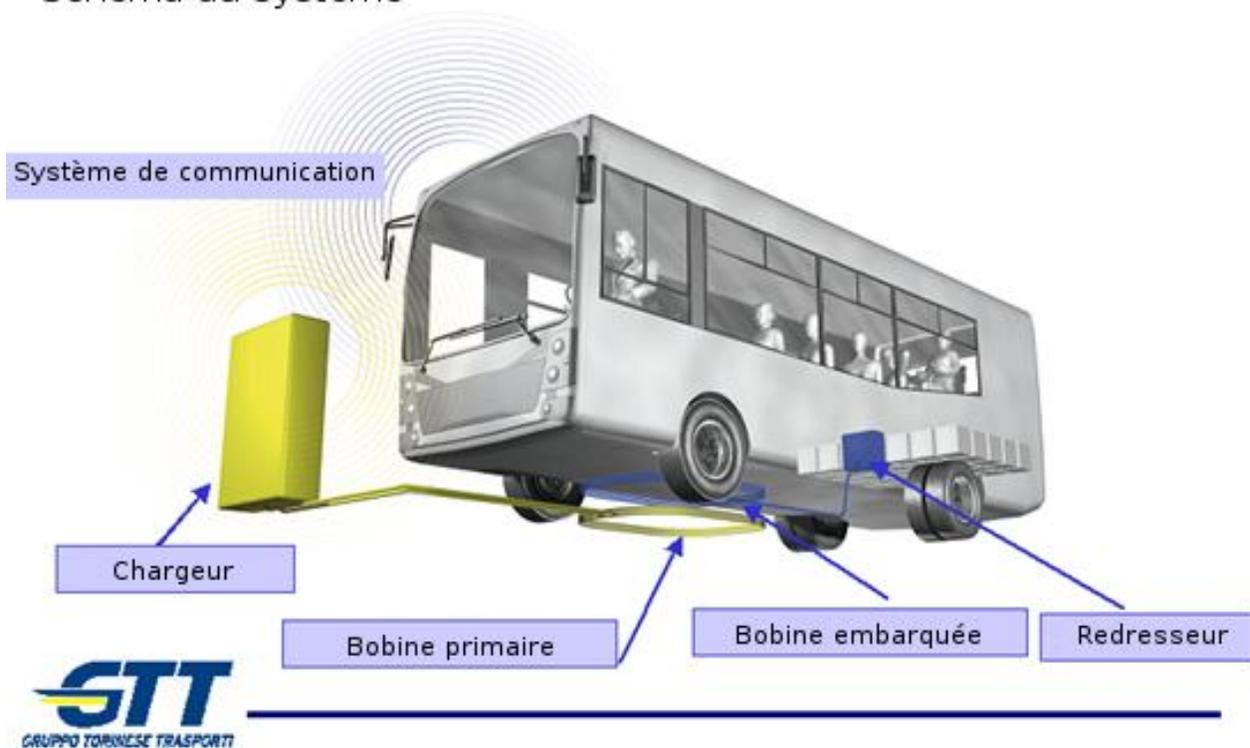


Figure 26, système de recharge par induction de la ville de Turin

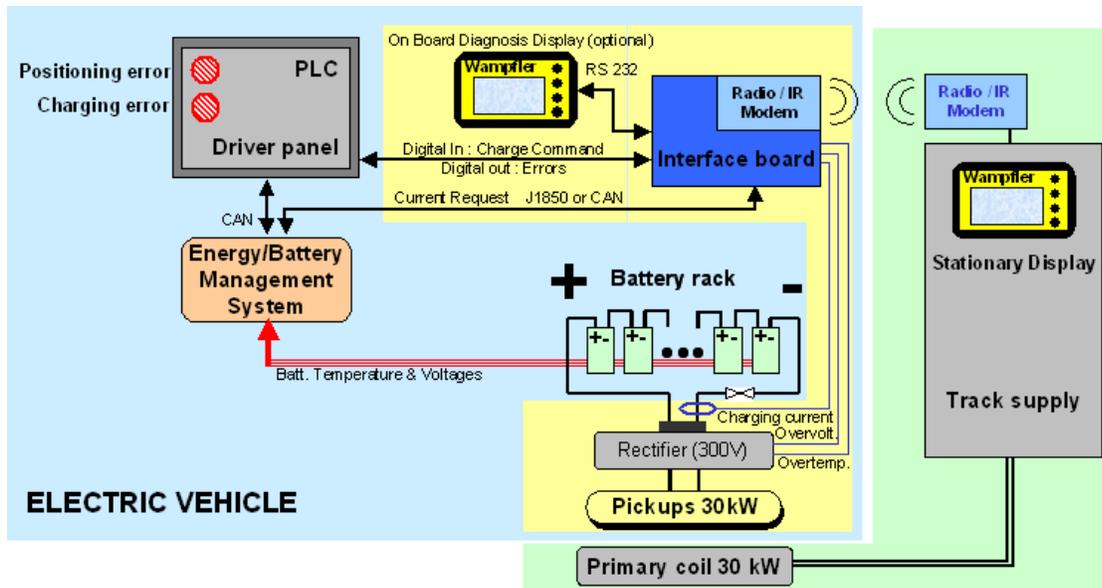


Figure 27, diagramme du système de la ville de Turin

3.1.4 ÉVOLUTION DU BIBERONNAGE

Le diagramme ci-dessous résume l'évolution temporelle du biberonnage

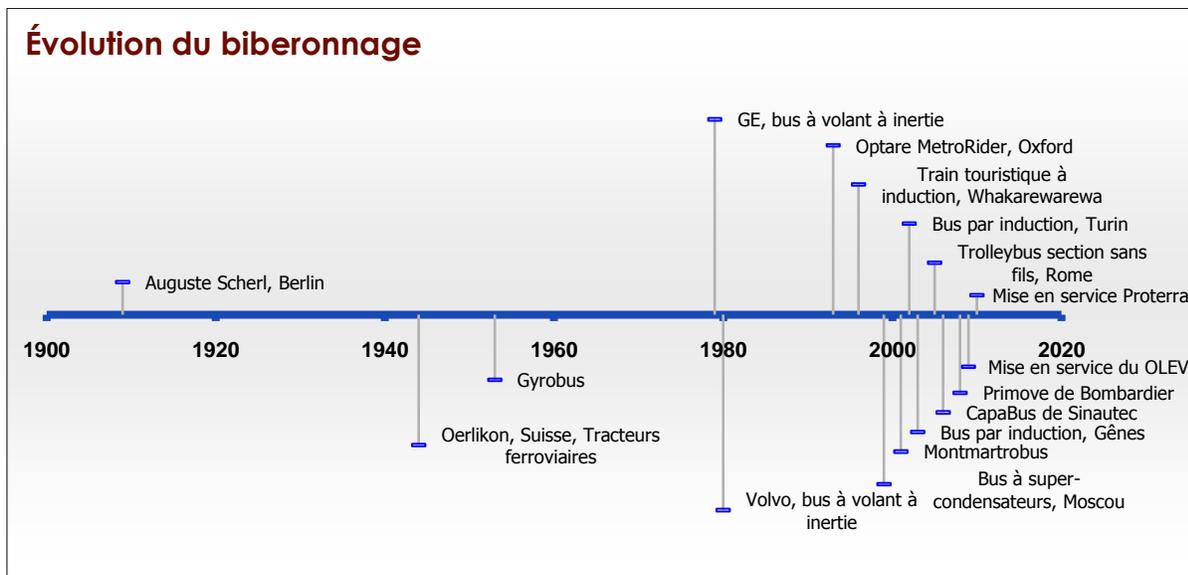


Figure 28, évolution temporelle du biberonnage

3.2 COMPARAISON DES APPROCHES

Toutes les technologies de biberonnages sont potentiellement viables. Aucune n'est une réponse universelle aux contraintes de transport en milieu urbain, mais elles ont toutes leur place. La topographie et la vitesse de parcours, ainsi que l'équipement existant peut guider une société de transport vers l'une ou l'autre des approches.

Si une ville est déjà équipée de bifilaires aériens, un véhicule à biberonnage qui peut s'y raccorder est un choix judicieux. Les villes de Shanghai, avec le CapaBus de Sinautec, ou Rome avec son trolley à batteries en sont de bons exemples.

Par contre, la faible vitesse et distance à parcourir du Montmartrobus font que le modèle de recharge en bout de ligne est approprié et efficace.

La sensibilité à la modification du paysage urbain est aussi une contrainte qu'il faut prendre en compte. Les systèmes inductifs sont à peu près invisibles, une station en bout de ligne ou même à recharge ultra-rapide par le toit change passablement le paysage visuel. Par contre, la capacité à opérer dans nos conditions climatiques hivernales n'a pas encore été démontrée pour les systèmes inductifs.

La comparaison des approches s'en trouve difficile. Chaque approche doit être étudiée en fonction de l'application précise.

3.3 DISPONIBILITÉ COMMERCIALE

À ce jour, l'offre commerciale se résume à quelques modèles. Le midibus Elfo de EPT est le seul modèle sur le marché avec un historique appréciable. Nous n'incluons pas le trolleybus équipé de batteries tel qu'utilisé à Rome dans l'offre commerciale car ce type de véhicule à biberonnage exige l'utilisation de caténaires d'un réseau existant. Cette situation n'étant pas le cas présent sur le territoire de Laval. Les nouveaux modèles de bus à recharge ultra-rapide, tel les produits de Proterra et Sinautec ne sont pas inclus dans cette section car ils sont encore à l'étape de projet de démonstration.

Il est important de noter qu'il n'existe pas, à l'heure actuelle, d'offre commerciale pour des bus par biberonnage de 18 mètres (60 pieds).

3.3.1 ELFO DE EPT

Le ELFO est un des rares bus en production qui offre la possibilité de biberonnage. Dans ce cas-ci, il est optionnellement équipé du système de recharge par induction Conductix de Wampfler.

3.3.1.1 CARACTÉRISTIQUES DU BUS ELFO

Le modèle est un bus à plancher super bas de 7,5 m de long, 11 sièges et 30 places debout, capacité idéale pour la navette urbaine. Le moteur asynchrone triphasé (max. 120 kW à 1800 t/m) est alimenté par 56 batteries au plomb de 6v montées en série fournissant une tension nominale totale de 336 volts.

3.3.1.2 PERFORMANCES :

Accélérations : 0-30 km/h en 7 secondes, 0-50 km/h en 18 secondes. Par la puissance de sa chaîne de traction (65 – 120 kW), il peut atteindre 95 km/h mais l'électronique de bord le bride à 70 km/h puisque sa finalité est avant tout urbaine. Il peut gravir une pente de 22% à 18 km/h à pleine charge. Autonomie: jusqu'à 120 kilomètres (60 kilomètres en cycle urbain). La consommation à vitesse constante en palier en site urbain (sans arrêt et démarrage) est de 0,6 kWh/km. Suivant les normes ECE84 (Euro normes pour bus diesel) il consomme 0,9 kWh/km, mesures réalisées avec les 2/3 de la capacité de charge de voyageurs.



Figure 29, EPT Elfo

3.3.2 TECHNOBUS

Le Tecnobus Gulliver, tel qu'opéré au Québec par le RTC permet une recharge par permutation des batteries, c'est-à-dire, par le remplacement physique des batteries situées à l'arrière des bus. Cette technologie a été développée il y a environ 15 ans avec un véhicule conçu spécifiquement à cette fin. Bien que cette approche ne constitue pas du biberonnage à proprement dit, elle rencontre certains de ses objectifs, soit une autonomie infinie et une taille de batterie réduite.



Figure 30, Écolobus

4 DÉVELOPPEMENT PRÉVISIBLE

4.1 ACCUMULATEURS

Les deux types d'accumulateurs propices au biberonnage qui font le plus l'objet de recherches en ce moment sont les batteries lithium-ion basées sur le nano-titanate ainsi que les super-condensateurs.

4.1.1 BATTERIES

La recherche pour des batteries supportant des recharges ultra-rapides est activement poursuivie par plusieurs organismes et compagnies. Cette demande est principalement due à l'essor de la voiture personnelle électrique. La recharge ultra-rapide est perçue comme un élément essentiel pour l'adoption par le grand public de tels véhicules. Elle vise une opération similaire au modèle actuel de remplissage de carburant dans des « stations de service ». Bien que les batteries en cours de développement ne soient pas conçues spécifiquement pour les véhicules plus lourds, la recherche porte principalement sur la technologie de ces dernières. En ce sens, elles devraient être autant applicables aux véhicules lourds qu'aux automobiles.

Cette quête pour des batteries à recharge rapide passe entre autres par la filière des nanomatériaux. Les nanotubes de silicium sont déjà utilisés dans les électrodes de certaines batteries en développement. L'Université Stanford et l'Université Hanyang à Ansan, en Corée du Sud en collaboration avec LG Chem ont réussi à faire fonctionner une telle électrode. Bien que la capacité accrue soit l'élément majeur qui motive ces recherches, ce type d'électrode permet d'entrevoir une recharge plus rapide.

Au Québec, les travaux du chercheur Karim Zaghbi de l'IREQ portent sur le nano-titanate. Les batteries fabriquées en laboratoire par le Dr Zaghbi ont permis des milliers de cycles de charge/décharge en quelques minutes sans perte de performance. Ce type de matériaux est dans la même famille que celui utilisé par le fabricant AltairNano⁸ qui propose des batteries qui se rechargent à des taux de 8 à 20 fois plus rapide que les meilleures batteries « conventionnelles » lithium-ion sur le marché. C'est d'ailleurs ce fabricant qui a été choisi par Proterra pour équiper leur bus à biberonnage (voir section « Proterra » du présent document).

4.1.2 SUPER-CONDENSATEURS

Les super-condensateurs de prochaine génération vont aussi faire appel aux nanostructures. En effet les nanotubes de carbone semblent être l'avenue de recherche la plus intéressante pour le moment. Ce type de structure permet principalement d'augmenter la capacité des super-condensateurs. La puissance de ces derniers étant déjà très élevé, il est naturel que les recherches visent à augmenter leur capacité.

Certaines des universités les plus prestigieuses travaillent sur les super-condensateurs. Comme ces derniers sont tout indiqués pour la recharge ultra-rapide, il ne serait pas surprenant que le déploiement massif de véhicule à biberonnage repose sur le développement de super-condensateurs à bas coût et à volume réduit.

Le groupe d'analyse de marché « Innovative Research and Products (iRAP) » prévoit une croissance annuelle de 21.4% du marché des super-condensateurs d'ici 2014. En 2009, ce marché était de 275 millions de dollars US.

⁸ <http://www.altairnano.com>

4.2 POSTES DE BIBERONNAGE ET SYSTÈMES ENTIERS

Les postes de biberonnage des deux types, soit conductif et inductif, vont continuer à se développer au fil des prochaines années. Par contre, aucune avancée majeure n'est prévue, car la technologie actuelle est déjà au point. Les domaines de recherche portent principalement sur l'augmentation de la puissance transférable par induction et la diminution des coûts. Voici les principaux développeurs.

4.2.1 SYSTÈME WATT DE PVI

L'entreprise française PVI a mis au point un système nommé WATT (Wireless Alternative Trolley Technology) suite aux expériences du Montmartrobus. L'abribus est équipé de super-condensateurs, qui se rechargent par un circuit domestique de faible puissance entre le passage de deux bus. Ces derniers se connectent automatiquement par un bras télescopique vers un totem sur le dessus de l'abribus. La compagnie affirme que seulement 10 secondes suffisent pour transférer assez d'énergie aux batteries internes du bus pour lui permettre de se rendre au prochain arrêt. D'ailleurs, ces batteries sont surdimensionnées pour permettre au véhicule de franchir la distance de deux abribus pour pallier à d'éventuels problèmes d'accessibilité pour cause de travaux routiers ou de bris d'équipement de recharge. Le système est encore au stade embryonnaire, la première expérimentation en condition réelle devrait avoir lieu en 2011 dans une grande ville française. Les trois aspects qui doivent impérativement être validés par ces expérimentations sont la sécurité du système en cas de vandalisme, celle des piétons en cas d'accident et l'absence d'émission d'ondes électromagnétiques lors du transfert d'énergie. L'ADEME⁹ subventionne le développement de ce produit ainsi que les partenaires de PVI, soit RobotSoft, Véolia Environnement et groupe MDO Mobilier Urbain.

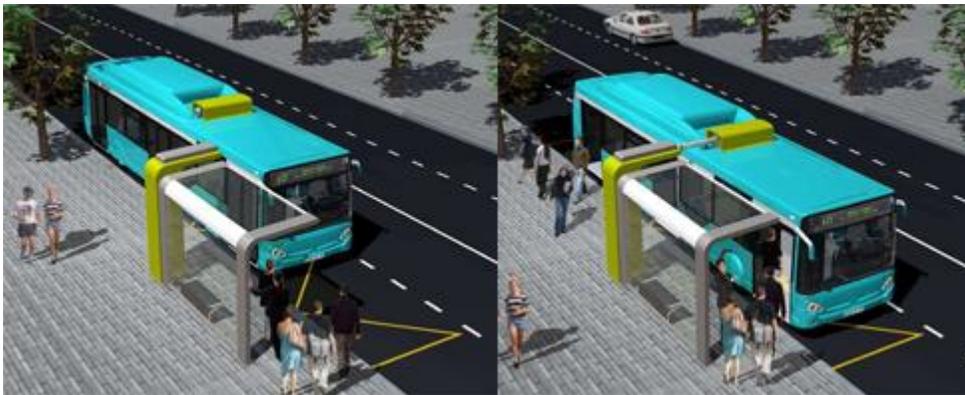


Figure 31, système WATT de recharge de biberonnage

⁹ L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie

4.2.2 PROTERRA

La firme Proterra, du Colorado, a fabriqué un prototype de bus électrique pleine grandeur. Ce bus fait de matériaux composites est innovateur à plusieurs points de vue. En voici quelques images :



Figure 32, photos du bus de Proterra

Les informations techniques obtenues du manufacturier sont très impressionnantes mais doivent être considérées avec prudence. Aucun essai indépendant n'a été fait et le produit est encore à quelques années de la commercialisation. Notons qu'il n'y a pas, à l'heure actuelle de véhicule de 60 pieds. Voici les prix obtenus, tous en dollars US; un véhicule tout composite de 30 pieds coûte 1.2M\$, un chargeur 5h coûte 3500\$, un chargeur 2h coûte 35000\$ et chaque abribus avec station de recharge ultra-rapide coûte 1M\$. Le fabricant avance une autonomie de 50 kilomètres en milieu urbain. Cette autonomie permet de croire qu'une seule station de recharge ultra-rapide par circuit serait nécessaire. Une recharge conventionnelle, la nuit, est possiblement requise pour allonger la durée de vie des batteries.

La société de transport publique Link Transit de l'état de Washington a reçu une aide financière de 2.9M\$ du gouvernement Obama dans le cadre du « Federal Transit Funds » du « Recovery Act » pour mettre à l'essai cette technologie. Le projet, qui doit être mis en place au cours de l'année 2010, prévoit le remplacement de 5 bus diesel sur un trajet circulaire très fréquenté de Wenatchee. La route choisie est la route #19, East Wenatchee. Le trajet comportera deux stations automatisées de biberonnage au centre intermodal de Link Transit ainsi qu'un poste de recharge manuelle au centre opérationnel de la société.

La société de transport Foothill Transit (Véolia Transport) dans le sud de la Californie a aussi passé une commande de 3 bus ainsi que des équipements de recharge ultra-rapide à Proterra. Le contrat de 5.8M\$ US est aussi une manifestation du « Federal Transit Fund ». Les trois appareils devaient être mis en service au début de 2010 sur la ligne 291 entre La Verne et Pomona avec une station de recharge à chaque bout du trajet, mais une seule sera finalement implantée au centre du parcours, au Pomona TransCenter. Ce site a été choisi car il est le point de connexion pour le train ainsi que les autres lignes de bus de la région. La portion nord du trajet est de 13.5km et la

portion sud est de 14km. Un seul poste de charge sera bâti mais avec deux connexions possibles, une de chaque côté. D’ailleurs, l’infrastructure de recharge est dessinée par la firme connue AeroVironment. L’expérimentation devrait durer 2 ans. Les derniers rapports de construction du système permettent d’envisager une entrée en service en juillet 2010.

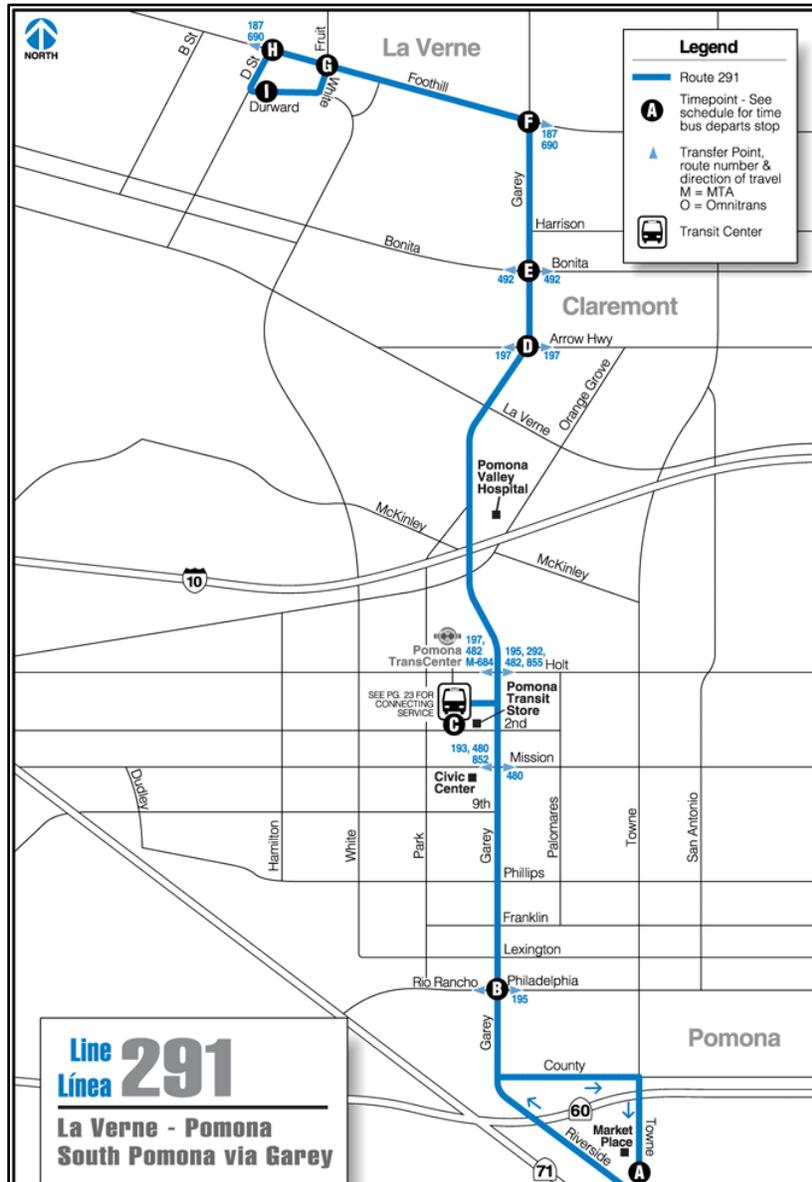


Figure 33, trajet 291 de la Foothill Transit Authority

Le fabricant affirme être ouvert à adapter son système de traction, de recharge et d’accumulateur sur les plateformes d’autres fabricants de bus. Il est à noter que le coût actuel de remplacement de la batterie de 72kWh est de 150 000\$. Selon un cycle de 15 charge/décharge totale par jour, 365 jours par an, ces batteries devront être remplacées en moins de trois ans. Par contre, le fabricant vise un prix de remplacement de 75 000\$ d’ici 2013.

4.2.3 SINAUTEC

Le consortium Sinautec Automobile Technologies, d'Arlington en Virginie et son partenaire chinois, Shanghai Aowei Technology Development Company ont développé un bus par biberonnage alimenté par super condensateur. Leur technologie repose sur la capacité de se recharger rapidement aux arrêts de bus via deux perches sur le toit. En utilisant un espacement de ligne standard, ils peuvent se recharger sur des sections d'alimentation de trolleybus conventionnels. Depuis 2006 la compagnie a mis 17 de ces autobus en service à Shanghai. Les trajets choisis doivent comporter un arrêt « électrifié » à tous les 4.7km pour permettre la recharge. L'autonomie est de 5.9km en utilisant l'air climatisé. À Shanghai les chauffeurs rechargent le véhicule à tous les 5 arrêts l'hiver et à tous les 3 arrêts l'été. Il est à noter qu'avant de débiter le service le matin, les bus doivent être mis sous charge pendant environ 10 minutes. Le problème le plus fréquent rencontré a été l'impossibilité de se rendre sous l'arrêt, principalement causé par des véhicules en infraction de stationnement ou par des travaux de voirie. À Shanghai les chauffeurs doivent emprunter un long détour pour se rendre de la route de service au dépôt central de bus. Ce détour est nécessaire pour rester sous l'infrastructure de trolleybus déjà en place, pour permettre de couvrir la distance sans manquer d'énergie. Selon le fabricant, une nouvelle génération est en cours de développement. Elle permettra de franchir 32km entre les recharges.

Les véhicules actuels de la compagnie sont offerts en version 41 sièges ou en midibus de 11 sièges. Le bus de 41 sièges peut opérer jusqu'à 50km/h et requiert un arrêt d'au moins 30 secondes sous l'équipement de recharge. Il mesure 12 mètres, soit 40 pieds et pèse 12.5 tonnes. Le courant de recharge est de 200A à 600V, par contre des installations existantes sont aussi en fonction à 680V 200A et 720V 200A. Ils sont branchés au réseau de 10kV et de 380kV via un transformateur triphasé, avec en sortie six phases. Douze redresseurs permettent d'obtenir du courant continu entre 650V et 720V. Le courant maximal fourni est de 250A. La banque actuelle de super-condensateurs est de 5.9kWh et la consommation d'énergie se situe à environ 1kWh par kilomètre parcouru. Une version nord-américaine sera lancée vers la fin de 2010. Selon les informations reçues du fabricant, 100 bus additionnels seront mis en service à Shanghai à la fin du moins d'avril 2010 et serviront au navettage lors de l'exposition universelle du 1^{er} mai au 31 octobre 2010. Les véhicules resteront en service par la suite. Plus d'un million de kilomètres auraient été parcourus depuis le début de l'expérimentation. Les prix en dollars US obtenus sont de l'ordre de 100 000\$ pour les super-condensateurs et l'électronique associée, 20 000\$ pour la motorisation électrique et de 10 000\$ à 100 000\$ pour les bornes de recharges, selon le design (excluant les prix de main-d'œuvre). Selon les dires du fabricant, les coûts d'opération à ce jour dans le projet de Shanghai sont les mêmes que pour un véhicule conventionnel au diesel.

Un bus de Shanghai sera en démonstration à l'exposition BusCon de Chicago en septembre 2010. Le fabricant prévoit une tournée nord-américaine en vue de l'introduction commerciale vers la fin de 2010. La stratégie pour l'Amérique du Nord sera d'offrir seulement la motorisation, les accumulateurs et les autres éléments électriques. Le tout sera monté sur le châssis du choix du client. Cette façon de procéder sera mise en place pour éviter le fastidieux processus de certification du véhicule. Ainsi les sociétés de transport pourront continuer à travailler avec des fournisseurs locaux avec qui ils ont une relation établie. Certains fabricants ont même déjà démontré de l'intérêt pour une version 60 pieds et même 80 pieds. Notons que la firme Phileas¹⁰ a déjà abordé Sinautec pour un potentiel projet de bus articulé destiné au Canada. Par contre, à ce point-ci il ne s'agit que de discussions informelles.

¹⁰ <http://www.pts-phileas.com>



Figure 34, Capabus de Sinautec

4.2.4 SYSTÈME OLEV, DU KOREA ADVANCED INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

Le KAIST (Korea Advanced Institute of Science and Technology) a développé et déployé une première installation de son système de transfert de puissance inductif. Le système baptisé OLEV (online electric vehicle) alimente un petit train sur roues dans le Seoul Grand Park de Gwacheon. Le système a été testé afin de vérifier s'il rencontre les normes de 1998 de la « International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) guideline », qui sont 62.5mG à 20kHz. Les résultats de l'OLEV sont de 10mG dans le train en marche et 50mG autour du train à l'arrêt. La législation coréenne spécifie une distance minimale de 12cm entre le dessous du véhicule et la chaussée. L'objectif du KAIST était d'obtenir au moins 60% de transfert à cette distance. Les travaux de l'Université de Berkley, en Californie, n'ont pas permis de dépasser les 7 cm à une efficacité de 60%. Par contre les premiers essais du KAIST ont montré un transfert de 70% à 12 cm ainsi qu'une efficacité acceptable jusqu'à 17cm. Le système mis en route dans le parc de Gwacheon affiche un transfert de 74% à 13cm de jeu entre le véhicule et la route. Le trajet de 2.2km comporte 4 sections avec éléments enfouis, soit 3 de 122m et une de 5m, couvrant 16% du trajet total. Voici le calendrier de développement / déploiement de la technologie :

- 2009 : Développement du cœur de la technologie de convertisseur de puissance du système de couplage magnétique
- 2010: Déploiement du prototype et test de la technologie sur des bus
- 2011: Développement de prototype pour bus
- 2012: Déploiement de prototype standardisé pour bus
- 2013: introduction dans des produits commerciaux



Figure 35, système OLEV de KAIST

4.2.5 NUMEXIA

La société suisse Numexia travaille sur une « chaîne d'énergie » basée sur un transfert sans contact. Cette transmission d'énergie par induction n'est que la première étape dans une suite de modules développés par la firme. Elle propose ainsi une solution pour le transfert, le stockage et la motorisation des véhicules. Tous ces éléments vont être mis en œuvre sur la plateforme « APM » (Automated People Mover).



Figure 36, Automated People Mover de Numexia

L'École polytechnique fédérale de Lausanne devait recevoir 30 de ces véhicules en 2010. Ils allaient être utilisés sur un parcours de 4.6km, comprenant 15 stations de recharge, enfouis sous terre. L'École a toutefois démenti cette information et affirme ne plus entretenir de liens avec Numexia depuis l'été 2009.

4.2.6 IPT CHARGE DE CONDUCTIX-WAMPFLER

La firme Wampler de Weil, en Allemagne, commercialise un système de transfert de puissance par induction. Il est déjà en production mais équipe un faible nombre de bus à l'heure actuelle. Les résultats semblent très probants à ce jour. Si les manufacturiers de véhicules adoptent cette technologie, elle pourrait être d'un grand intérêt car elle est très bien adaptée à la recharge par biberonnage. Le système devra par contre être expérimenté en conditions hivernales similaires aux nôtres avant d'envisager cette technologie. Le fabricant EPT de Nave en Italie utilise cette technologie depuis 2003 dans son modèle Elfo.

Le fabricant précise que pour opérer dans les limites du système l'alignement entre la plaque d'induction mobile sous le véhicule et celle dans la chaussée doit être de plus ou moins 5 cm latéralement et longitudinalement, alors que la distance verticale avec la chaussée doit être au plus de 4 cm (3 cm +/- 1 cm). Le fabricant recommande d'installer la borne de recharge dans un bâtiment adjacent à la route et d'intégrer les bobines directement dans des plaques de béton dans la chaussée. Le système est spécifié pour une opération entre -20°C et +50°C.

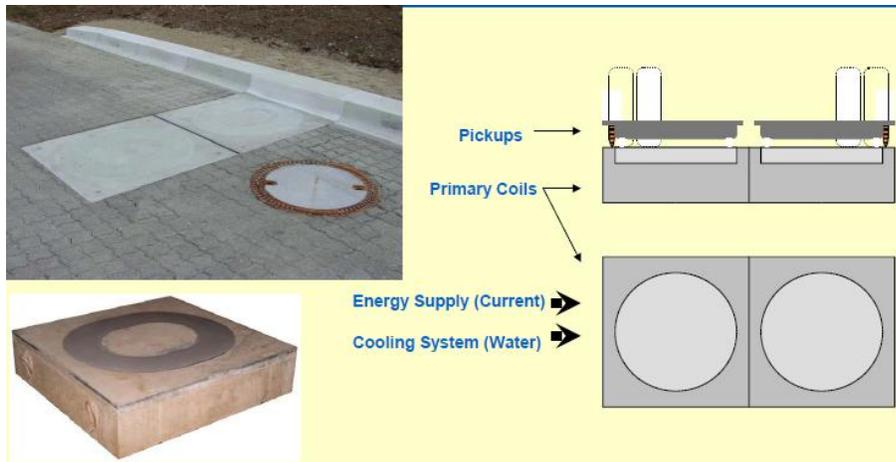


Figure 37, borne inductive de Conductix-Wampfler

5 ANALYSE

5.1 ANALYSE ÉNERGÉTIQUE

5.1.1 BESOINS ÉNERGÉTIQUES D'UN VÉHICULE DE 60 PIEDS

Les chiffres qui suivent sont basés sur des calculs théoriques ainsi que des données fournis par les fabricants de trolleybus lors de l' « Étude de faisabilité et d'impacts sur l'implantation d'un réseau de trolleybus à Laval » pour des véhicules de 60 pieds, avec une articulation et une charge de poids maximale. Bien qu'il n'y ait pas d'offre commerciale à ce jour pour ce type de véhicule, les données suivantes devraient être assez près de la réalité.

La puissance requise pour climatiser et chauffer un tel véhicule est de l'ordre de :

Puissance de chauffage	35 à 45kW (puissance crête)
Puissance de climatisation	24 à 32kW (puissance crête)

À cette énergie il faut additionner la puissance motrice et soustraire l'énergie qu'il est envisageable de récupérer au freinage.

5.1.1.1 CALCUL DE BESOIN ÉNERGÉTIQUE PAR KM PARCOURU

La description des hypothèses retenues pour le calcul de la puissance et de l'énergie pour un autobus 60 pieds alimentés par biberonnage est présentée ci-bas. Ces calculs sont pour un véhicule sur une pente nulle et une chaussée sèche.

VÉHICULE :

Masse totale (PNBV/GVWR) :	28 000 kg (incluant la charge utile);
Coefficient de trainée :	0,6 (réf. camion-remorque 53 pieds);
Surface frontale :	8,16 m ² (réf. Hess);
Rayon dynamique de roue :	39,4 cm (réf. 47% du rayon de roue sous chargement);
Coefficient de frottement :	0,01 (réf. Bosch Automotive Handbook);
Puissance moyenne auxiliaires :	15 kW (valeur moyenne estimée, 10 kW étant usuel pour un 40 pieds);

PROFIL DE VITESSE :

	Des Laurentides	De la Concorde
Distance totale simulée :	13,033 km (STL : 13,019 km);	8,281 km (STL : 8,392 km)
Temps total d'un aller :	2558 s 46 min (13 km)	2023 s 33,7 min (8,28 km)
Temps total des arrêts (49x) :	735 s 12,25 min (49 arrêts)	555 s 9,25 min (37 arrêts)
Vitesse moyenne simulée :	17 km/h	20,3 km/h

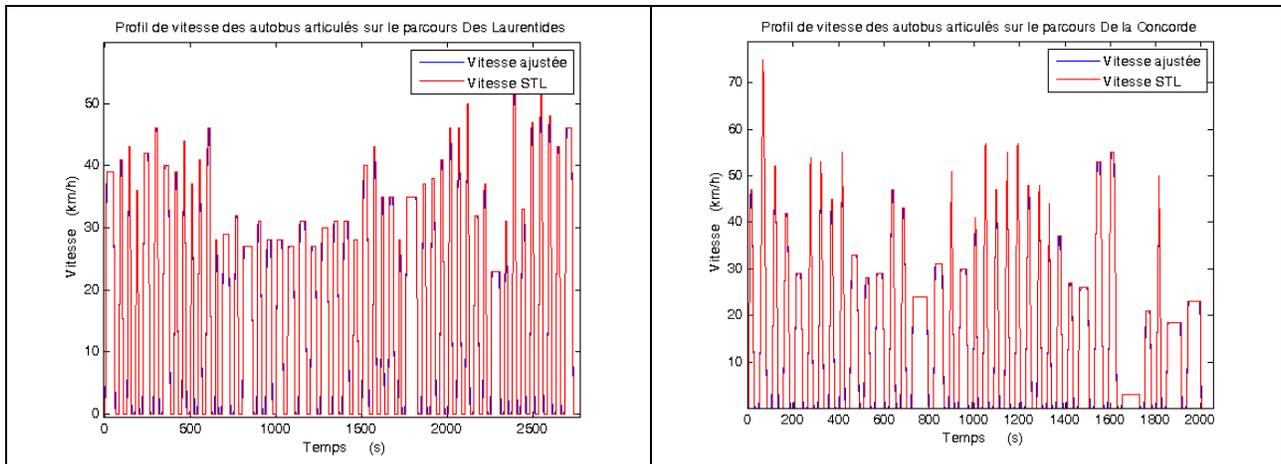


Figure 38, profils des vitesses Des Laurentides et De la Concorde

La Figure 38 présente respectivement les profils de vitesses des parcours Des Laurentides et De la Concorde. On peut y noter de nombreuses accélérations et peu de périodes de plateau à vitesse continue. Les courbes en bleu représentent des vitesses ajustées afin de réduire les changements brusques d'accélération et représenter davantage un comportement raisonnable. Il est à noter que chacun des profils de vitesses auraient pu être optimisés afin de rencontrer des vitesses moyennes plus élevées, mais l'auteur s'est limité à représenter un parcours qui respectait davantage les distances entre les arrêts et estime que l'impact d'une vitesse moyenne plus élevée aurait été négligeable sur l'énergie et la puissance totale des parcours. Le développement du profil de vitesse permet de calculer les forces, puissances et énergies correspondantes, si un véhicule tel que défini plus haut aurait emprunté ces parcours. Il est à noter que l'auteur s'est restreint à un profil topographique plat, c'est-à-dire que les pentes ont été négligées dans le développement des calculs.

PROFIL DES PUISSANCES :

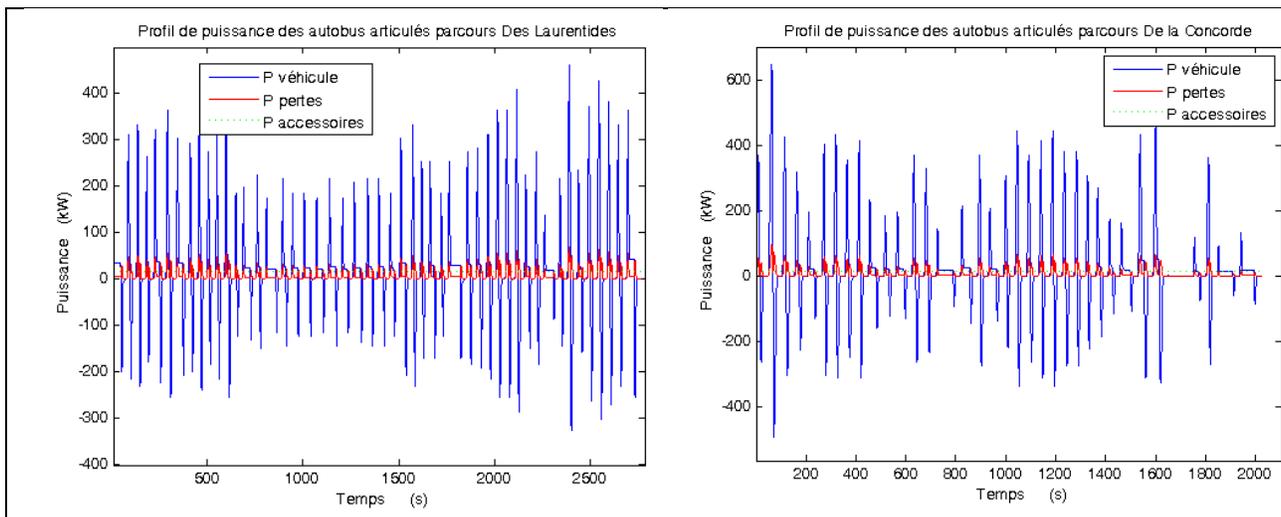


Figure 39, profils des puissances Des Laurentides et De la Concorde

La Figure 39 représente les profils des différentes puissances sur les deux parcours étudiés. On peut noter que le profil De la Concorde atteint une puissance supérieure à 600 kW en début de parcours. Cela est dû à la vitesse atteinte lors de ce déplacement qui dépasse la vitesse maximale de l'autobus (69 km/h). Cette forte puissance est aussi due au fait que l'accélération maximale ($1,4 \text{ m/s}^2$) était imposée indépendamment de la vitesse du véhicule,

ce qui ne représente pas non plus la réalité, mais constitue une approximation jugée raisonnable. Une fois le profil des puissances déterminé, il devient possible de calculer l'énergie consommée au cours du parcours.

PROFIL ÉNERGÉTIQUE :

	Des Laurentides	De la Concorde
Énergie motrice ¹¹ (accélérations et roulement) :	14,36 kWh	10,05 kWh
Pertes ¹² (estimé à 15% de l'énergie motrice) :	7,07 kWh	5,89 kWh
Énergie des accessoires (A/C, chauffage, etc.) :	11,50 kWh	8,43 kWh
Énergie totale :	32,93 kWh	24,36 kWh
Consommation moyenne incluant la récupération d'énergie au freinage :	2,53 kWh/km	2,94 kWh/km

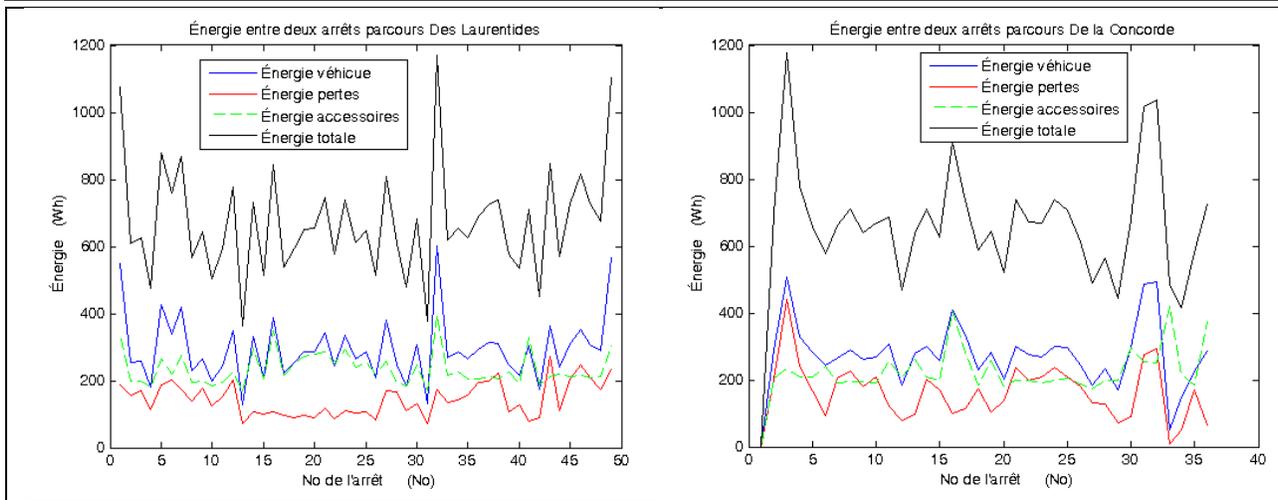


Figure 40, graphique de l'énergie consommée entre chaque arrêt

La Figure 40 représente la consommation énergétique entre chaque arrêt sur les parcours Des Laurentides et De la Concorde. On peut y apercevoir que la consommation ne dépasse jamais 1200 Wh entre deux arrêts et qu'en moyenne, elle est autour de 750 Wh par intervalle. On peut donc conclure que si le véhicule était alimenté uniquement par biberonnage et qu'il y en avait à tous les arrêts, un transfert de 1 kWh par arrêt serait suffisant.

¹¹ Énergie motrice nette, incluant le freinage régénératif.

¹² Pertes constantes, autant en accélération qu'en freinage régénératif.

5.2 SCÉNARIOS TECHNOLOGIQUES

Cette section est destinée à proposer deux scénarios technologiques qui rendraient viable l'utilisation d'autobus articulés électriques alimentés par biberonnage. Les deux scénarios proposés sont développés sur les modèles se rapprochant le plus de ce qui sera possiblement disponible commercialement sous peu dans des véhicules de 40 pieds. Nommément, un premier scénario de biberonnage en fin de ligne basé sur la technologie de batterie aux titanates du type AltairNano, tel que proposé par Proterra et un second scénario de biberonnage ultra-rapide, en cours de parcours, tel que proposé par Sinautec.

5.2.1 SCÉNARIO 1 : BIBERONNAGE EN FIN DE LIGNE

Un scénario en fin de ligne serait probablement l'option la plus avantageuse tant en terme d'infrastructure que de coût. Elle aurait le désavantage de nécessiter une batterie plutôt que des super-condensateurs, donc une forme de stockage moins durable et plus lourde, compte tenu de la grande quantité d'énergie transportée pour fournir la pleine autonomie. Ce scénario pourrait être présenté comme un seul scénario compatible avec les deux trajets donc dimensionné pour le pire des deux, du point de vue énergétique, soit l'aller-retour du parcours Des Laurentides. Ce parcours complet compte 26,5 km et 98 arrêts.

Du point de vue énergétique, l'ensemble de cette boucle représente environ 66 kWh. Comme il est prévu de laisser les autobus attendre 10 minutes en fin de parcours, il serait possible de profiter de ces périodes à chaque fin de boucle pour recharger la batterie à pleine capacité. En tenant compte des délais d'arrimage et de mise sous tension, il est raisonnable de penser que les véhicules pourraient être chargés au moins 9 minutes, requérant du coup, une puissance de charge de 440 kW (630 A @ 700VDC). Une telle infrastructure de recharge n'est pas extraordinaire et demeure, quoiqu'importante, réalisable compte tenu de la dimension et de la capacité de l'autobus en question.

La batterie, quant à elle, nécessiterait minimalement une capacité de 85 kWh (pour être rechargée aussi rapidement) et aurait une durée de vie estimée (15 cycles par jour, 365 jours par année) d'un peu plus de deux (2) ans. Cependant, peu d'information n'est actuellement disponible sur le vieillissement des batteries AltairNano, dont le manufacturier prétend fabriquer une batterie qui peut dépasser 10 000 cycles. Il serait aussi possible de sur dimensionner la batterie afin qu'elle ne complète pas un cycle de vie à chaque aller-retour du parcours. Ainsi, une batterie de 130 kWh durerait probablement près de 4 ans et permettrait de faire deux boucles, si le poste de recharge n'est pas disponible. À titre indicatif, le microbus électrique du RTC à Québec a une batterie de près de 70 kWh et une autonomie de 120 km, mais ne pèse que 5 000 kg. Il est à noter que le coût actuel de remplacement d'une batterie de 72kWh d'AltairNano est de 150 000\$. Par contre, le prix visé de remplacement est de 75 000\$ d'ici 2013.

5.2.2 SCÉNARIO 2 : BIBERONNAGE ULTRA-RAPIDE

Le second scénario propose une forme de biberonnage ultra-rapide, au fil du parcours. Ce scénario est plus avantageux en termes de poids du véhicule, considérant que l'énergie transportée n'est finalement jamais très élevée. Par contre, il présente le désavantage de nécessiter plusieurs infrastructures de recharge qui augmentent à la fois les risques de fiabilité et le coût de l'ensemble du projet.

En s'attardant au volet énergétique, il est raisonnable de penser que le concepteur d'un tel circuit, basé sur ce type de recharge tentera d'optimiser les coûts en identifiant la meilleure combinaison de puissance de transfert au niveau de la borne et le nombre de ces dernières sur le parcours. Afin de fournir un scénario crédible, certaines hypothèses ont été retenues :

- Durée des transferts :	10 s	10s
- Puissance des transferts :	500 kW (715 A @ 700 VDC)	1 MW (1430 A @ 700 VDC)
- Énergie par recharge :	1,38 kWh	2,77 kWh
- Nombre de postes de biberonnage :	37	15
- Capacité des super-condensateurs:	15 kWh	25 kWh

Les capacités retenues de 15 et 25 kWh permettent une autonomie suffisante en cas de bris de bornes de recharge. Ainsi, selon ces hypothèses, il faudrait un accumulateur de type super condensateur dont la capacité totale serait d'environ 15 kWh et 37 postes de biberonnage capables de fournir une recharge partielle de 1,38 kWh pour satisfaire au requis le plus sévère, soit celui du parcours Des Laurentides. Si, par contre, l'on retient un véhicule équipé d'une plus grande réserve, par exemple 25 kWh, il ne faudrait que 30 postes de recharge. Enfin, si l'on augmentait plutôt la puissance de ces bornes de recharge à 1 MW chacune, elles fourniraient 2,77 kWh et il en faudrait 19 sur le parcours, pour un autobus dont la capacité serait de 15 kWh, mais seulement 15 si la capacité est de 25 kWh à bord des autobus.

Tel que le paragraphe précédent le démontre, il est possible de faire varier le nombre de postes de recharge requis en fonction de quelques paramètres qui doivent être pris en compte, soit : le temps de transfert, la puissance des postes de biberonnage et la capacité totale des super-condensateurs à bord des autobus. Chacun de ces paramètres implique plusieurs impératifs et doivent être considérés dans leur ensemble avant qu'une option ne soit sélectionnée. Évidemment, un scénario impliquant cette technologie serait probablement plus risqué que le scénario de recharge en fin de ligne, compte tenu du très grand nombre d'opérations d'arrimage et mise sous tension. Par contre, les super-condensateurs sont reconnus pour leur longévité et il serait envisageable de les voir durer au-delà de 12 ans avant de devoir être remplacés.

5.2.3 VOLUME, POIDS ET PRIX DE STOCKAGE D'ÉNERGIE

5.2.3.1 OPTIONS DE STOCKAGE

Les deux seuls appareils de stockages qui seront considérés, seront le super condensateur et la batterie lithium-ion à recharge très rapide. Les autres méthodes, que ce soit des batteries NiMH ou des volants d'inertie, ne sont pas assez disponible commercialement ou peu attrayante technologiquement.

SUPER-CONDENSATEURS

Le super-condensateur représente l'option la plus compatible avec une recharge ultra-rapide au fil du parcours. En retenant l'option médiane de l'analyse de la section « SCÉNARIO 2 : biberonnage ultra-rapide » soit des bornes de 1MW et une puissance embarquée de 15kWh, voici les caractéristiques résultantes en utilisant des données standards sur les super-condensateurs actuellement sur le marché. Une banque de 15kWh occuperait un volume de 2300L avec un poids de 2500kg. Les prix des super-condensateurs étant difficiles à estimer, nous ne pouvons que proposer un intervalle de 200 000\$ à 400 000\$.

BATTERIES LITHIUM-ION

Dans le cas de la recharge en bout de ligne, l'accumulateur tout indiqué est la batterie à recharge très rapide, tel qu'exploré dans la section « SCÉNARIO 1 : biberonnage en fin de ligne ». Ce type de batterie pourrait, pour une capacité de 85kWh, peser environ 1200kg et occuper un volume de 625L. Le coût d'une telle batterie est d'environ 200 000\$. Il est à noter que ce prix est une extrapolation de données publiques, et non d'un prix ferme obtenu du fabricant. Par contre, un fabricant mentionne que le coût visé en 2014 pour une batterie de 72kWh est de 75 000\$.

5.3 COMPARAISON AVEC TROLLEYBUS

En termes d'efficacité énergétique ou plutôt de consommation par kilomètre, le trolleybus et le véhicule à biberonnage sont à peu près équivalents. L'étape de stockage de l'énergie engendre évidemment des pertes supplémentaires, mais les batteries modernes sont capables de restituer près de 97% de l'énergie de recharge. Les deux utilisent une chaîne de traction similaire, pèsent environ le même poids et font face au même parcours.

6 PERSPECTIVES GLOBALES ET HORIZON TEMPOREL

Afin de baser notre évaluation du futur des véhicules à biberonnage, nous nous référons à l'historique de l'introduction des autobus hybrides diesel/électriques. En voici un bref et incomplet rappel :

1969	<i>Mercedes-Benz OE 302</i>
1993	<i>Orion II, modifié en hybride</i>
1995	<i>Nissan UA/FHI 7E</i>
1996	<i>Gillig Phantom</i>
1998	<i>Orion VI hybride</i>
1998	<i>NewFlyer ED40-LF</i>
1999	<i>TransTeq EcoMark</i>
2000	<i>Orion VII hybride</i>
2006	<i>Nova LFS hybride</i>
2008	<i>Déploiement massif de bus hybrides</i>

Afin d'utiliser cette perspective historique nous devons tenter de nous situer en terme de niveau de développement de bus à biberonnage par rapport au développement des hybrides. Actuellement, comme il n'y a sur le marché qu'une seule offre commerciale (minibus Elfo de EPT) et que plusieurs expériences sont en cours ou sur le point de débiter, nous pouvons affirmer que nous sommes à un niveau équivalent à la fin des années 90 par rapport aux bus hybrides. Nous croyons que dans un horizon de cinq ans, l'utilisation de bus par biberonnage restera du domaine de l'expérimentation et de la démonstration. Il est envisageable qu'un développement industriel soutenu se fera dans un horizon de 5 à 7 ans et que des produits commerciaux seront réellement disponibles et utilisés à plus grande échelle d'ici 10 ans. Les fruits des travaux au niveau des batteries et des super-condensateurs à recharge ultra-rapide devraient avoir des retombées commerciales en 2013-2015 et ces dernières devraient permettre une utilisation abordable dans des véhicules à biberonnage autour de 2017-2025. Tout comme pour le déploiement des hybride diesel/électrique, plusieurs modèles devraient être sur le marché avant ces dates, mais ils ne seront pas considérés comme couramment disponibles et leur fiabilité ne sera pas démontrée avant plusieurs années.

Il est toutefois important de noter qu'une partie des avancés récentes en science fondamentale ainsi qu'en développement de produits, de même que la mise en service de projets pilotes, est due à des fonds du « *Recovery Act* » de l'administration Obama. Cette aide cessera graduellement à compter de cette année. L'impact sur le futur du transport durable est difficile à déterminer. La tendance lourde de l'industrie vers l'hybridation, la diminution des émissions de CO2 et l'électrification des transports ne devrait pas être significativement altérée, contrairement à ce qui a été vécu à la fin des subventions de recherche et développement lors de la crise du pétrole des années 70. Par contre, la vitesse de ce développement sera certainement affectée par la fin des subventions. Ceci est pris en compte dans l'analyse temporelle précédente.

Par contre, tel que présenté dans la section Analyse énergétique, d'un point de vue technique et technologique, nous pouvons conclure qu'un tel projet d'autobus articulé électrique par biberonnage est possible.

7 DISCUSSION

7.1.1 CONCLUSION

Dans une perspective de déploiement d'un système de transport collectif de l'ampleur de celui proposé par la STL, il est impératif de rappeler certains faits. Les sociétés de transport sont avant tout des entreprises dont la mission est de fournir une offre de transport fiable, confortable et attrayante. Bien qu'elles démontrent de l'intérêt pour les nouvelles technologies, elles n'ont souvent pas les moyens d'expérimenter et de jouer le rôle de cobaye, compte tenu de la nécessité d'offrir un service qui répondra à la demande.

Tous les projets de démonstration et d'expérimentation représentent un risque et nécessitent d'être traités avec une précaution et une certaine retenue car ils nécessitent inmanquablement des ajustements et des adaptations imprévisibles. De tels projets doivent être pourvus de budgets adéquats, permettant de faire face aux imprévus.

Considérant la réalité opérationnelle pragmatique des sociétés de transport à l'égard de leur mission, les entreprises manufacturières sont elles aussi, bien souvent malgré elles, prudentes, ce qui ralentit la commercialisation de nouvelles technologies.

L'étude présentée ici a dressé un inventaire des technologies, produits et projets de démonstration qui ont eu cours ou sont en phase de déploiement. Toutefois, il a été démontré qu'aucun produit ni projet pilote ne concerne des véhicules articulés électriques. Ainsi, malgré les récentes percées d'entreprises telles que Proterra aux États-Unis et Sinautec en Chine, il est difficile de définir avec précision quelle sera l'horizon de déploiement dans de plus grands véhicules.

Cependant, il est important de mentionner que d'un point de vue technique et technologique, les auteurs de l'étude pensent que rien n'empêche, aujourd'hui, le déploiement d'un tel projet, basé sur des technologies existantes, mais dont la durabilité et la fiabilité ne pourra être démontrée que par ceux qui auront la capacité d'être les premiers à les mettre en opération.

7.1.2 RECOMMANDATION

Considérant les récentes percées technologiques tant au niveau des accumulateurs batteries, notamment les batteries de type titanate de lithium et les modules de super-condensateurs;

Considérant l'existence de trolleybus articulés dont les auxiliaires de puissances sont basés sur des batteries en opération en Europe sur des distances réduites;

Considérant les récentes progressions des offres commerciales de véhicules biberonnés ainsi que des projets de démonstration qui ont cours à ce jour;

Considérant le coût élevé des infrastructures de caténaires et de leur coût d'entretien et de réparation;

Considérant les requis de puissance et d'énergie que peut représenter un parcours d'autobus articulé électrique sur les trajets Des Laurentides et De la Concorde à Laval;

Considérant la grande fiabilité et la compatibilité des groupes motopropulseurs électriques de trolleybus articulés avec des accumulateurs embarqués;

Considérant l'offre commerciale actuelle des entreprises manufacturières de trolleybus;

Considérant que l'innovation et le développement technologique dans le domaine sont souvent forcés par la demande des exploitants;

Considérant que les trolleybus mis en service à court terme pourront être éventuellement convertis pour être exploités en mode de biberonnage;

Considérant que les lignes de caténares seront compatibles avec des autobus biberonnés qui pourraient desservir d'autres axes de transport;

Le Centre National du Transport Avancé (CNTA) recommande à la Société de transport de Laval (STL) d'examiner davantage l'option de biberonnage pour un service d'autobus articulés électriques éprouvés, opérés en mode BRT, si la date prévue de mise en service est au-delà de 2020.

Le CNTA recommande de suivre avec attention les retours d'expérience des autobus Proterra mis en service chez Foothill Transit et Link Transit sur la côte ouest américaine. De plus, le CNTA recommande de surveiller le déploiement des autobus à super-condensateurs chinois fabriqués par Sinautec et l'éventuelle mise en marché nord-américaine de cette technologie.