



TRANSFORMER L'AVENIR :
L'ADOPTION DE VÉHICULES À PILES À
COMBUSTIBLE PAR LES SYSTÈMES
CANADIENS DE TRANSPORT URBAIN



RÉSUMÉ DE L'ÉTUDE
JANVIER 2005

R E M E R C I E M E N T S

Le gouvernement du Canada a commandé et financé cette étude par l'intermédiaire de l'Alliance canadienne sur les piles à combustible dans les transports, programme administré par Ressources naturelles Canada. BC Transit a assuré la gestion du contrat. L'étude a été effectuée par MARCON-DDM EMH, Montréal, Canada.

Cette étude n'aurait pas été possible sans la collaboration extraordinaire des équipes de gestionnaires des systèmes canadiens de transport urbain ni sans la contribution experte de fournisseurs de technologies, d'universitaires, de fabricants d'autobus, de gestionnaires de sites de démonstration et d'experts de l'industrie.

Les auteurs remercient tous les participants de leur temps et de leur aide.

Rapport complet :

http://www.nrcan.gc.ca/es/etb/ctfca/Publications_f.html.

M38-24/1-2005
0-662-68749-3

Ce rapport a été rédigé par MARCON-DDM EMH inc., une société indépendante de consultation en marketing. Les opinions, les conclusions et les recommandations qu'il contient sont ceux des auteurs et ne représentent pas nécessairement les points de vue de BC Transit, Ressources naturelles Canada et le gouvernement du Canada.

L'économie de l'énergie de la planète est à la veille d'un virage remarquable vers l'hydrogène. Au cœur de cette transformation se trouve la pile à combustible à hydrogène, soit la façon la plus efficace de transformer toute une gamme de combustibles en de l'énergie utilisable tout en réduisant grandement les émissions.

Au Canada, les systèmes de transport urbain pourraient ouvrir la voie de l'avenir en se dotant de véhicules qui ne produisent ni smog, ni gaz à effet de serre (GES).

Autobus urbains à piles à combustible à hydrogène :

- *Pas d'émissions génératrices de smog*
- *Pas d'émissions de GES*
- *Plus silencieux que les autobus classiques*
- *Peut être deux fois plus efficaces que ceux à moteur à combustion interne*
- *Exploitation et entretien plus économiques que ceux à moteur à combustion interne*
- *Nombreux combustibles possibles, entre autres renouvelables*





T A B L E D E S M A T I È R E S

CONTEXTE	2
MÉTHODE ADOPTÉE	4
OBJECTIFS DE L'ÉTUDE	5
PRINCIPALES CONSTATATIONS	6
PRINCIPAUX DÉFIS ET ENJEUX	9
CONCLUSION	10
RECOMMANDATIONS	12
ANNEXE I : LA TECHNOLOGIE DES PILES À COMBUSTIBLE	15
ANNEXE II : COÛTS DES CYCLES DE VIE D'AUTOBUS	17
ANNEXE III : CALENDRIER DE LA TRANSITION	18

En l'an 2000, comme membre de la communauté mondiale des pays qui se préoccupent des conséquences environnementales, sociales et économiques de l'accroissement des émissions de GES, le Canada a dévoilé son Plan d'action 2000 sur le changement climatique.

Dans celui-ci, le gouvernement du Canada s'est engagé à collaborer avec l'industrie et avec d'autres ordres de gouvernement pour mettre au point et démontrer des technologies reposant sur l'hydrogène qui permettraient à notre pays de réduire ses émissions de GES et de mettre en valeur les volets innovateurs de son économie. La présente initiative porte en grande partie sur les applications de l'hydrogène dans le domaine des transports.

En juin 2001, Ottawa a annoncé la création de l'Alliance canadienne sur les piles à combustible dans les transports (ACPCT), programme de soutien de la démonstration et de l'évaluation des différents processus de production d'hydrogène et d'alimentation de véhicules à pile à combustible à hydrogène.

Il serait tout naturel que les systèmes de transport urbains (STU), dont les parcs d'autobus fonctionnent presque exclusivement au diesel, soient des adopteurs précoces de la technologie des piles à combustible à hydrogène, qui peut ramener à zéro les émissions de GES et de polluants aériens urbains.

Les STU canadiens constituent un secteur idéal où débiter :

- Ils transportent efficacement un grand nombre de passagers, plus de 2,42 milliards par année.
- Leurs véhicules, environ 12 000 au Canada, constituent un marché de taille.
- Ces véhicules consomment environ 360 millions de litres de diesel et plus de 17 millions de mètres cubes de gaz naturel par année¹.
- Cette application serait évidente pour un public sympathique à l'amélioration de la qualité de l'air.
- Les STU ont des infrastructures centralisées adaptables à l'utilisation d'hydrogène.
- Les applications en transport urbain peuvent être étendues au marché mondial.

Voici certains des bienfaits qu'engendreraient des autobus à piles à combustible à hydrogène pour la société :

- Effets bénéfiques pour la santé d'un STU à zéro émission dans le centre-ville et d'autres quartiers urbains.
- Réduction appréciable de la pollution par le bruit due au remplacement des moteurs à combustion interne par des systèmes de propulsion électrique.
- Élimination complète des émissions de gaz à effet de serre.
- Utilisation possible d'énergies renouvelables (p. ex. solaire, éolienne, géothermique et hydroélectrique) pour produire l'hydrogène.

¹ Association canadienne du transport urbain, *Canadian Transit 2003 Fact Book*.

En 2003, l'ACPCT a décidé d'étudier les dossiers auxquels sont confrontés les STU en ce qui a trait à l'évolution des parcs d'autobus diesel vers les autobus à piles à combustible à hydrogène.

Le Groupe de travail sur les démonstrations de poids lourds de l'ACPCT a établi la nécessité de cette étude. Ce groupe compte des représentants de systèmes de transport urbain, de fabricants d'autobus, de fournisseurs d'équipements et de technologies, de fournisseurs de combustibles et de gouvernements.

Le Groupe a fait remarquer que l'étude devrait non seulement fournir des renseignements sur les STU, mais aussi procurer une base de connaissances pouvant aider l'industrie à cibler les occasions d'affaires qui se présentent au titre de l'emploi de piles à combustible à hydrogène pour le transport urbain.

Bref, les systèmes de transport urbain du Canada offrent :

- un marché attrayant pour la jeune industrie des piles à combustible, qui cherche à commercialiser ses produits;
- une occasion pour les gouvernements de réaliser une grande partie de leurs engagements à réduire les GES;
- une occasion pour le Canada d'être un chef mondial de la transition des transports faisant appel aux piles à combustible.



M É T H O D E A D O P T É E

Les constatations ici présentées découlent de la visite de 16 systèmes de transport urbain au pays, dont certains comptent des zones écologiquement sensibles. Des entrevues en personne et au téléphone ont aussi été faites avec :

- des fabricants d'autobus,
- des fournisseurs du secteur de la technologie de l'hydrogène,
- des établissements de formation technique,
- des experts de l'industrie de l'hydrogène,

- des rédacteurs de codes et de normes,
- des organismes gouvernementaux canadiens et étrangers,
- des responsables de projets de démonstration d'autobus à piles à combustible.

Ces constatations ont été enrichies de données secondaires de diverses sources, notamment des associations industrielles, des organismes gouvernementaux et des analystes industriels.

La méthode utilisée est précisée à l'annexe 1 du rapport détaillé :

[http://www.nrcan.gc.ca/es/etb/ctfca/
Publications_f.html](http://www.nrcan.gc.ca/es/etb/ctfca/Publications_f.html)



OBJECTIFS

Cette étude a été menée afin d'établir les défis et les enjeux ainsi que la façon de favoriser l'évolution des STU canadiens vers des autobus à piles à combustible².

Plus particulièrement, nous avons examiné :

- le développement de la technologie des piles à combustible pour autobus urbains au Canada et à l'étranger;
- les questions de réglementation touchant tous les ordres de gouvernement (de concert avec le milieu américain de la réglementation);
- une analyse comparative des risques des différentes technologies utilisées pour les transports urbains;
- les spécifications des autobus à pile à combustible;
- les conséquences de la pile à combustible en ce qui a trait aux installations d'exploitation et d'entretien;
- ses conséquences pour l'entretien;
- ses conséquences pour les budgets d'exploitation et de formation;
- l'infrastructure et la technologie du ravitaillement;
- les conséquences pour la chaîne d'approvisionnement;
- la nécessité de communications externes.

² « Autobus à piles à combustible » : s'applique à toute sorte d'autobus qui tire la totalité ou une partie de son énergie d'un ensemble de piles à combustible à bord. Les deux principales catégories dont il est question ici sont l'autobus à piles à combustible (une seule source d'énergie) et l'autobus hybride à piles à combustible (un ensemble de piles à combustible et une ou plusieurs autres sources d'énergie).

P R I N C I P A L E S C O N S T A T A T I O N S

L'arrivée de la pile à combustible dans les parcs d'autobus de transport urbain nécessitera la transformation des autobus, des installations, de l'infrastructure de ravitaillement en carburant et un cadre réglementaire. Les principaux coûts pour les STU se rapporteront entre autres à l'acquisition d'autobus et à la modification des installations, ou à la construction de nouvelles installations. Voici le sommaire des principales constatations au sujet des incidences de la transition :

AUTOBUS À PILES À COMBUSTIBLE

- Les fournisseurs de technologies et les fabricants d'autobus prévoient que ces autobus ne seront pas sur le marché avant 2015.
- On prévoit que le nombre et la taille des démonstrations d'autobus urbains à piles à combustible augmenteront pendant la période de transition.
- Sorte de pile : on s'attend que ce sera la pile à membrane à échange direct de protons d'hydrogène (MEP).
- À bord, l'hydrogène sera stocké dans des cylindres haute pression (350 bar ou plus).
- On prévoit que les autobus commerciaux à piles à combustible atteindront ou dépasseront toutes les normes de fonctionnement des autobus diesel.
- On prévoit que les autobus commerciaux à piles à combustible auront une fiabilité égale ou supérieure aux autobus diesel classiques.
- Les systèmes hybrides à piles à combustible combineront une pile à combustible à hydrogène de moindre capacité et un système

qui récupère de l'énergie par les freins et un efficace système de stockage de l'énergie; nouvelle technologie prometteuse qui réduit la consommation d'hydrogène sans augmenter le coût du groupe propulseur.

- Il est possible que les autobus hybrides urbains en voie d'élaboration soient mis en vente les premiers.

SYSTÈME DE TRANSPORT URBAIN

- La planification des circuits et des affectations d'autobus ne changera pas à cause de l'entrée en service d'autobus à piles à combustible; il ne faudra pas d'autobus supplémentaires.
- L'entretien des autobus à piles à combustible sera assez différent en ce qui a trait au groupe motopropulseur mais restera identique, dans la plupart des cas, en ce qui a trait à la carrosserie et ses membrures, à la suspension, au châssis, aux roues et aux freins.
- L'éventail de compétences nécessaires à l'entretien d'autobus à piles à combustible ne sera pas très différent, mais il faudra quand même mettre l'accent sur la formation en électricité et en électronique. Il est à prévoir que, d'ici 2015, les effectifs auront évolué et posséderont les compétences nécessaires aux technologies entourant la pile à combustible.
- Les STU devront équiper leurs installations d'entretien de nouveaux outils (p. ex. capteurs à hydrogène et appareils de diagnostic) et remplacer certains outils par d'autres plus spécialisés (p. ex. outils à main anti-étincelles).
- L'importance des changements nécessaires variera selon les installations. Par exemple, celles où l'on entretient déjà des autobus à gaz naturel comprimé (GNC) ne seront pas beaucoup modifiées. Par contre, celles où l'on n'entretient que des autobus diesel devront être modifiées beaucoup plus : dispositions de sécurité, ventilation, éclairage, systèmes de

surveillance et de suppression des incendies. Il faudra peut-être aussi modifier le système d'électricité.

- Un parc d'autobus à piles à combustible nécessitera les mêmes surfaces d'entretien et de stationnement qu'un parc d'autobus diesel.
- Tous les employés des STU devront recevoir un niveau de formation en sécurité de l'hydrogène équivalent à leur formation pour le diesel.
- On prévoit que les différents STU auront besoin d'environ trois années pour préparer la transition à des autobus à piles à combustible.
- D'après des experts de la technologie de l'hydrogène et des transports publics, il est possible que l'utilisation d'hydrogène dans des moteurs à combustion interne constitue une étape préalable à l'arrivée des autobus à piles à combustible. Ce serait l'occasion pour les STU de commencer à utiliser l'hydrogène comme carburant avant d'accueillir des autobus à piles à combustible.

INFRASTRUCTURE DE L'HYDROGÈNE COMME COMBUSTIBLE

- L'hydrogène est actuellement classé comme matière dangereuse, mais son utilisation prochaine comme carburant crée la demande qu'on le classe plutôt comme « combustible ». On prévoit que ce reclassement aura lieu avant l'arrivée sur le marché d'autobus à piles à combustible.
- Le stockage d'hydrogène dans les installations des STU et les activités connexes nécessiteront des procédures semblables à celles de carburants comme le GNC.
- Il est possible que des STU possèdent des installations ne convenant pas à la production d'hydrogène sur les lieux (p. ex. emplacement des installations, manque d'espace).
- La stratégie d'approvisionnement en hydrogène de chaque STU dépendra de plusieurs facteurs, mais en particulier du coût de la matière première : l'électricité dans le cas de l'électrolyse de l'eau et le gaz naturel dans celui du reformage du méthane.
- Les procédures de ravitaillement en hydrogène ne s'écarteront pas beaucoup de celles du diesel, et il ne faudra aucun personnel supplémentaire.

ENVIRONNEMENT RÉGLEMENTAIRE

- En l'absence de normes applicables en particulier aux autobus à piles à combustible ou à leurs composantes, ceux qui circulent déjà ont été autorisés à utiliser comme référence les normes des autobus à gaz naturel comprimé (GNC).
- On s'attend à ce que des codes et normes pour l'hydrogène et les piles à combustible existent avant la vente commerciale d'autobus à piles à combustible.
- On déploie actuellement de grands efforts au Canada, aux États-Unis et ailleurs afin de préparer une solide base scientifique en vue de l'élaboration de normes. Les résultats préliminaires portent à croire que des normes sur les distances sécuritaires minimums acceptables autour des postes de ravitaillement et des lieux de stockage seront prêtes dans quelques années, à temps pour permettre la croissance de l'option « piles à combustible » parmi les STU.

COÛTS

Autobus

- On prévoit que les autobus commerciaux à piles à combustible coûteront environ 1 million de dollars chacun³, à leur arrivée sur le marché en 2015.
- En d'autres termes, le coût d'achat d'un autobus à piles à combustible dépassera de deux tiers celui d'un autobus diesel.
- Le coût d'achat d'un autobus à pile à combustible sera à peu près le même que celui d'un autobus hybride à piles à combustible.
- Le coût du cycle de vie d'un autobus à piles à combustible sera comparable à celui d'un autobus diesel; celui d'un autobus hybride à piles à combustible sera à peu près 10 p. 100 de moins élevé.
- Le coût annuel de l'entretien d'un autobus à piles à combustible et d'un autobus hybride à piles à combustible sera moins élevé de 15 p. 100 et 21 p. 100 respectivement, que celui d'un autobus urbain diesel.

Carburant

- Les scénarios de comparaison du coût des carburants révèlent que l'hydrogène devrait être moins coûteux que le diesel, notamment dans le cas des autobus hybrides.
- Le prix de l'hydrogène dépend toutefois de celui de la source d'énergie, c'est-à-dire le méthanol, le gaz naturel ou l'électricité.
- Pour les STU qui peuvent accueillir l'équipement nécessaire, le reformage du gaz naturel sur place sera probablement la source

d'hydrogène la plus économique. Dans les provinces riches en hydroélectricité comme le Québec, le Manitoba et la Colombie-Britannique, l'électrolyse aussi sera rentable.

Installations et fonctionnement

- La transformation d'installations construites pour des autobus diesel en fonction des normes de l'hydrogène coûtera de 2,1 M \$ à 4,2 M \$ pour un garage de 250 autobus, tout dépendant de la configuration du bâtiment. Pour la comparaison, pour construire de nouvelles installations pour les autobus à l'hydrogène, il en coûterait de 1,4 M \$ à 2,8 M \$ de plus que pour des installations d'autobus diesel.
- Selon les estimations, le coût de fonctionnement des installations d'entretien devrait augmenter de 2,70 \$/m³ par année, compte tenu du coût d'équipement de sécurité rendu nécessaire par l'hydrogène (p. ex. capteurs et systèmes de chauffage et de ventilation). Cela revient à 250 \$ par autobus par année, soit moins que 0,6 p. 100 des coûts d'entretien totaux.
- Le budget de formation ordinaire suffira pour former le personnel en ce qui a trait à l'hydrogène.
- Le coût de l'élaboration et de l'application de nouvelles procédures tenant compte de l'hydrogène pourra être pris en charge dans le budget de fonctionnement ordinaire.
- Le coût des communications liées à l'entrée en service de la technologie de la pile à combustible pourra être pris en charge dans le budget de relations publiques ordinaire.

³ Tous les dollars indiqués dans ce rapport sont des dollars canadiens; ceux donnés pour 2015 sont des dollars de 2015.

P R I N C I P A U X D É F I S E T E N J E U X

De nombreux dossiers techniques, financiers, politiques et administratifs devront être réglés avant que des autobus à piles à combustible soient offerts commercialement et que les STU commencent à en acheter. Il faut que tous les intervenants relèvent les défis le plus tôt possible pour que les STU canadiens puissent accélérer la transition à des parcs d'autobus à piles à combustible.

ENJEUX TECHNIQUES

- Voir à égaler ou dépasser les paramètres de rendement et de fiabilité des autobus diesel.
- Adapter les technologies actuelles « de démonstration » aux normes adaptées aux STU.
- Augmenter l'efficacité des électrolyseurs et leur capacité de produire de plus grandes quantités d'hydrogène à des prix concurrentiels.
- Réduire la taille des unités de reformage sur place et ajouter le captage du carbone au processus.
- Mettre au point une chaîne d'approvisionnement compétitive pour les STU qui préfèrent acheter leur hydrogène à l'extérieur.
- Commercialiser des réservoirs haute pression et de grande capacité et économiques pour l'hydrogène gazeux.
- Achever la préparation de codes et normes pour l'hydrogène.

- Préparer des programmes de formation pour le personnel technique.

ENJEUX FINANCIERS

- Réduire de 90 p. 100 le prix des systèmes à pile à combustible.⁴
- Réduire le coût final de l'hydrogène pour les autobus urbains en diminuant les frais d'immobilisations des systèmes de production d'hydrogène.
- Pour les STU, tenir compte du déplacement des coûts du fonctionnement à l'achat en concluant de nouveaux accords de partenariat avec leurs bailleurs de fonds.

ENJEUX EN MATIÈRE DE POLITIQUE PUBLIQUE

- Obtenir la collaboration de toutes les administrations publiques pour les STU afin de réaliser les objectifs environnementaux collectifs.
- Trouver et engager les ressources financières nécessaires pour soutenir la pénétration des technologies de l'hydrogène parmi les STU sur plusieurs années.

ENJEUX ADMINISTRATIFS

- Préparer toutes les dimensions des activités des services de transport urbain en vue du passage à des autobus à piles à combustible.
- Obtenir la collaboration des principaux intervenants.
- Assurer des communications efficaces avec tous les intervenants.

⁴ Outre les modules des piles à combustible, le reste du système est formé des composantes suivantes : module d'interface et réseau de canalisations, invertisseur (pour transformer le courant direct en courant alternatif triphasé), dispositif de contrôle de la pile, sous-système d'approvisionnement en air et sous-système de refroidissement.

C O N C L U S I O N

Les autobus à piles à combustible, qui devraient être sur le marché d'ici 2015, constituent un emploi viable de la technologie de l'hydrogène pour les parcs canadiens de transport urbain.

Il est à prévoir que les autobus à piles à combustible pourront s'acquitter de leurs fonctions de transport urbain avec un rendement et une fiabilité comparables à celles des autobus diesel, ou même meilleures. Le coût d'acquisition d'un autobus à piles à combustible sera plus élevé que celui d'un autobus diesel, mais leurs coûts respectifs sur tout le cycle de vie (acquisition, entretien et carburant) seront comparables.

On ne pourra faire le pont entre la réalité actuelle et ce qui pourrait exister en 2015 que si tous les intervenants saisissent toutes les occasions qui se présentent, en cette conjoncture de l'histoire des systèmes canadiens de transport en commun.

Pour l'industrie des piles à combustible et de l'équipement connexe, le parc canadien d'autobus urbains constitue un marché cible crucial, en fait l'idéal comme premier grand segment, en attendant le mûrissement des autres.

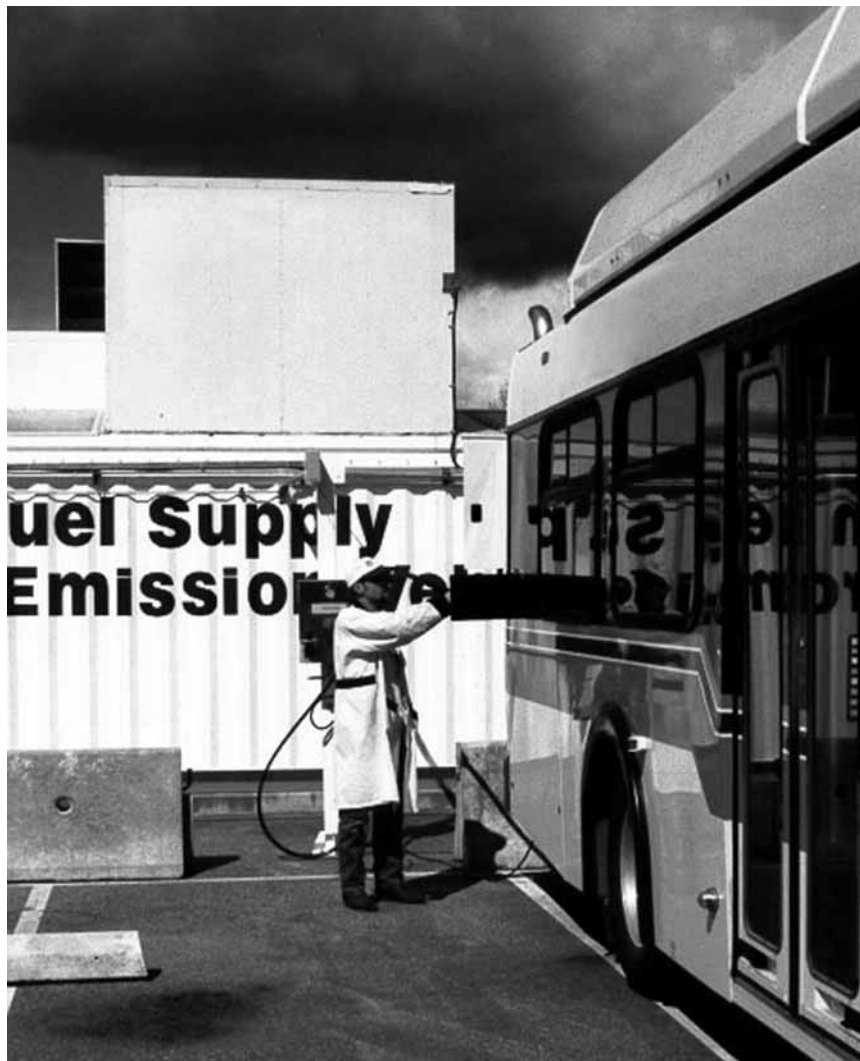
Il sera essentiel, pour réussir au cours des dix prochaines années, que les gouvernements donnent des appuis à tous les niveaux, accélérant ainsi la pénétration des autobus à piles à combustible et la collaboration entre intervenants.

En effet, l'adoption d'autobus à piles par les STU ne pourra pas être réalisée sans plus d'interventions du gouvernement, notamment au titre des coûts de transition. S'il est à prévoir que le coût des autobus à piles à combustible se comparera à celui des autobus diesel sur tout le cycle de vie, leur coût d'acquisition (qui devrait dépasser des deux tiers celui d'un autobus diesel) est plus élevé que ce que la plupart des STU ont les moyens de se payer. De plus, le coût (non répétitif) de l'adaptation des installations, de l'outillage et des équipements dépasse les possibilités des budgets habituels des STU. Le virage vers l'hydrogène est faisable, mais il faudra de nouveaux arrangements avec les partenaires de financement pour que l'aide additionnelle nécessaire aux dépenses d'acquisition soit disponible.⁵

⁵ Au Canada, le gouvernement fédéral n'offre pas d'aide pour l'achat d'autobus urbains. Par contre, aux États-Unis, la Federal Transit Administration du département des Transports peut financer jusqu'à 80 p. 00 du coût d'achat d'autobus urbains. Au Canada, ce sont les partenaires financiers (c.-à-d. la province ou des organismes locaux) qui financent l'achat des autobus des STU. (Source : Manitoba Energy Development Initiative)

Au bout du compte, ce seront les gouvernements, avec leurs encouragements financiers, leurs politiques, leurs lois et leurs normes de réglementation, qui seront les intervenants les plus cruciaux dans l'accélération de la transition des systèmes canadiens de transport urbain vers les autobus à piles à combustible.

Si le Canada réalise cet objectif en temps opportun, il pourrait être l'un des premiers pays au monde, un innovateur et une source de compétences pour les technologies énergétiques durables. De plus, les autres intervenants canadiens de l'industrie de l'hydrogène et des piles à combustible en retireraient un avantage durable sur leurs concurrents du monde entier.



R E C O M M A N D A T I O N S

Une transition réussie des systèmes canadiens de transport urbain à des autobus à piles à combustible nécessitera un niveau appréciable de collaboration de la part de tous les groupes d'intervenants.

En effet, chaque intervenant — STU, fabricants d'autobus, fournisseurs de systèmes à piles à combustible, fournisseurs de systèmes de stockage de combustibles, fournisseurs de combustibles et d'équipements de postes de ravitaillement, établissements de formation et gouvernements aura un rôle crucial à jouer. Voici pour chacun une liste d'activités recommandées :

INDUSTRIE CANADIENNE DES STU

Il sera important pour les systèmes de transport urbain de collaborer pour faire avancer la technologie des piles à combustible pour autobus. Les STU pourraient entreprendre plusieurs activités, avant que des autobus à piles à combustible soient sur le marché, pour garantir que la technologie des piles à combustible répondra à leurs besoins opérationnels :

1. Établir avec exactitude leurs coûts actuels de fonctionnement et d'entretien pour pouvoir s'en servir comme données de base pour la transition à la technologie de la pile à combustible.
2. Établir le profil des compétences de ses employés à l'entretien pour pouvoir s'en servir pour planifier les changements entraînés par l'entretien d'autobus à piles à combustible.
3. Une fois les codes et les normes de l'hydrogène disponibles, examiner les changements à apporter aux installations pour pouvoir exploiter des autobus à piles à combustible.
4. Dans le contexte de l'établissement des plans stratégiques, chaque STU devrait établir si le passage à la pile à combustible nécessitera la construction d'installations à de nouveaux endroits.

5. Évaluer les incidences de l'utilisation de l'hydrogène gazeux sur les programmes de santé et de sécurité des STU.
6. Réexaminer les plans d'intervention d'urgence pour les adapter à l'hydrogène.
7. Étudier l'opportunité de partager des installations de ravitaillement (p. ex. petits STU plus véhicules municipaux).
8. Faire en sorte que l'Association canadienne du transport urbain (ACTU) serve de point de distribution de l'information théorique et de l'expérience sur l'hydrogène et les autobus à piles à combustible.
9. Se servant de l'ACTU comme point de référence, établir pour les STU un centre de connaissances et compétences sur les technologies des carburants de remplacement, en particulier celle de la pile à combustible à hydrogène.
10. Tenir les conseils d'administration des STU au courant des développements de la technologie des piles à combustible, qui sont marquants pour le transport urbain.
11. Commanditer la mise au point d'un modèle des coûts de transition que les STU pourront facilement utiliser pour évaluer leur propre situation lorsqu'ils étudieront le dossier des autobus à piles à combustible.
12. Continuer de participer à des programmes de démonstration à frais partagés.

FABRICANTS D'AUTOBUS

Il est recommandé que les fabricants d'autobus prennent un rôle plus proactif dans l'application des piles à combustible aux autobus urbains. Recommandations particulières :

13. Collaborer avec les fournisseurs de systèmes de pile à combustible.
14. Mettre au point des guides de conception d'autobus pour les fournisseurs de systèmes de piles à combustible.

15. Continuer de participer à des programmes de démonstration à frais partagés.

FOURNISSEURS DE SYSTÈMES DE PILES À COMBUSTIBLE

Recommandations particulières pour les fournisseurs de systèmes à piles à combustible (outre les défis techniques et la réduction du coût) :

16. Coopérer avec tous les intervenants d'industrie afin de rapprocher la date prévue d'existence du marché.
17. Continuer de collaborer avec les fabricants d'autobus en vue de faciliter les possibilités optimales de fabrication des piles à combustible et leur intégration en douceur dans la conception de nouveaux autobus.
18. Mettre au point des programmes de formation sur place des responsables du fonctionnement et de l'entretien des autobus des STU.
19. Étudier l'opportunité de mettre au point des services, des procédures et des prix pour la remise en état des empilades.
20. Continuer de participer à des programmes de démonstration à frais partagés.
21. Considérer l'opportunité de l'adoption croisée de pièces de remplacement afin de standardiser celles-ci.
22. Étudier la possibilité de normaliser complètement l'industrie des piles à combustible afin de simplifier les travaux d'entretien des STU et de réduire les coûts des fournisseurs de piles à combustible.

FOURNISSEURS DE SYSTÈMES DE STOCKAGE D'HYDROGÈNE

Le principal enjeu des fournisseurs de systèmes de stockage est de réduire le poids des cylindres transportés à bord. Autres recommandations particulières :

23. Poursuivre l'élaboration des systèmes de stockage et de ravitaillement à 700 bars.
24. Mettre au point de plus grandes unités pour le stockage sur place et des systèmes transportables pour les fournisseurs d'hydrogène.
25. Collaborer avec les fabricants d'autobus à la conception du stockage à bord.
26. Continuer de participer à des programmes de démonstration à frais partagés.

FOURNISSEURS D'HYDROGÈNE ET DE SYSTÈMES DE RAVITAILLEMENT

Recommandations particulières pour les fournisseurs d'hydrogène et de systèmes de ravitaillement (outre la solution des problèmes techniques) :

27. Évaluer la future demande en hydrogène pour les transports en commun et planifier l'expansion des unités centrales de production afin de répondre à l'accroissement prévu de la demande des STU.
28. Cerner la possibilité d'approvisionner par gazoduc et la possibilité de recouvrer d'autres produits secondaires.
29. Déterminer les endroits où les installations de ravitaillement pourraient être partagées (p. ex. un petit STU et la municipalité, pour ses véhicules).
30. Fournir à l'Association canadienne d'éducateurs en force motrice (ACEFM) de l'information sur l'intégration de la formation sur l'hydrogène aux programmes d'apprentissage et d'obtention de permis.
31. Continuer de participer à l'élaboration de normes et codes pour l'hydrogène.
32. Continuer de participer à des programmes de démonstration à frais partagés.
33. Acquérir, examiner et mettre en commun les données de rendement des projets de démonstration.

ÉTABLISSEMENTS DE FORMATION

Les établissements de formation devront accomplir de nombreuses tâches au cours des prochaines années. Recommandations particulières :

34. Coordonner les programmes d'apprentissage provinciaux et interprovinciaux qui ont trait à la formation des gens de métier dans le domaine de l'hydrogène et des piles à combustible (p. ex. par l'intermédiaire de l'ACEFM).
35. Recourir à un organisme central de formation et d'accréditation en matière d'hydrogène et de piles à combustible.
36. Intégrer la formation sur l'hydrogène et les piles à combustible aux programmes actuels d'apprentissage et de permis, plutôt que d'en créer de nouveaux.
37. Réviser les programmes de formation en matières dangereuses offerte aux techniciens par les commissaires provinciaux aux incendies.
38. Collaborer avec les États-Unis à la création de programmes normalisés de sécurité hydrogène pour l'Amérique du nord.
39. Préparer des programmes de formation pour les interventions d'urgence liées à l'hydrogène et aux piles à combustible.

GOVERNEMENTS

Les gouvernements ont un rôle crucial à jouer en ce qui a trait à l'avenir des industries des piles à combustible et des transports urbains.

Recommandations particulières :

40. Étudier l'opportunité d'encourager, par voie législative, l'application commerciale des technologies des piles à combustible.
41. Continuer de mettre au point des stratégies de financement appropriées pour soutenir la transition aux applications à pile à combustible à hydrogène en offrant :
 - des encouragements à l'acquisition d'autobus,
 - des encouragements à la construction ou la conversion d'installations (dont des postes de ravitaillement),
- des encouragements axés sur l'éducation afin de faciliter l'adoption des piles à combustible.
42. Continuer de participer à des programmes de démonstration à frais partagés dans le domaine de l'hydrogène.
43. Achever l'évaluation de la comparaison de tous les coûts et avantages des autobus à piles à combustible par rapport à ceux des autobus diesel, tenant notamment compte des coûts sociaux comme la pollution de l'air, le bruit et les émissions de GES.
44. Mettre au point la réglementation et les processus d'enregistrement des autobus à piles à combustible.
45. Poursuivre l'élaboration de normes réglementaires pour les véhicules, les installations connexes et les systèmes de ravitaillement sous l'angle de l'hydrogène et de la technologie des piles à combustible.
46. Examiner les règlements provinciaux et territoriaux sur la santé et la sécurité afin d'établir les répercussions de l'arrivée de l'hydrogène en milieu de travail.
47. Accroître la quantité et le niveau de l'information donnée à différents publics (p. ex. grand public, médias, compagnies d'assurance et groupements syndicaux) afin de les sensibiliser davantage.
48. Évaluer dans quelle mesure l'utilisation de la technologie des piles à combustible dans les transports urbains a la faveur du public canadien et continuer de surveiller cet aspect.
49. Élaborer une stratégie nationale d'encouragement visant à accélérer la commercialisation au Canada de véhicules lourds à pile.
50. Appliquer des politiques nettes et claires pour les zones écologiquement sensibles et aux petits STU de façon à encourager l'acquisition hâtive de parcs d'autobus à pile à combustible.

LA TECHNOLOGIE DES PILES À COMBUSTIBLE

COMMENT FONCTIONNE UNE PILE À COMBUSTIBLE

Voici une explication non technique du fonctionnement d'une pile à membrane à échange de protons (MEP).

PILE À COMBUSTIBLE À MEMBRANE ÉCHANGEUSE DE PROTONS (PCMEP)

La pile à combustible à MEP fonctionne à une température relativement basse, ce qui signifie qu'elle se réchauffe rapidement et n'exige aucune structure de confinement coûteuse. Cette sorte de pile utilise typiquement le platine comme catalyseur. De constantes améliorations des techniques et des matériaux ont permis d'accroître la densité de puissance à un tel point qu'un appareil à peu près de la taille d'une petite valise peut mouvoir une voiture. Leur cyclabilité est aussi un de leurs grands avantages. Cette technologie est la plus prometteuse pour les applications de transport.

FONCTIONNEMENT D'UNE PILE À COMBUSTIBLE

Une pile à combustible est un dispositif qui transforme de l'énergie chimique en de l'énergie électrique. De l'hydrogène (tiré d'un de plusieurs combustibles carboniques dont le méthanol, le gaz naturel, le pétrole ou une énergie renouvelable) est combiné avec de l'oxygène (tiré de l'air) au sein de la pile, celle-ci produisant électrochimiquement de l'électricité, de l'eau et de la chaleur.

Au cœur de la pile à combustible se trouvent généralement trois principaux éléments : une anode, une cathode et de l'électrolyte. Le courant électrique passe de la cathode à l'anode. Ce sont les matières dont la pile est composée qui déterminent la façon dont celle-ci produit de l'électricité.

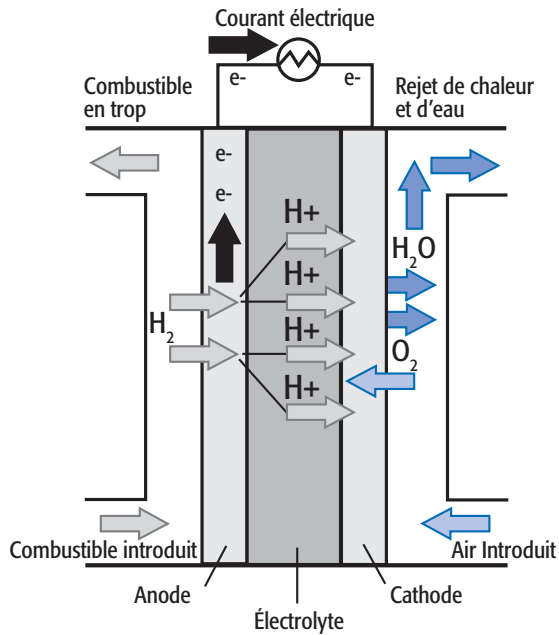
La pile typique

Dans une typique pile à combustible à MEP, les protons d'hydrogène migrent de l'anode à la cathode par l'entremise de l'électrolyte. Le revêtement de platine de l'anode est un catalyseur, aidant à scinder les molécules d'hydrogène en des protons (positifs) et des électrons (négatifs). La membrane électrolytique permet aux protons seulement d'atteindre la cathode. Se voyant le passage interdit, les électrons s'écoulent vers la cathode par un circuit externe, créant ainsi un flux d'électricité. Par ailleurs, l'oxygène dont est approvisionnée la cathode se combine avec les protons pour former de l'eau.

Empilades

Typiquement, des piles à combustible sont mises en « empilades », le nombre de piles déterminant la tension totale. C'est la surface de la pile qui détermine la quantité de courant. On obtient la quantité totale d'électricité produite en multipliant la tension par le courant produit; le résultat est normalement mesuré en kilowatts (KW).

PILE À COMBUSTIBLE MEP



Réaction à l'anode : $\text{H}_2\text{O} = 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$

Réaction à la cathode : $\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- = 2\text{H}_2\text{O}$

Reste de l'installation

Pour produire de l'électricité utilisable à l'aide d'une pile à combustible, il faut plus que juste une empilade d'éléments; il faut par exemple des appareils pour contrôler des fonctions comme : l'injection des gaz combustibles, la gestion d'un équilibre H₂O (crucial), le conditionnement de l'énergie produite et la surveillance et le contrôle de tous les paramètres du système (p. ex. température et pression). Sans un tel système de soutien, la pile à combustible ne peut produire de l'électricité utilisable.

ANNEXE II

COÛTS DES CYCLES DE VIE D'AUTOBUS

Tableau 1 : Coûts de cycles de vie d'autobus en dollars de 2015

ÉLÉMENTS DE COÛT DU CYCLE DE VIE	250 AUTOBUS SUR 18 ANNÉES		
Coût d'acquisition	Diesel	150 096 770 \$	
	Pile à combustible	250 300 279 \$	
	Hybride	251 403 664 \$	
Coût de fonctionnement	<i>Coût d'entretien</i>		
	Diesel	236 704 005 \$	
	Pile à combustible	200 714 570 \$	
	Hybride	186 199 881 \$	
	<i>Coût du carburant</i>		
	(Diesel @ 1,05 \$/l)	Diesel	155 521 825 \$
	(Hydrogène @ 3,47 \$/kg)	Pile à combustible	91 672 162 \$
	(Hydrogène @ 3,47 \$/kg)	Hybride	60 503 627 \$
	Coût total		
	Diesel	542 332 600 \$	
	Pile à combustible	542 687 012 \$	
	Hybride	498 107 172 \$	

Coût du cycle de vie de chaque autobus :

- Diesel 2 169 290 \$
- Pile à combustible 2 170 748 \$
- Hybride électrique/pile 1 992 429 \$

Les prévisions ci-dessus s'appliquent à un garage de 250 autobus. Les coûts liés à des parcs de plus grande ou de moindre envergure varieraient donc au total, mais seraient proportionnellement les mêmes. Le coût du cycle de vie ne comprend pas ceux des installations.

Tous les coûts sont exprimés en dollars de 2015.

Le coût de chaque sorte d'autobus sur son cycle de vie dépend du coût du combustible utilisé. Dans le tableau ci-dessus, on se sert d'une estimation des prix moyens des combustibles en 2015. Pour de plus amples précisions sur les coûts possibles, voir les sections 5 à 7 du rapport détaillé (Summary of Costs) : http://www.nrcan.gc.ca/es/etb/ctfca/Publications_f.html

CALENDRIER DE LA TRANSITION

Tableau 2 : Calendrier de la transition

MOIS :	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Définition des exigences et processus d'approbation des projets projet	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
Attribution du contrat et livraison des autobus													■	■
Conception de la modif. des install.; contrat; construction													■	■
Conception du install. de ravitaillement; contrat; construction													■	■
Conception de nouvelles Install.; contrat; construction							■	■	■	■	■	■	■	■
Négociations avec unités de négociation appropriées pour régler toute question de perturbation des employés														
Élaboration du programme de formation technique des employés														
Élaboration et rédaction de politiques (santé, sécurité et environnement) applicables à l'hydrogène et aux piles														←
Élaboration d'un programme de formation – santé, sécurité et environnement														
Programme de formation des formateurs														
Formation, personnel de supervision et de gestion														
Formation des techniciens														
Formation du personnel d'entretien des installations														
Formation des préposés à l'entretien														
Élaboration d'un programme d'éducation – communications, intervenants internes														←
Éducation – communications, intervenants internes														
Éducation – communications, intervenants externes														←
Éducation – communications, intervenants externes														



