

# **Rapport technique – Technologie hybride**

---

# Table des matières

<b>1</b>	<b>CONTEXTE ET OBJECTIF .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE.....</b>	<b>2</b>
2.1	Type d'autobus.....	2
2.2	Mise en service des autobus hybrides et témoins .....	5
2.3	Paramètres mesurables .....	6
2.4	Instrumentation .....	6
2.5	Formation du personnel .....	9
2.6	Essais aux laboratoires d'Environnement Canada .....	9
2.7	Essais contrôlés sur piste extérieure .....	11
2.8	Cycle de vie.....	12
2.9	Sondages auprès des chauffeurs et de la clientèle .....	13
<b>3</b>	<b>ANALYSE DES RÉSULTATS.....</b>	<b>14</b>
3.1	Résultats des essais aux laboratoires d'Environnement Canada .....	14
3.2	Résultats des essais contrôlés sur piste.....	17
3.3	Analyse de la technologie hybride en service clientèle .....	18
3.4	Bilan des GES.....	25
3.5	Cycle de vie.....	27
3.6	Satisfaction des chauffeurs et des clients.....	28
	Tableau 3-1 Résultats du sondage auprès des chauffeurs de la STM.....	29
<b>4</b>	<b>OUTIL DÉCISIONNEL.....</b>	<b>30</b>
<b>5</b>	<b>AU-DELÀ DE LA TECHNOLOGIE HYBRIDE .....</b>	<b>33</b>
5.1	Ventilation électrique à bas voltage .....	33
5.2	Programmation optimisée de la transmission standard (logiciel Topodyn) .....	34
5.3	Impact sur la consommation en carburant et la réduction des GES .....	35
<b>6</b>	<b>SYNTHÈSE ET RECOMMANDATIONS .....</b>	<b>37</b>
6.1	Synthèse .....	37
6.2	Recommandations .....	38
	Documentation de référence.....	38
Annexe A	Technologie hybride	
Annexe B	Système d'acquisition de données ISAAC	
Annexe C	Résultats d'essais aux laboratoires d'Environnement Canada	
Annexe D	Résultats des analyses en service clientèle	
Annexe E	Choix du protocole de quantification	
Annexe F	Impacts de la technologie hybride sur le coût de cycle de vie des autobus	
Annexe G	Résultats des sondages	
Annexe H	Au-delà de la technologie hybride	

## LISTE DES FIGURES

Figure 2-1	Caractéristiques générales de l'autobus Nova LFS .....	3
Figure 2-2	Disposition des composantes dans l'autobus Nova Bus hybride .....	5
Figure 2-3	Exemple simplifié de résultats du système d'acquisition de données ISAAC .....	7
Figure 2-4	Comparaison de la consommation de carburant et de flux de courant électrique – Autobus hybride et témoin Nova 2008.....	8
Figure 2-5	Essais aux laboratoires d'Environnement Canada .....	10
Figure 2-6	Essais contrôlés sur piste à Blainville, Québec .....	12
Figure 3-1	Consommation de carburant des autobus de la STM – Résultats des essais aux laboratoires d'Environnement Canada (vitesse moyenne de 11 km/h) .....	15
Figure 3-2	Consommation de carburant des autobus de la STO – Résultats des essais aux laboratoires d'Environnement Canada (vitesse moyenne de 19 km/h) .....	15
Figure 3-3	Essais contrôlés sur piste – Consommation de carburant en fonction du nombre d'arrêts par kilomètre et du nombre de passagers – Autobus hybride Nova 2008 (la consommation du système de chauffage d'appoint est exclue).....	17
Figure 3-4	Consommation de carburant des autobus témoins de la STM avec moteurs de 250 cv et de 280 cv (la consommation du système de chauffage d'appoint est exclue).....	18
Figure 3-5	Consommation de carburant des autobus en fonction de la vitesse moyenne – Autobus Nova Bus 2008 (la consommation du système de chauffage d'appoint est exclue).....	20
Figure 3-6	Consommation de carburant en fonction du nombre d'arrêts par kilomètre – Autobus Nova 2008 (la consommation du système de chauffage d'appoint est exclue) .....	21
Figure 3-7	Consommation de carburant de l'autobus et du chauffage d'appoint en fonction de la vitesse moyenne et de la température extérieure – Autobus sans air climatisé hybride et témoin Nova 2008 .....	22
Figure 3-8	Énergie électrique transitée par le système hybride en fonction de la température extérieure – Autobus hybride Nova 2008 (la consommation du système de chauffage d'appoint est exclue) .....	23
Figure 3-9	Consommation de carburant en fonction de la vitesse moyenne et du niveau moyen d'accélération – Autobus hybride et témoin (la consommation du système de chauffage d'appoint est exclue).....	24
Figure 3-10	Émissions de GES des systèmes de propulsion hybrides et standard, conformes à la norme EPA 2007, obtenus au laboratoire d'Environnement Canada à + 20 °C (gramme/kilomètre).....	25
Figure 3-11	Comparaison des émissions de GES des autobus hybrides par rapport aux autobus standard, conformes à la norme EPA 2007, obtenus au laboratoire d'Environnement Canada à + 20 °C .....	26
Figure 3-12	Utilisation du chauffage auxiliaire en fonction de la température extérieure - Autobus Nova 2008 .....	28
Figure 4-1	Consommation de carburant en fonction de la vitesse moyenne pour des vitesses variant de 5 à 30 km/h – Autobus hybride et témoin modèle NOVA 2008, sans climatisation (la consommation du système de chauffage d'appoint est exclue) .....	30

Figure 4-2	Consommation de carburant en fonction du nombre d'arrêts par kilomètre pour un nombre d'arrêts variant de 0 à 10 – Autobus hybride et témoin modèle NOVA 2008, sans climatisation (la consommation du système de chauffage d'appoint est exclue) .....	31
Figure 5-1	Effet de la ventilation électrique et de la programmation de la transmission (Topodyn) sur la consommation de carburant (la consommation du système de chauffage d'appoint est exclue) .....	35

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1	Caractéristiques des autobus hybrides et témoins de la STM et de la STO .....	4
Tableau 2-2	Liste des essais aux laboratoires d'Environnement Canada .....	11
Tableau 3-1	Résultats du sondage auprès des chauffeurs de la STM .....	29
Tableau 3-2	Résultats du sondage auprès de la clientèle de la STM .....	29
Tableau 5-1	Consommation de carburant (en litre/100 km) pour les divers scénarios et comparaison des réductions de consommation de carburant - Pour une vitesse moyenne de 18 km/h .....	36

## Liste des acronymes

ECM	<i>Electronic Control Module</i> , ordinateur de contrôle sur les moteurs ou transmissions
COV	Composé organique volatil
cv	Cheval vapeur équivalent à l'unité britannique horsepower (hp)
EPA	Environmental Protection Agency
eq.	Équivalent
GES	Gaz à effet de serre
PAC	Polluants atmosphériques communs (COV, NOX, SO, Particules.)
PDTU	Programme de démonstration en transport urbain
STM	Société de transport de Montréal
STO	Société de transport de l'Outaouais
TCM	<i>Transmission Control Module</i> , ordinateur de contrôle de la transmission hybride Allison
VCM	<i>Vehicle Control Module</i> , ordinateur de contrôle des paramètres liés au fonctionnement du véhicule, dans le cas d'un autobus muni du système Allison hybride

## Définitions

Hybride	Autobus à propulsion hybride diesel-électrique, soit la combinaison d'un moteur diesel à combustion interne et de moteur et générateur électriques.
Témoin	Autobus témoins : autobus à propulsions diesel standard aussi appelé autobus standard dans le cadre du projet, dont les paramètres enregistrés sont comparés à ceux de l'autobus hybride.
Topodyn	Logiciel servant à la programmation de la transmission ZF des autobus standard.

## Sommaire

Dans le cadre du Programme de démonstration en transport urbain (PDTU), les sociétés de transport de l'Outaouais (STO) et de Montréal (STM) se sont associées afin d'élaborer un projet conjoint de transport en commun dont l'objectif premier est de mettre à l'essai une série de mesures visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre.

L'un des volets du PDTU, mené par la STM, consiste à mesurer l'impact environnemental des autobus à propulsion hybride diesel-électrique en les comparant à des autobus à propulsion diesel standard. Pour ce faire, la STM a mis en service, sur les mêmes lignes, huit autobus à propulsion hybride et six autobus à propulsion diesel standard de même modèle, et ce, pendant une année complète. Le même exercice a été réalisé sur le territoire de la STO à Gatineau avec deux autobus hybrides et sept autobus standard. De nombreuses données ont été récoltées afin de mesurer de manière exhaustive la réduction de consommation de carburant générée par la mise en service d'autobus hybrides et conséquemment la réduction des gaz à effet de serre.

La technologie hybride (sur les autobus Nova Bus 2008) a permis de réduire la consommation de carburant de 30 % en moyenne par rapport à la propulsion standard. La vitesse moyenne des autobus suivis dans le cadre du projet a été d'environ 18 km/h, tandis que le nombre d'arrêts moyen a été de 3,8 par kilomètre. La moyenne des températures pendant l'année qu'a duré le projet a été de 6,6 °C (de -29 °C à +33 °C). Les analyses des résultats ont montré que cette technologie est particulièrement avantageuse lorsque la vitesse d'opération moyenne est relativement basse et que la distance entre les arrêts demeure courte.

Le pourcentage de réduction de la consommation de carburant obtenu avec les autobus hybrides (Nova Bus 2008) se traduit en une réduction des émissions des gaz à effet de serre de près de 36 tonnes annuellement pour un autobus qui parcourt environ 70 000 km par an. Cette réduction annuelle de 36 tonnes de GES par autobus hybride est équivalente au retrait de la route de plus de 7 voitures individuelles. En effet, une automobile qui parcourt 20 000 km/année produit environ 5 tonnes/année de GES. Plus spécifiquement, notons que :

- Les moteurs conformes à la norme EPA 2007 n'émettent pas de quantité significative de particules ni d'hydrocarbures totaux (HCT);
- Le système de propulsion hybride émet 5 % plus d'oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) que le système de propulsion standard et 36 % moins de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>).

Grâce aux outils d'analyses qui ont été développés au cours de cette étude, il est possible pour un gestionnaire d'une société de transport de déterminer l'impact qu'aurait l'utilisation d'autobus hybrides sur la consommation de carburant de son parc d'autobus. Il lui suffit de connaître la vitesse totale moyenne, ainsi que la consommation totale moyenne<sup>1</sup> pour utiliser les tableaux présentés dans ce rapport. Le gestionnaire pourra ainsi déterminer si la propulsion hybride serait adaptable à ses conditions opérationnelles.

Par le biais de cette étude, d'autres technologies ont été testées et se sont montrées prometteuses. Le remplacement du système de ventilation hydraulique par un système électrique à bas voltage permet de réduire les émissions de GES des autobus hybrides et standard, alors que l'optimisation de la programmation des transmissions standard permet de réduire les émissions de GES des autobus réguliers. Ces modifications nécessitent un investissement minimal.

---

<sup>1</sup> La vitesse totale moyenne et la consommation totale moyenne sont des données disponibles à partir de l'ECM du moteur Cummins

# 1 Contexte et objectif



Le Programme de démonstration en transport urbain (PDTU) est une initiative de Transports Canada qui fait partie du Plan d'action 2000 du gouvernement du Canada sur les changements climatiques. Les sociétés de transport de l'Outaouais (STO) et de Montréal (STM) ont participé à ce programme conjointement en élaborant un projet de transport collectif. Dans le cadre de ce projet, diverses mesures ont été mises à l'essai dans le but de réduire les émissions de gaz à effet de serre.

L'un des volets du PDTU concerne la technologie hybride. Il fut dirigé par la STM. Afin de mesurer l'impact environnemental de la mise en service d'autobus à propulsion hybride diesel-électrique, une approche méthodologique méticuleuse a été appliquée. La STM a mis en service quatorze autobus équipés d'un système d'acquisition de données, dont huit autobus à propulsion hybride et six autobus à propulsion diesel standard, tous de même modèle. Ces autobus ont circulé sur les mêmes circuits durant toute une année. Le même exercice a été réalisé sur le territoire de la STO à Gatineau avec deux autobus hybrides et sept autobus standard.

Un très grand nombre de données a été recueilli afin de comparer le comportement de l'autobus hybride par rapport à l'autobus standard. Ces données ont permis de mesurer de manière précise les facteurs influençant la consommation de carburant, et conséquemment les émissions de GES. L'envergure de la base de données permet d'une part de réduire la marge d'erreur des résultats et d'autre part de rendre les résultats applicables à de nombreuses conditions.

En 2006, les autobus de transport intra-urbain ont généré plus de 284 000 tonnes de GES au Québec<sup>2</sup>. Bien que ceci ne corresponde qu'à 0,3 % des émissions totales de GES dans la province, il est important pour les sociétés de transport collectif d'être proactives en plus d'être des leaders dans le domaine de l'environnement pour offrir un mode de transport qui soit aussi « vert » que possible.

---

<sup>2</sup> Office de l'efficacité énergétique (OEE), Ressources naturelles Canada

## 2 Approche méthodologique

Des études concernant l'impact des autobus hybrides sur la réduction des gaz à effet de serre ont déjà été effectuées dans quelques villes nord-américaines et européennes. Toutefois, la variabilité des conditions dans lesquelles ces études ont été effectuées rendait les résultats difficilement comparables. Par exemple, l'autobus hybride n'était pas de même modèle que l'autobus témoin, ou encore, le nombre d'arrêts par kilomètre ou les vitesses pratiquées n'étaient pas les mêmes dans les deux cas. Ces résultats, qui sont parfois contradictoires quant aux bienfaits de la technologie hybride, compliquent la tâche pour un opérateur qui voudrait s'équiper d'un parc d'autobus hybrides.

La particularité de l'approche méthodologique utilisée dans cette étude est, d'une part, la compatibilité des résultats recueillis sur les autobus hybrides et les autobus standard et, d'autre part, l'envergure de la collecte de données. Cette approche a l'avantage de produire des résultats précis, cohérents ainsi que d'une très grande applicabilité et l'ampleur des données rend la marge d'erreur très faible. L'approche méthodologique employée est décrite dans les sections qui suivent.

### 2.1 Type d'autobus

Dans cette étude, les performances d'autobus hybrides sont comparées à celles d'autobus réguliers diesel. Pour ce faire, la STM s'est équipée de huit autobus hybrides et de six autobus standard diesel. Ces derniers sont nommés autobus témoins. Les autobus hybrides et les autobus témoins sont identiques, car ils sont du même modèle et de même année de fabrication. Seules les composantes spécifiques aux systèmes de propulsion diffèrent. Dans le cas de la STO, neuf autobus ont fait partie de l'étude, soit deux à propulsion hybride et sept à propulsion diesel standard.

Les autobus hybrides et témoins de la STO et de la STM sont de marque Nova Bus, de modèle Nova LFS. Les autobus hybrides sont équipés du système hybride électrique EP40, de type parallèle, de la compagnie Allison Transmission. Les caractéristiques générales des autobus de cette étude sont données à la Figure 2-1.

**Figure 2-1 Caractéristiques générales de l'autobus Nova LFS**



Structure	Acier inoxydable
Habillage extérieur	Fibre de verre et panneaux de bas de caisse en thermoplastique
Longueur	12,2 m (40 pi)
Largeur	2,6 m (102 po)
Hauteur	3,1 m (123 po)
Empattement	6,2 m (244 po)
Rayon de braquage extérieur	12,2 m (40,1 pi)
Système électrique	Système électrique par multiplexage Volvo Bus (VBEA)
Système HVAC	MCC de série - Climatisation Thermo King ou Carrier
Moteur	Cummins ISL 250 cv de série - Cummins ISL 280 cv
Transmission	ZF 6HP554C de série - Voith ou Allison disponible
Freins à disques essieu avant	ZF RL85 - Essieu rigide
Freins à disques essieu arrière	ZF AV-132
Freins	ABS à disques avec antipatinage
Capacité du réservoir à carburant	454 litres (120 gallons US)

Les caractéristiques générales s'appliquent aux autobus hybrides et témoins de la STM et de la STO. Toutefois, quelques caractéristiques sont spécifiques à certains autobus. Par exemple, les autobus de la STO sont équipés de climatisation alors que les autobus de la STM ne sont pas climatisés.

Aussi, les moteurs des autobus de la STM et de la STO assignés au PDTU ne répondent pas tous aux mêmes normes. Alors que les moteurs des autobus hybrides et de certains autobus témoins de la STO sont conformes aux exigences de la norme 2002 du EPA, les moteurs des autobus de la STM sont conformes aux exigences de la norme 2007 du EPA. Les moteurs sont tous de marque CUMMINS et de type ISL. Les moteurs des autobus de

la STO assignés au PDTU ont tous une puissance de 280 cv<sup>3</sup>. En ce qui concerne les quatorze autobus de la STM assignés au PDTU, les huit autobus hybrides et trois des autobus témoins ont une puissance de 280 cv, alors que les trois autres autobus témoins ont une puissance de 250 cv. Il faut noter que tous les autobus du parc de la STM sont équipés de moteur 250 cv. Lorsque les propulsions hybrides ont été commandées pour le projet, elles étaient offertes uniquement avec des moteurs 280 cv. Ainsi, la STM a décidé de s'équiper d'autobus témoins de 280 cv et de 250 cv, afin de pouvoir faire des analyses de résultats croisées. Les caractéristiques spécifiques des autobus hybrides et témoins de la STM et de la STO sont montrées au Tableau 2-1.

**Tableau 2-1 Caractéristiques des autobus hybrides et témoins de la STM et de la STO**

Société/ Identifications	STO-témoins 2006	STO-témoins 2007	STO-hybride 2006	STM-témoins 250 cv 2008	STM-témoins 280 cv 2008	STM-Hybride 280 cv 2008
<b>Date de livraison</b>	2006-avril	2007-mai	2007-mai	2008-jan	2008-jan	2008-avril
<b>Km moyen total par autobus au 31 mars 2009</b>	185 000	88 000	87 000	82 000	82 000	52 000
<b>Modèle</b>	Nova LFS	Nova LFS	Nova LFS HEV	Nova LFS	Nova LFS	Nova LFS HEV
<b>Moteur</b>	Cummins ISL 8,3 l	Cummins ISL 8,9 l	Cummins ISL 8,3 l	Cummins ISL 8,9 l	Cummins ISL 8,9 l	Cummins ISL 8,9 l
<b>Programmation</b>	280 cv	280 cv	280 cv	250 cv	280 cv	280 cv
<b>Norme/EPA</b>	<b>2002</b>	2007	<b>2002</b>	2007	2007	2007
<b>Transmission</b>	ZF-Ecomat	Voith	Allison EP40	ZF-Ecomat	ZF-Ecomat	Allison EP40
<b>Climatisation</b>	Carrier	Carrier	Thermo King	N/A	N/A	N/A
<b>Masse totale (kg)</b>	12 670	12 100	13 560	12 200	12 200	13 383

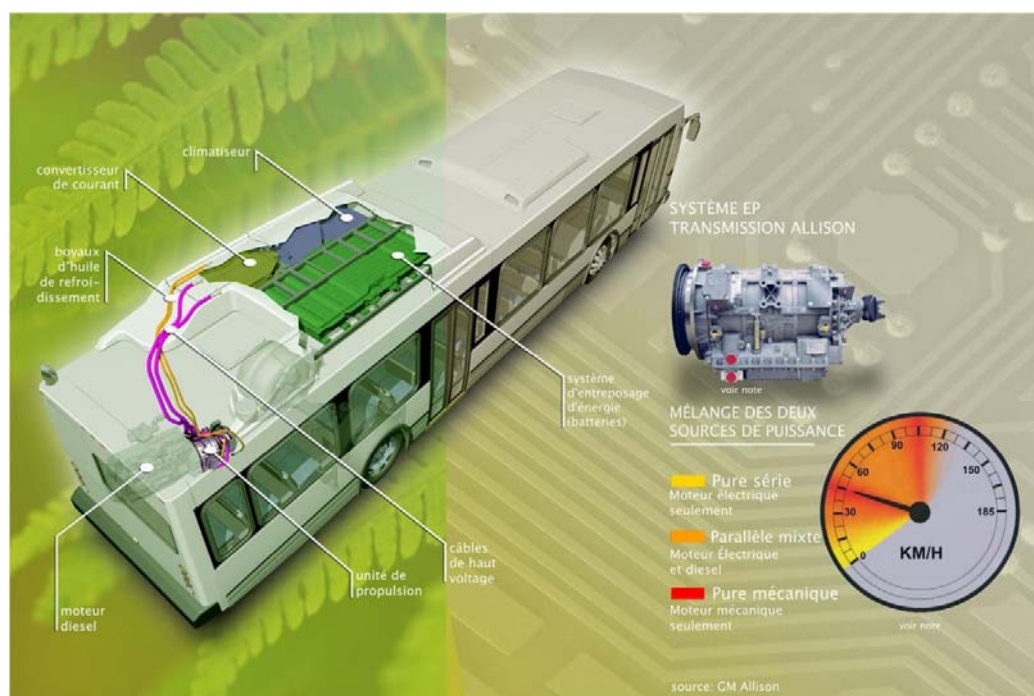
Les systèmes de propulsion hybride utilisent des composantes électriques pour le transfert, la récupération et l'accumulation d'énergie. Ce sont des groupes motopropulseurs hybrides diesel-électrique, soit la combinaison d'un moteur diesel à combustion interne et de moteurs et générateurs électriques. Ce système est composé de quatre parties électromécaniques principales:

- L'unité de propulsion (la transmission EP Allison) qui contient des engrenages et deux moteurs électriques;
- Le système d'emmagasinement d'énergie électrique (ESS), soit une batterie de piles nickel-hydrure-métallique (NiMH) pesant environ 400 kg et qui est montée sur le toit;
- Le convertisseur de courant (DPIM) qui gère le flux de courant entre la transmission et la batterie;
- Les deux modules logiques de contrôle (aussi appelés ordinateur TCM et VCM) qui sont fournis par Allison et gèrent le système motopropulseur.

Plus de détails concernant la technologie hybride et les caractéristiques techniques des autobus hybrides de la STM et la STO sont fournis à l'annexe A.

<sup>3</sup> L'abréviation « cv » signifie cheval-vapeur qui est dans ce cas-ci équivalent à l'unité britannique, horsepower (hp)

**Figure 2-2 Disposition des composantes dans l'autobus Nova Bus hybride**



## 2.2 Mise en service des autobus hybrides et témoins

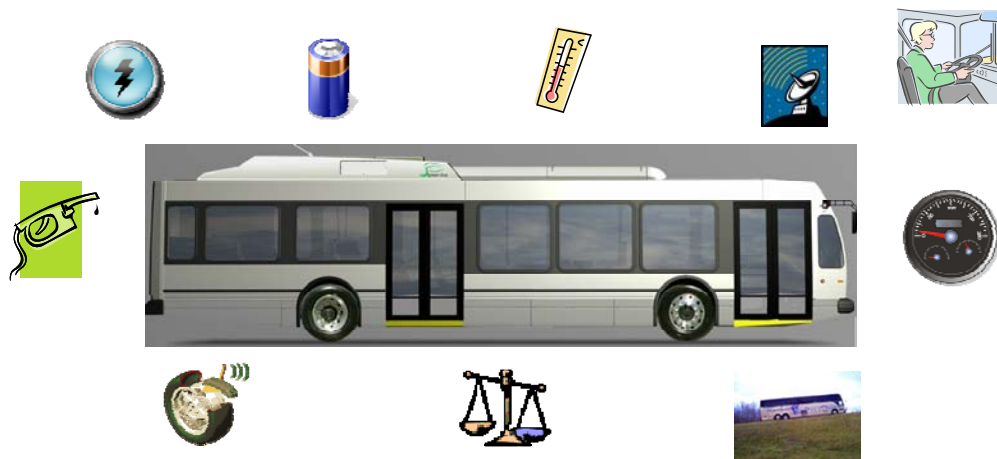
Les premiers autobus témoins de la STM ont été livrés à la fin du mois de janvier 2008. Le premier autobus hybride a été livré le 13 février 2008, alors que les autres autobus hybrides de la STM ont été livrés entre la mi-mars et le début du mois d'avril 2008 et ont été mis en service pour la clientèle le 21 avril 2008. Les autobus témoins étaient déjà en service clientèle depuis le mois de février 2008.

Les lignes sur lesquelles les autobus hybrides et témoins ont circulé ont été choisies en fonction de l'information disponible dans la documentation concernant la performance des autobus hybrides. En effet, la documentation suggérait une meilleure performance de la technologie hybride dans des conditions où la vitesse moyenne est relativement faible et où les arrêts sont fréquents. Pour cette raison, des lignes du centre-ville de Montréal ont été choisies. Aussi, afin d'évaluer l'impact de la topographie, des lignes circulant près du Mont-Royal ont été sélectionnées. Finalement, afin d'avoir une grande variabilité en termes de vitesse moyenne et de nombre d'arrêts, certains autobus ont circulé sur des lignes en milieu moins dense.

Les deux autobus hybrides de la STO ont été acquis près d'une année avant ceux de la STM. Leur service clientèle a débuté le 23 mars 2007. L'acquisition de données sur les autobus hybrides et témoins a débuté à la fin février 2008, soit en même temps que pour les autobus de la STM. Le corridor choisi par la STO est celui de l'axe des boulevards Gréber/Fournier/Maisonnette/pont du Portage/Ottawa, nommé « Ligne verte ». Ce corridor possède une longueur de 9 kilomètres et comporte 49 arrêts. Sur ce corridor, on compte environ 50 voyages à l'heure durant la période de pointe du matin qui sont effectués par trois lignes régulières et sept lignes express. Environ 10 000 déplacements s'effectuent quotidiennement sur cet axe.

Dans le cas des autobus de la STM, le carburant utilisé était du biodiesel, composé de 95 % de pétro diesel et de 5 % de biodiesel fabriqué à partir de graisse animal et d'huile végétale recyclée. Dans le cas de la STO, le carburant utilisé était du pétro diesel à 100 %.

## 2.3 Paramètres mesurables



Afin de mesurer les performances des autobus hybrides et standard et de bien saisir ce qui influence leurs performances, un grand nombre de données a été récolté. La performance des autobus est mesurée principalement par la consommation de carburant. Certains facteurs faisant varier la consommation de carburant sont bien connus tels que la vitesse moyenne, la distance parcourue et le niveau moyen d'accélération. Aussi, afin de bien comprendre le fonctionnement du moteur diesel et de la batterie du système hybride, la quantité d'énergie de ces deux systèmes a été comptabilisée. En tout, plus de 30 paramètres ont été mesurés. Voici la liste des principaux paramètres mesurés<sup>4</sup>:

- La consommation en litres/100 km;
- La vitesse moyenne de l'autobus;
- La distance parcourue;
- Le niveau moyen d'accélération;
- La température moyenne extérieure;
- Le temps en arrêt;
- Le temps de fonctionnement du chauffage d'appoint diesel;
- La vitesse de rotation moyenne du moteur diesel;
- La quantité d'énergie électrique provenant du système hybride;
- Le temps de fonctionnement du compresseur du système pneumatique;
- La demande sur l'accélérateur et le frein;
- Le courant sur le système de charge 24 volts standard.

## 2.4 Instrumentation

En tout, plus de 30 paramètres ont été mesurés en continue pendant une année sur les autobus hybrides et témoins. Plus de **20 milliards de données brutes** ont été colligées.

<sup>4</sup> La liste de tous les paramètres est présentée à l'annexe B.

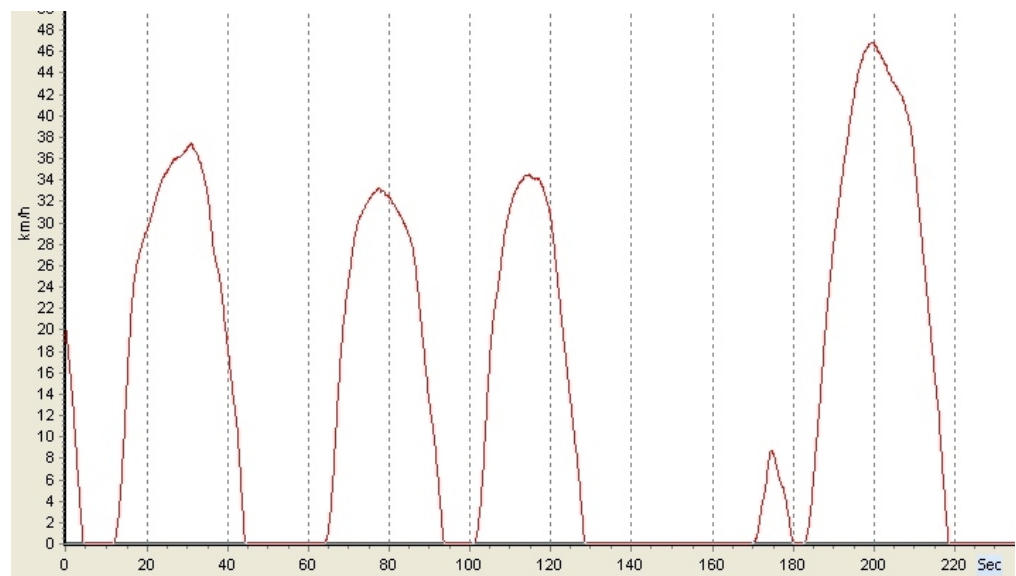
Pour enregistrer toutes ces données, un système avancé d'acquisition de données de la compagnie québécoise ISAAC Instruments Inc. et a été mis en place dans les autobus hybrides et témoins de la STM et de la STO. Ce système enregistre en continu les données concernant le fonctionnement du groupe motopropulseur ainsi que tout ce qui a trait aux conditions d'utilisation des autobus.



La boîte d'acquisition de données ISAAC a été installée à l'arrière de l'autobus, sous le panneau d'information indicateur lumineux externe. Les données sont transférées par modem sans fil lorsque les autobus arrivent au centre de transport. Chaque autobus accumule ainsi plus de 14 Mo de données par jour.

La collecte d'un très grand nombre de données, au moyen du système ISAAC, a toutefois rendu l'analyse complexe. La Figure 2-3 illustre le type de résultats obtenus par le système d'acquisition de données ISAAC.

**Figure 2-3 Exemple simplifié de résultats du système d'acquisition de données ISAAC**



Les premières analyses ont permis de constater que tous les cycles départ-arrêt présentait les mêmes caractéristiques, bien que les valeurs de ces caractéristiques changent d'un cycle à l'autre. Tel qu'illustré à la Figure 2-3, qui présente plusieurs cycles de départ-arrêt, on y note pour chacun des cycles, que la vitesse débute à 0 km/h et augmente jusqu'à un maximum, pour ensuite redescendre à 0 km/h et y demeurer jusqu'au prochain départ. Ce cycle général représente tous les événements qu'un autobus peut rencontrer, tel le trajet effectué entre deux arrêts d'autobus suivi de la période de débarquement et d'embarquement de la clientèle, ou encore les arrêts-départs incessants dans le trafic. Dans le cadre de ce rapport, ces cycles sont définis comme des «bonds». Pour chaque bond, il est possible de calculer des valeurs clés telles la vitesse moyenne, l'accélération moyenne et la consommation de carburant. De plus, puisque les paramètres présentés à la section précédente sont recueillis pour chacun des bonds, il est possible d'en évaluer leurs impacts. Par exemple, il est possible de déterminer l'impact de la température extérieure sur la consommation de carburant, en comparant la consommation

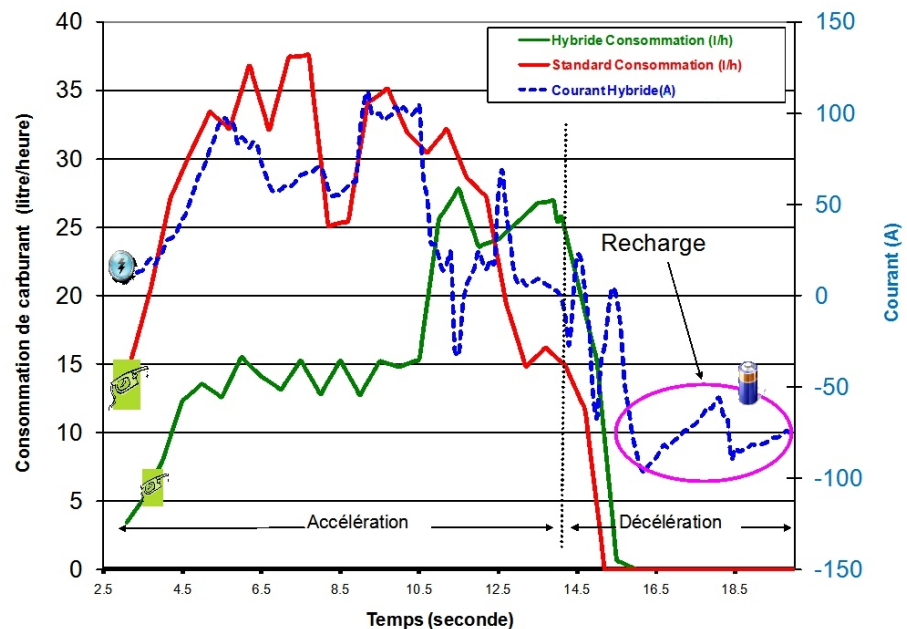
de carburant de tous les bonds qui ont une même vitesse moyenne, mais à des températures différentes.

Pour faciliter l'analyse, le logiciel Matlab<sup>5</sup> a été utilisé et une série de commandes et d'interactions logiques a été programmée. Le résultat est une matrice d'information de tous les paramètres liés à un bond. Cette matrice a été développée avec la participation du Centre National de Transport Avancé (CNTA). Elle inclut pour chacun des bonds des résultats calculés sur divers paramètres mesurés. L'analyse des informations contenues dans cette matrice permet de faire des prédictions de la consommation des deux types d'autobus évalués en fonction de conditions opérationnelles variables.

La Figure 2-4 présente, pour un bond typique, la consommation de carburant d'un autobus hybride et d'un autobus témoin (en litres par heure) ainsi que le courant utilisé par la batterie du véhicule hybride (en ampère). On y observe certaines caractéristiques d'un arrêt-départ typique, similaire aux 5 millions d'arrêts documentés au cours du projet. Elle présente une accélération jusqu'à 50 km/h d'un autobus témoin et d'un autobus hybride. On peut en tirer les informations suivantes :

- La consommation de carburant de l'autobus témoin atteint une valeur de pointe de 37 litres par heure (0,01 litre/seconde) durant cette accélération;
- La consommation de pointe pour l'autobus hybride est de l'ordre de 27 litres par heure (0,007 litre/seconde);
- La consommation totale pour l'autobus témoin durant cette phase a été de 1,3 litre et pour l'hybride de 0,35 litre.

**Figure 2-4 Comparaison de la consommation de carburant et de flux de courant électrique – Autobus hybride et témoin Nova 2008**



On peut observer que l'énergie de remplacement pour le véhicule hybride lors de cette accélération provient de la batterie. Lors de la décélération, l'ampérage au niveau de la batterie est de signe inverse, cela indique qu'elle est en phase de régénération. Les deux moteurs électriques dans la transmission deviennent une génératrice, tout en ralentissant le véhicule.

<sup>5</sup> Logiciel de calcul matriciel produit par Mathworks inc.

Pour plus d'information concernant le système d'acquisition de données ISAAC, consultez l'annexe B.

## 2.5 Formation du personnel

Le personnel d'entretien mécanique et électrique des autobus hybrides à la STM ainsi que le personnel du service de l'ingénierie ont reçu une formation d'une semaine, donnée par un spécialiste de la compagnie Allison Transmission. Cette formation couvrait autant les points d'entretien de base et les mesures de sécurité en lien avec le système de haute tension électrique, que les méthodes de diagnostic et de réparation en cas de panne.

Les chauffeurs du Centre de transport LaSalle, où se trouvent les autobus hybrides, ont reçu une formation de trois heures qui incluait la théorie du système hybride et la pratique de conduite. Cette formation a été élaborée par le personnel de formation de la STM.

Dans le cas de la STO, tous les chauffeurs ont reçu une formation théorique et pratique d'une durée de 1h15. À noter que tous les nouveaux chauffeurs à la STO reçoivent cette formation.

## 2.6 Essais aux laboratoires d'Environnement Canada

Une série d'essais en laboratoire a été réalisée pour analyser en conditions contrôlées la performance des autobus hybrides et témoins. La consommation de carburant et les émissions polluantes ont été mesurées et comparées. Ces essais ont également servi à calibrer le système d'acquisition de données ISAAC en termes de consommation de carburant, pour ainsi établir de manière précise le lien entre la consommation de carburant et les émissions de polluants. Le diesel utilisé lors de ces essais pour les autobus de la STO et de la STM, était du biodiesel composé de 95 % de pétro diesel et de 5 % de biodiesel fabriqué à partir de graisse animale et d'huile végétale recyclée.

Le parcours « Manhattan » a servi de comparaison de base, car il est bien connu dans l'industrie des transports en commun en milieu urbain. Ainsi, pour un parcours type, l'autobus doit rouler sur les rouleaux du dynamomètre à une vitesse contrôlée et mesurée avec le même nombre d'arrêts et de départs. Cette approche permet de comparer avec beaucoup de fiabilité la distance parcourue, les accélérations, les vitesses maximales et moyennes de même que les temps en arrêt. Tous les gaz d'échappement sont aspirés et traités par un système complexe d'analyse chimique. Ceci permet d'établir la concentration des divers polluants ainsi que la consommation moyenne de carburant de chaque autobus pour le type de parcours effectué. La Figure 2-5 illustre ces essais en laboratoire.

**Figure 2-5 Essais aux laboratoires d'Environnement Canada**



En tout, dix essais ont été réalisés. Dans le but de mesurer l'impact des températures estivales et hivernales sur les performances des autobus hybrides et réguliers, des tests à +20 °C et à -20 °C ont été réalisés. Enfin, puisque les autobus de la STO sont équipés d'un système de climatisation réfrigérante, des essais où la climatisation était éteinte et où elle

était à pleine capacité ont été effectués. L'énumération des conditions de ces dix essais en laboratoire est donnée au Tableau 2-2.

**Tableau 2-2 Liste des essais aux laboratoires d'Environnement Canada**

Température	Autobus	Climatisation
+20 °C	STM hybride	
+20 °C	STM témoin 280 cv	
+20 °C	STM témoin 250 cv	
+20 °C	STO hybride	Sans climatisation
+20 °C	STO hybride	Avec climatisation
+20 °C	STO témoin 280 cv	Sans climatisation
+20 °C	STO témoin 280 cv	Avec climatisation
-20 °C	STM hybride	
-20 °C	STM témoin 280 cv	
-20 °C	STM témoin 250 cv	

## 2.7 Essais contrôlés sur piste extérieure

À la fin du mois d'août 2008, la piste extérieure du centre d'essais PMG à Blainville au Québec a été utilisée pour des essais contrôlés de consommation de carburant sur des autobus hybrides et témoins de la STM (voir Figure 2-6). L'utilisation de la piste en circuit fermé est un outil qui permet de rouler en toute sécurité sans égard à la circulation automobile courante sur la voie publique. De cette façon, il est possible de rouler sur des distances déterminées à des vitesses contrôlées, tout comme d'avoir deux autobus qui se suivent en roulant de la même manière sans qu'il y ait d'interruption causée par la signalisation, des intersections ou l'interaction avec les autres véhicules.

Ces essais sur piste évaluaient les points suivants :

- Établir des tendances de consommation en fonction du nombre d'arrêts par kilomètre;
- Établir des tendances de consommation en fonction de la charge transportée;
- Mesurer l'effet combiné de la charge et du nombre d'arrêts par kilomètre;
- Obtenir des résultats comparables pour les autobus hybrides et témoins;
- Identifier tout autre aspect significatif qui pourrait éventuellement être observé au cours des essais en service clientèle.

La vitesse maximale visée entre les arrêts est de 50 km/h. Lorsque le nombre d'arrêts par kilomètre augmente, la vitesse maximale atteinte entre les arrêts diminue, ce qui est similaire à ce que l'on observe en service régulier. Des essais ont été réalisés avec des variantes en termes de nombre d'arrêts par kilomètre, avec un maximum de dix. Une série réduite d'essais a également été réalisée avec une vitesse limite de 70 km/h pour laquelle il n'y avait pas plus de deux arrêts par kilomètre.

Figure 2-6 Essais contrôlés sur piste à Blainville, Québec

	<p>Les essais sur la piste sont réalisés simultanément sur un autobus témoin et hybride.</p>
	<p>L'instrumentation du système d'acquisition de données permet d'avoir un écran d'ordinateur qui indique en temps réel au chauffeur la distance précise (à 0,01 km) entre les arrêts, la vitesse atteinte et l'accélération mesurée par un des accéléromètres.</p>
	<p>Au cours des essais sur la piste PMG, la charge de passagers est simulée à l'aide de sacs de sable. Les essais ont été faits sur plusieurs jours avec une charge soit à vide ou équivalente à 20, 40 ou 60 passagers.</p>

## 2.8 Cycle de vie

En plus de mesurer la consommation de carburant des autobus hybrides et témoins, les coûts d'acquisition et d'entretien doivent être estimés afin de comparer les cycles de vie de ces deux types d'autobus. Cette partie de l'étude a été réalisée avec la participation du groupe Marcon. L'analyse des coûts est séparée en deux volets :

- Les coûts d'acquisition, d'opération et d'entretien des autobus;
- Les coûts d'introduction et d'intégration.

Les principales composantes pour lesquelles il faut prévoir des différences de coûts d'entretien préventif et de remplacement entre les autobus hybrides et diesel sont le démarreur, la transmission, le système d'emmagasinage d'énergie, le moteur, l'inverseur de courant et le refroidisseur.

De plus, il est possible que certaines installations requièrent des modifications, notamment parce que l'autobus hybride est plus lourd et plus haut que l'autobus standard. Si tel est le cas, il faudra prendre en compte le coût de ces modifications, telles que la capacité des vérins, la hauteur des portes, la hauteur des laveurs d'autobus, l'espace libre entre les vérins et la structure du toit...).

## 2.9 Sondages auprès des chauffeurs et de la clientèle

Un sondage a été effectué auprès des chauffeurs du CT LaSalle afin d'obtenir leurs réactions au sujet de leurs expériences de conduite sur les autobus hybrides.

La clientèle des autobus hybrides de la STM a également été sondée. Cette enquête a été réalisée au cours de l'hiver 2009.

## 3 Analyse des résultats

Les résultats d'analyse sont généralement présentés en termes de consommation de carburant. Cette donnée a été mesurée durant tous les essais afin de comparer la performance des véhicules hybrides aux véhicules témoins. Les émissions de GES sont directement proportionnelles à la consommation de carburant. Dans le cas du diesel, un litre de diesel consommé par un autobus émet à environ 2,7 kg de GES<sup>6</sup>. Une diminution de consommation de carburant représente donc une réduction des GES dans des proportions similaires.

La technologie hybride a été comparée à la technologie diesel standard selon trois types d'essais :

- Les essais aux laboratoires d'Environnement Canada;
- Les essais contrôlés sur piste;
- Les essais en service clientèle comptabilisés durant une année.

Les résultats sont présentés dans les sections qui suivent.

### 3.1 Résultats des essais aux laboratoires d'Environnement Canada

Les résultats obtenus aux laboratoires d'Environnement Canada ont été les premières données de comparaison obtenues au cours du projet PDTU. Ces essais ont permis de mesurer les concentrations de gaz polluants des autobus hybrides et témoins de la STM et de la STO. Tous ces résultats sont présentés à l'annexe C.

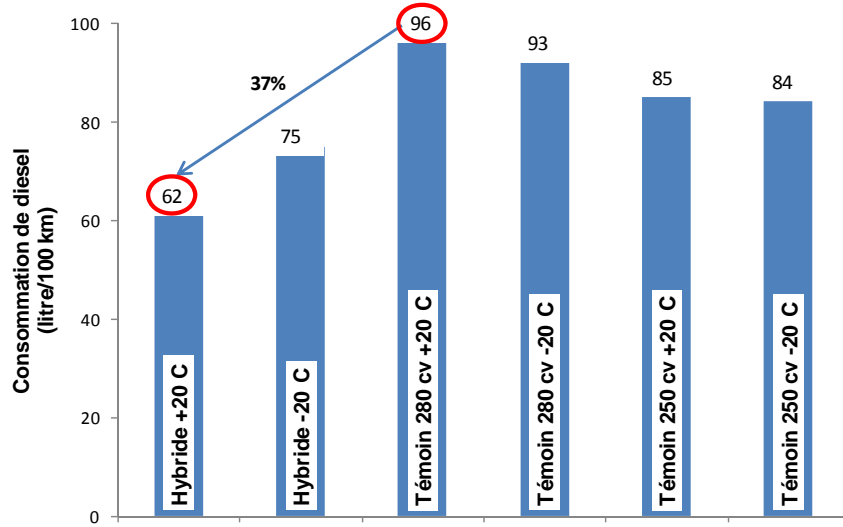
Tel que mentionné à la section 2.6, dix essais ont été réalisés sur le parcours normalisé « Manhattan » selon des conditions de température et de configuration d'autobus variables. Ces essais se sont déroulés à une vitesse moyenne d'environ 11 km/h et la vitesse maximale atteinte est d'environ 41 km/h. Le nombre d'arrêts moyen s'établit à sept par kilomètre parcouru. Il est important de noter que c'est un employé d'Environnement Canada qui opère l'autobus ; bien que ce dernier tente de reproduire les mêmes accélérations et les mêmes conditions d'un autobus à l'autre, il en découle une légère variabilité dans les résultats. Les valeurs obtenues ne sont donc pas des valeurs absolues.

La comparaison de la consommation de carburant entre les autobus hybrides et témoins de la STM est présentée à la Figure 3-1 alors que les résultats des autobus de la STO sont exposés à la Figure 3-2.

---

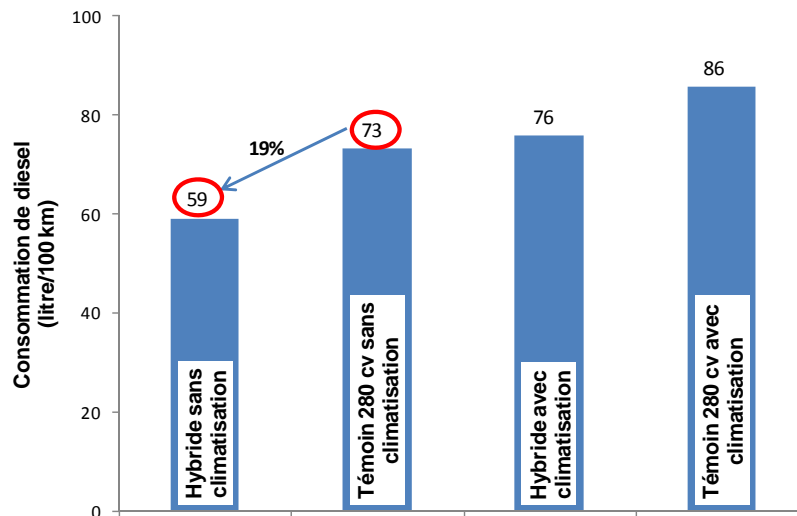
<sup>6</sup> Selon la norme ISO 14064-1, voir l'annexe F. C'est la quantité de GES au pot d'échappement, et non la quantité dite «du puits à la roue».

**Figure 3-1 Consommation de carburant des autobus de la STM – Résultats des essais aux laboratoires d’Environnement Canada (vitesse moyenne de 11 km/h)**



On peut remarquer qu’à une température de +20 °C, l’autobus hybride de la STM a consommé 37 % moins de carburant que l’autobus témoin, soit 62 litres/100 km comparativement à 96 litres/100 km. On observe également que la température extérieure joue un rôle sur la performance des autobus hybrides. La consommation de carburant de l’autobus hybride passe de 62 litres/100 km à +20 C à 75 litres/100 km à -20 C. Cette variation est beaucoup plus faible pour les autobus témoins. La différence du taux de consommation de carburant selon la température peut s’expliquer par une diminution potentielle de la performance de la batterie de l’autobus hybride, par le taux d’utilisation du ventilateur hydraulique et/ou par la performance même du moteur<sup>7</sup>.

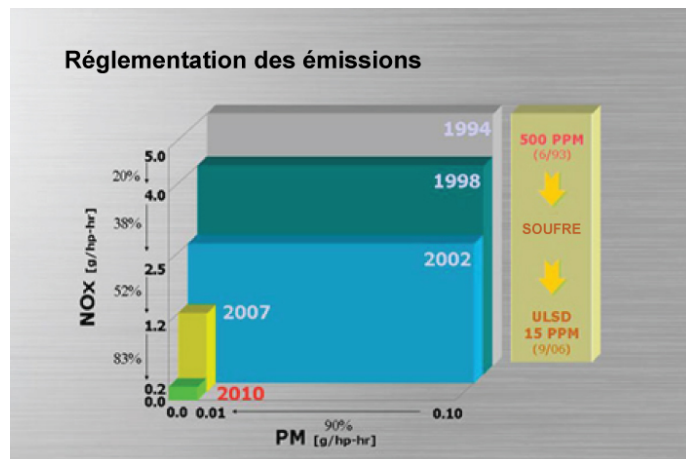
**Figure 3-2 Consommation de carburant des autobus de la STO – Résultats des essais aux laboratoires d’Environnement Canada (vitesse moyenne de 19 km/h)**



<sup>7</sup> Pour les essais, le système de chauffage d’appoint est désactivé afin de ne pas fausser les valeurs de consommation de carburant.

Dans le cas des autobus de la STO, l'autobus hybride a consommé 59 litres/100 km (sans climatisation) comparativement à 73 litres/100 km dans le cas de l'autobus témoin, soit une réduction de 19 %. On constate que cette économie de carburant est plus faible que dans le cas des autobus de la STM où l'autobus hybride a consommé 37 % moins de carburant que l'autobus témoin. Cette différence importante entre les économies de carburant réalisées par les autobus hybrides de la STM, comparativement aux autobus hybrides de la STO, est le résultat de la calibration des tandems moteurs Cummins et transmission Allison EP40.

En effet, puisque les moteurs de génération EPA 2002 sont relativement polluants par rapport aux moteurs de la génération EPA 2007, les compagnies Allison et Cummins ont choisi de calibrer le système hybride de cette génération pour optimiser la réduction des PAC. Par ailleurs, puisque les moteurs de génération EPA 2007 ont été conçus pour réduire de façon significative les émissions de PAC, les compagnies Allison et Cummins ont choisi de calibrer cette génération de système hybride de façon à optimiser les économies de carburant et la réduction conséquente des GES.



Les essais avec les autobus de la STO ont également permis de mesurer l'impact de la climatisation sur la consommation de carburant des autobus hybrides et témoins. Dans le cas des autobus hybrides de la STO, l'activation de la climatisation a résulté en une augmentation de 12 % de la consommation de carburant, alors que cette augmentation était de 17 % dans le cas des autobus réguliers de la STO. Il est important de mentionner que lors de ces essais, la climatisation était à pleine capacité, soit à 100 % durant toute la période de l'essai. Ceci n'est pas représentatif des conditions réelles, où la climatisation est plutôt intermittente, répondant au taux de refroidissement demandé.

Cette démarche a aussi permis de mesurer la consommation de carburant sur un long trajet avec une vitesse moyenne élevée et peu d'arrêts. Par exemple, pour le trajet Montréal-Ottawa, une distance de 230 km, en saison froide et à une vitesse moyenne de 100 km/h, la consommation des autobus a été d'environ 30 litres/100 km sans égard au type hybride ou témoin. Ceci confirme ce que l'on retrouve dans la documentation au sujet des systèmes de propulsion hybride :

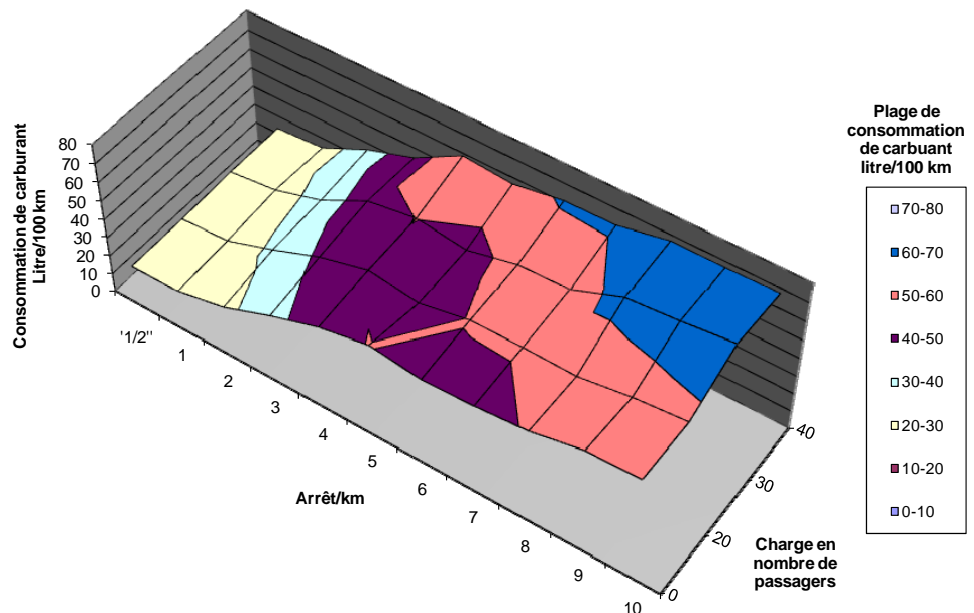
- Ils procurent une réduction de la consommation en carburant lorsque la vitesse est faible et les arrêts sont fréquents;
- Ils ont peu d'impacts à vitesse élevée sur de longs trajets avec peu ou pas d'arrêts.

## 3.2 Résultats des essais contrôlés sur piste

Des essais contrôlés sur piste ont été effectués au Centre d'essais PMG à Blainville, en août 2008, avec les autobus de la STM seulement.

La vitesse maximale visée entre les arrêts était de 50 km/h, avec un arrêt par deux kilomètres, jusqu'à 10 arrêts/km. Chaque série se faisait sur deux kilomètres au moins, dans le but d'établir une moyenne représentative malgré certaines variations de l'accélération. Les données extraites du système ISAAC ont été analysées et la Figure 3-3 montre les résultats des essais sur l'autobus hybride.

**Figure 3-3 Essais contrôlés sur piste – Consommation de carburant en fonction du nombre d'arrêts par kilomètre et du nombre de passagers – Autobus hybride Nova 2008 (la consommation du système de chauffage d'appoint est exclue)**



Ce graphique permet de constater que la consommation de carburant augmente graduellement en fonction du nombre d'arrêts par kilomètre et de la charge embarquée.

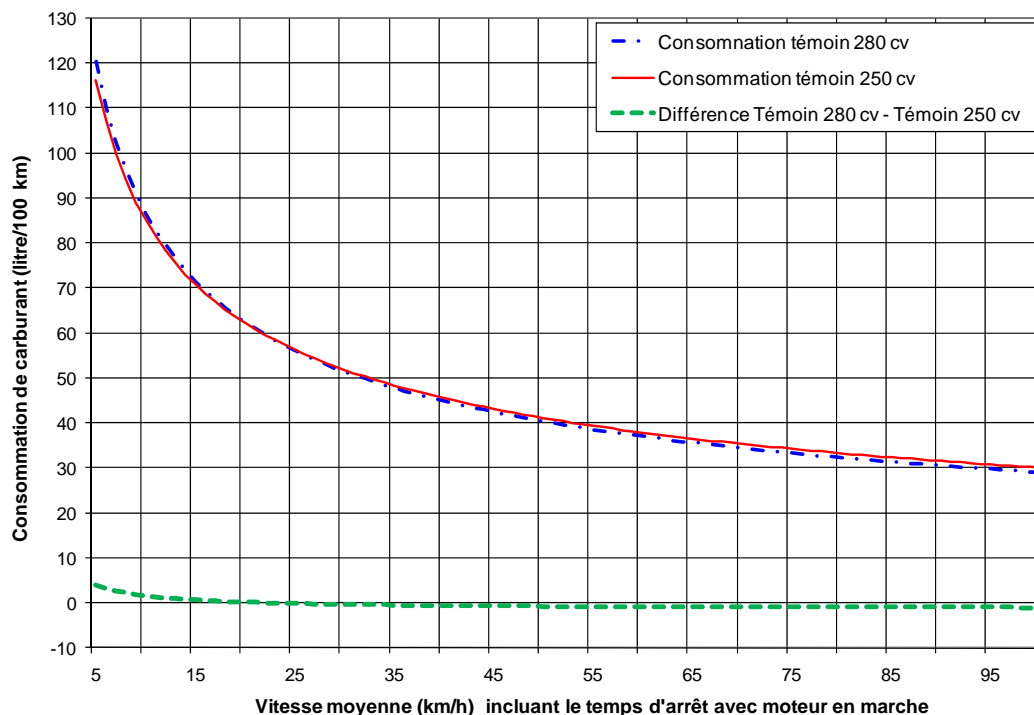
Bien que les résultats obtenus avec l'autobus témoin présentent les mêmes tendances, ils démontrent que le niveau d'accélération exercé par le conducteur avait beaucoup plus d'impact sur un autobus standard que sur un autobus hybride. Cette variation a faussé les données recueillies sur l'autobus standard et rendu impossible l'analyse des données relatives aux différents facteurs étudiés. Par ailleurs, les essais permettent de conclure que l'impact du niveau d'accélération sur la consommation de carburant est plus important dans le cas des autobus standard que des autobus hybrides.

### 3.3 Analyse de la technologie hybride en service clientèle

Plusieurs paramètres tels que la vitesse moyenne, le nombre d'arrêts par kilomètre, la température extérieure et le niveau d'accélération ont été observés à l'aide des outils d'acquisition des données. La variation de ces paramètres a été analysée en fonction de la consommation de carburant. Les graphiques qui suivent montrent les principaux résultats obtenus après un an d'essai en service clientèle.

La STM a choisi, tel que mentionné à la section «2.1 Type d'autobus»<sup>8</sup>, d'équiper ses autobus standard qui ont servi d'autobus témoins, de moteur de 250 cv (3 autobus) et de moteur 280 cv (3 autobus). Les résultats obtenus, voir Figure 3-4, démontrent que pour les conditions opérationnelles de la STM, la consommation de carburant de tous les autobus témoins, peu importe le type de moteur, est similaire.

**Figure 3-4 Consommation de carburant des autobus témoins de la STM avec moteurs de 250 cv et de 280 cv (la consommation du système de chauffage d'appoint est exclue)**



<sup>8</sup> En ce qui concerne les quatorze autobus de la STM assignés au PDTU, les huit autobus hybrides et trois des autobus témoins ont une puissance de 280 cv, alors que les trois autres autobus témoins ont une puissance de 250 cv. Il faut noter que tous les autobus du parc de la STM sont équipés de moteur 250 cv. Lorsque les propulsions hybrides ont été commandées pour le projet, elles étaient offertes uniquement avec des moteurs 280 cv. Ainsi, la STM a décidé de s'équiper d'autobus témoins de 280 cv et de 250 cv, afin de procéder à des analyses croisées des résultats.

À la lumière de ces résultats, les performances des autobus hybrides présentées dans le présent chapitre seront comparées à celles de l'ensemble des autobus témoins, sans égard au type de moteur des autobus témoins.

Les courbes qui suivent représentent des vitesses moyennes calculées tel qu'illustré à la section « 2.4 Instrumentation ». Chacun des points de ces courbes représente la vitesse moyenne lors d'un cycle arrêt/départ ; c'est à dire le cycle d'accélération, de décélération et le temps d'arrêt entre deux départs à partir de la vitesse 0 km/h. Ceci peut représenter la vitesse moyenne entre deux arrêts d'autobus, tout comme la vitesse moyenne entre deux arrêts dans le trafic. Ainsi, une vitesse moyenne peu élevée (représentative d'un milieu urbain dense) indique que la distance parcourue entre deux arrêts est faible.

Puisque le cycle le plus exigeant pour un moteur à combustion interne, en termes de consommation de carburant, est le cycle d'accélération, il est normal qu'à basse vitesse moyenne, un moteur à combustion interne consomme plus qu'à vitesse moyenne élevée. De plus, une certaine quantité de carburant est consommée par le moteur à combustion interne lors des arrêts, puisqu'il continue à tourner au ralenti (ce temps est inclus dans le temps total).

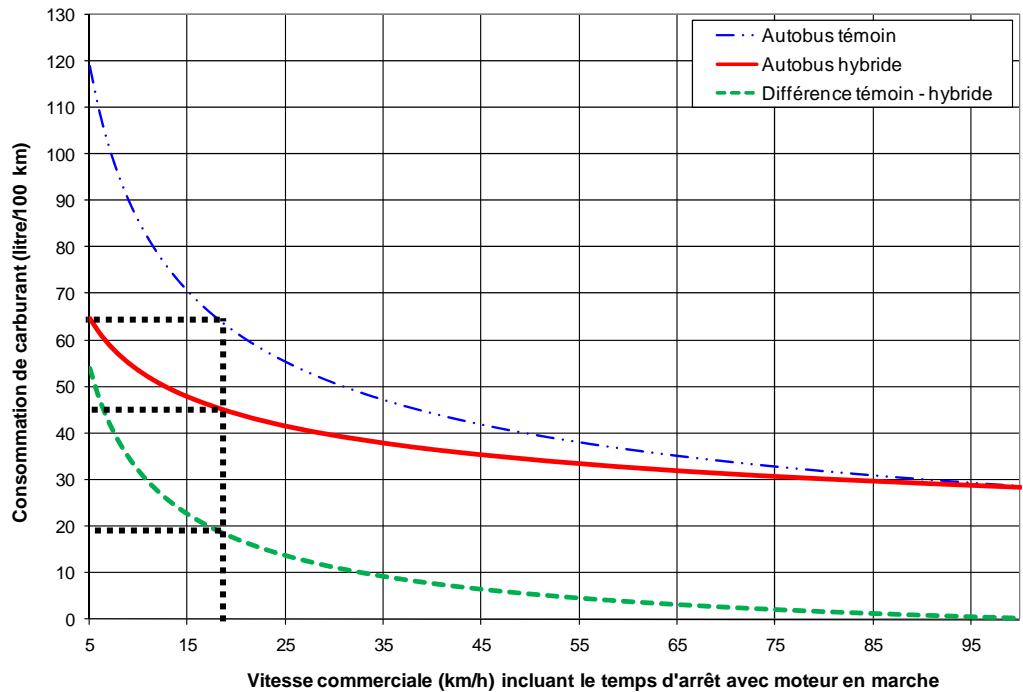
Les données recueillies quant aux nombres d'arrêts par kilomètre confirment que plus le nombre d'arrêts au kilomètre est élevé, plus la consommation de carburant est élevée. C'est d'ailleurs dans de telles conditions que la propulsion hybride trouve son avantage, puisque lors des nombreuses décélérations, elle récupère de l'énergie qui est ensuite utilisée lors des accélérations; il en résulte une demande moins importante sur le moteur à combustion interne qui consomme alors moins de carburant.

La Figure 3-5 illustre la consommation de carburant en fonction de la vitesse moyenne pour les autobus hybrides et témoins de la STM. On peut remarquer qu'à une vitesse de **18 km/h**<sup>9</sup>:

- La consommation de carburant est de 65 litres/100 km pour l'autobus témoin, alors qu'elle est de 45 litres/100 km pour l'autobus hybride ;
- La réduction de la consommation de carburant est substantielle : une réduction de 20 litres/100 km, soit **de 30 %** ;
- En contrepartie, lorsque la vitesse tend vers 100 km/h, les deux types d'autobus affichent une consommation très similaire. Cette situation représente les conditions de déplacement sur autoroute où les avantages de l'autobus hybride sont beaucoup moins significatifs qu'en milieu urbain.

Notons que la consommation de carburant inclut seulement le carburant utilisé par le moteur à combustion interne de propulsion. Elle fait exclusion de la consommation de carburant du système de chauffage d'appoint au diesel, laquelle est incluse à la Figure 3.6.

**Figure 3-5 Consommation de carburant des autobus en fonction de la vitesse moyenne – Autobus Nova Bus 2008 (la consommation du système de chauffage d'appoint est exclue)**



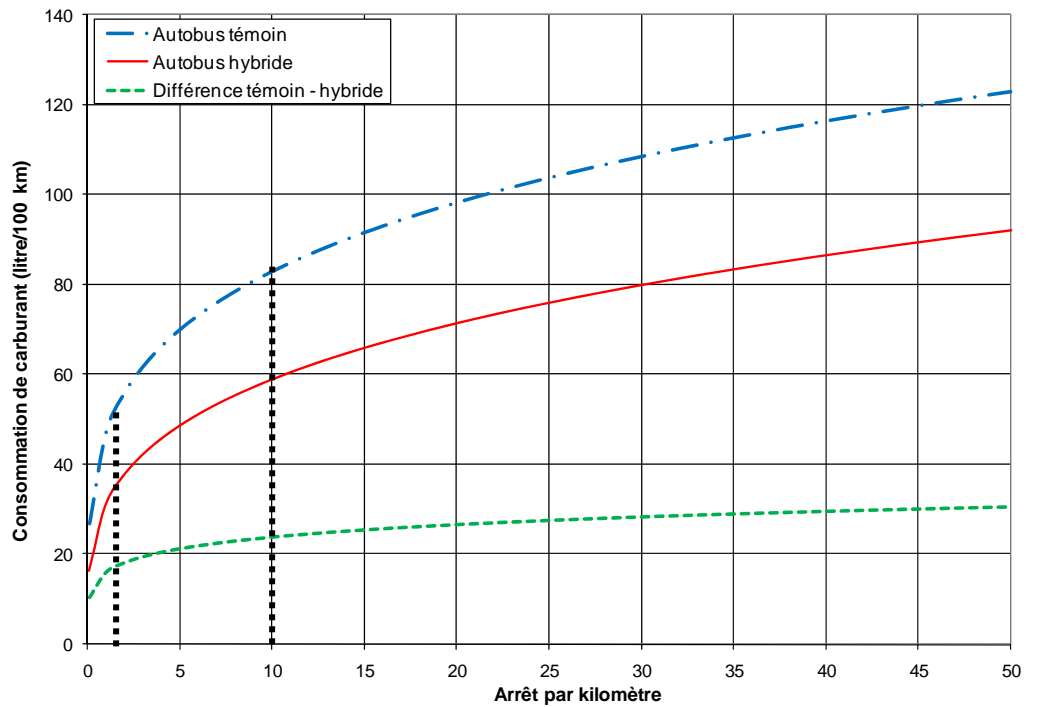
**Note :** Moyenne des résultats récoltés sur une année, avec une vitesse moyenne d'environ 18 km/h, une température minimale de -28,5 °C, une température maximale de 33,4 °C et une température moyenne de 6,6 °C ainsi que 34 % de temps pendant lequel le moteur a tourné au ralenti. Cette courbe s'applique pour des autobus sans air climatisé et avec transmission ZF sur les témoins.

<sup>9</sup> Vitesse moyenne des 14 autobus de la STM assignés au PDTU pendant l'année qu'à duré le projet. Il faut noter que les valeurs présentées sont des moyennes et non des valeurs absolues.

La Figure 3-6 montre la consommation de carburant en fonction du nombre d'arrêts par kilomètre pour les véhicules hybrides et standard de la STM. L'économie de carburant de l'autobus hybride par rapport à l'autobus témoin est très faible lorsqu'il n'y a aucun arrêt, mais augmente très rapidement lorsque le nombre d'arrêts augmente. Pour un nombre d'arrêts par kilomètre variant entre deux et dix, soit ce qui est généralement observé pour des circuits de transport collectif en milieu urbain, l'autobus hybride consomme aux alentours de 20 litres/100 km de moins que l'autobus témoin.

De manière générale, le service de passagers ne fait habituellement pas plus de dix arrêts par kilomètre pour les embarquements et débarquements de clients. Ce graphique indique tous les arrêts comptabilisés, même lorsque l'autobus se déplace seulement de quelques mètres à la fois, comme il le fait parfois en condition de congestion ou dans les voies de stationnement.

**Figure 3-6 Consommation de carburant en fonction du nombre d'arrêts par kilomètre – Autobus Nova 2008 (la consommation du système de chauffage d'appoint est exclue)**

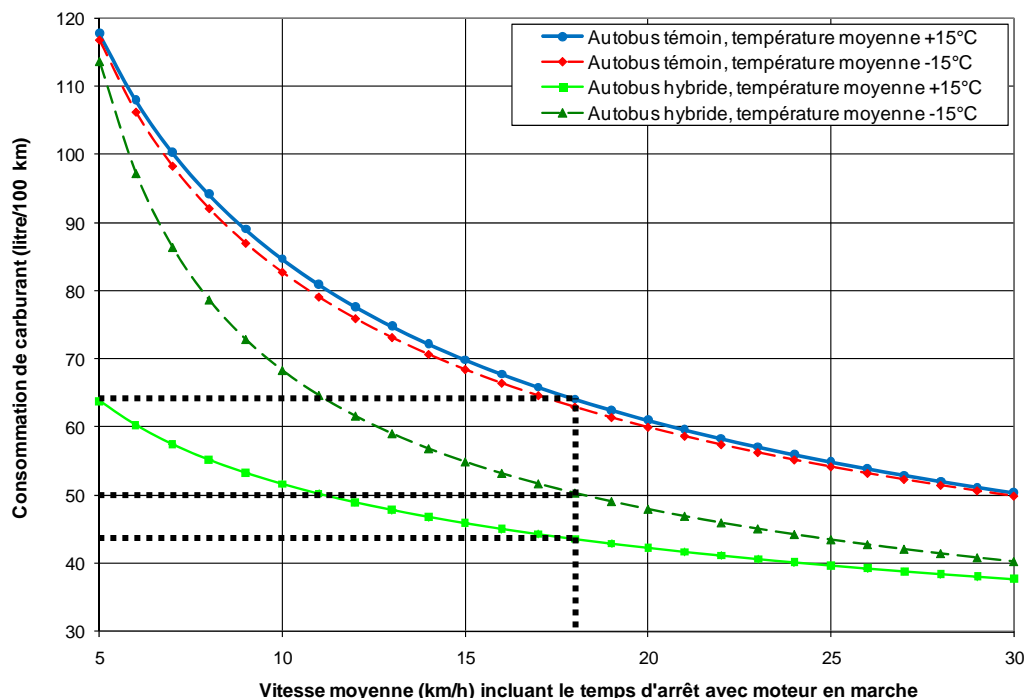


La Figure 3-7 présente la consommation de carburant en fonction de la vitesse moyenne à des températures de +15 °C et -15 °C pour les autobus hybrides et témoins de la STM.

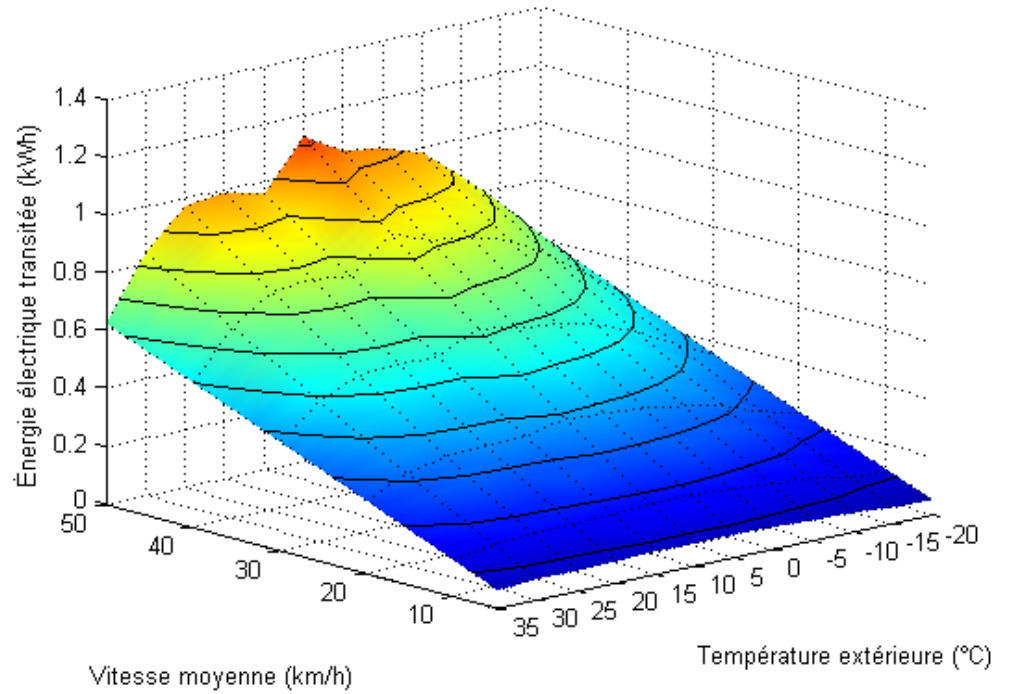
On peut observer que la variation de la consommation de carburant selon la température extérieure est plus importante pour l'autobus hybride que pour l'autobus témoin. Par exemple, à une vitesse de 18 km/h, l'autobus hybride consomme 43 litres/100 km à +15 °C alors qu'il consomme 50 litres/100 km à -15 °C, soit une augmentation de 7 litres/100 km. Dans le cas des autobus témoins, la consommation de carburant est pratiquement identique à ces deux températures, soit 64 litres/100 km.

Sur cette différence de 7 litres/100 km observée pour les autobus hybrides, la consommation du chauffage d'appoint à elle seule compte pour environ 3 litres/100 km. Cela s'explique par le fait que le moteur thermique de l'autobus hybride est beaucoup moins sollicité à basse vitesse que celui opéré dans un autobus standard, ce qui génère moins de chaleur et sollicite plus le chauffage d'appoint. De plus, l'efficacité des batteries de l'hybride est diminuée par les basses températures, ce qui fait en sorte qu'à -15 °C, le moteur thermique de l'hybride travaille plus qu'à +15 °C; il compense ainsi la baisse de performance du système hybride en température plus froide. Cet aspect explique le reste de l'augmentation totale de consommation. La Figure 3-8 montre la variation de l'énergie électrique fournie par le système hybride en fonction de la température extérieure. On y observe un apport hybride plus faible à basse température.

**Figure 3-7 Consommation de carburant de l'autobus et du chauffage d'appoint en fonction de la vitesse moyenne et de la température extérieure – Autobus sans air climatisé hybride et témoin Nova 2008**

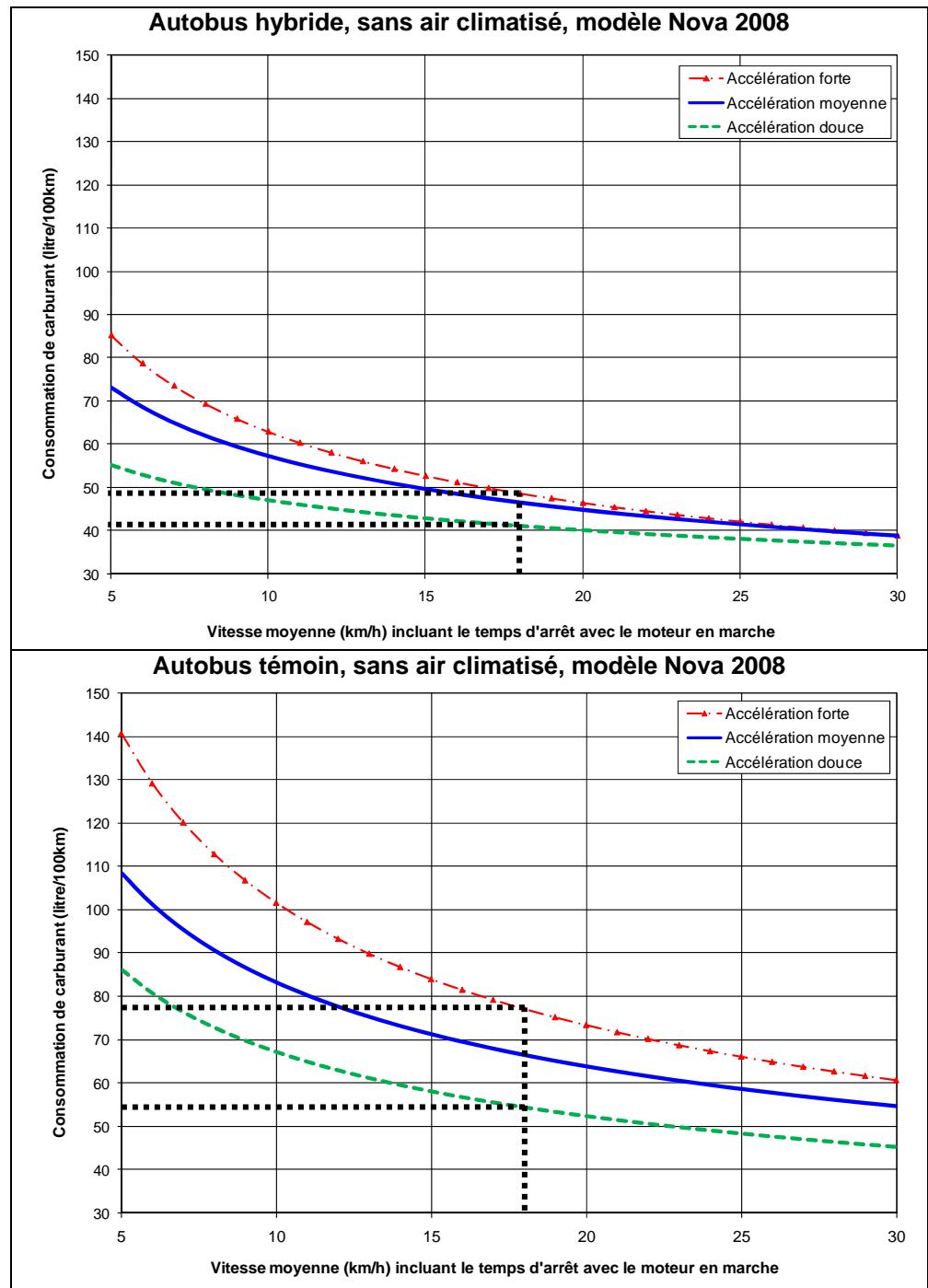


**Figure 3-8** Énergie électrique transitée par le système hybride en fonction de la température extérieure – Autobus hybride Nova 2008 (la consommation du système de chauffage d'appoint est exclue)



La Figure 3-9 illustre la consommation de carburant en fonction de la vitesse moyenne et du niveau moyen d'accélération pour les autobus hybrides et témoins de la STM. Ces courbes démontrent que le niveau d'accélération a un impact sur la consommation de carburant, et ce, pour les autobus hybrides et témoins. Une accélération agressive de la part du chauffeur génère une plus forte consommation de carburant.

**Figure 3-9 Consommation de carburant en fonction de la vitesse moyenne et du niveau moyen d'accélération – Autobus hybride et témoin (la consommation du système de chauffage d'appoint est exclue)**



Note : Moyenne des résultats récoltés sur une année, avec une vitesse moyenne d'environ 18 km/h

Par exemple, à une vitesse de 18 km/h, une accélération forte génère une consommation de carburant d'environ 18 % plus élevée qu'une accélération douce, dans le cas de l'autobus hybride. Cette variation est d'environ 42 % plus élevée dans le cas de l'autobus témoin. L'impact est beaucoup moins prononcé dans le cas des véhicules hybrides, car une grande partie de l'énergie requise pour l'accélération provient de l'énergie récupérée lors de la décélération précédente. De plus, la demande de puissance et la révolution du moteur diesel sont contrôlées par l'ordinateur du système hybride afin d'optimiser la consommation de carburant.

En résumé :

- Le niveau d'accélération a beaucoup moins d'influence sur la consommation de carburant de l'autobus hybride que sur celle du véhicule témoin;
- Lorsque le niveau d'accélération est grand, la réduction de consommation de l'autobus hybride par rapport au véhicule témoin est à son meilleur;
- Tous les autobus voient leur consommation réduite lorsque le niveau d'accélération est faible, ce qui réduit l'écart entre l'autobus hybride et l'autobus témoin, mais le véhicule hybride garde tout de même l'avantage.

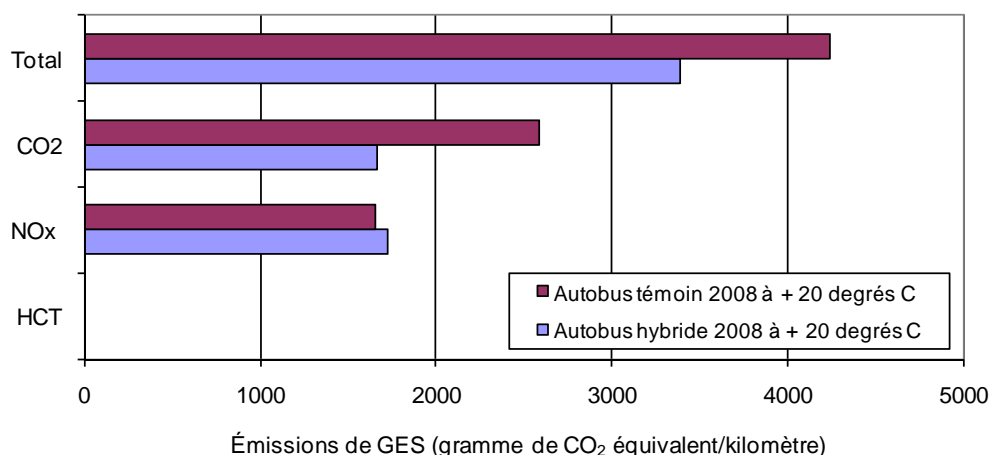
Plusieurs résultats d'analyse sont présentés à l'annexe D.

### 3.4 Bilan des GES

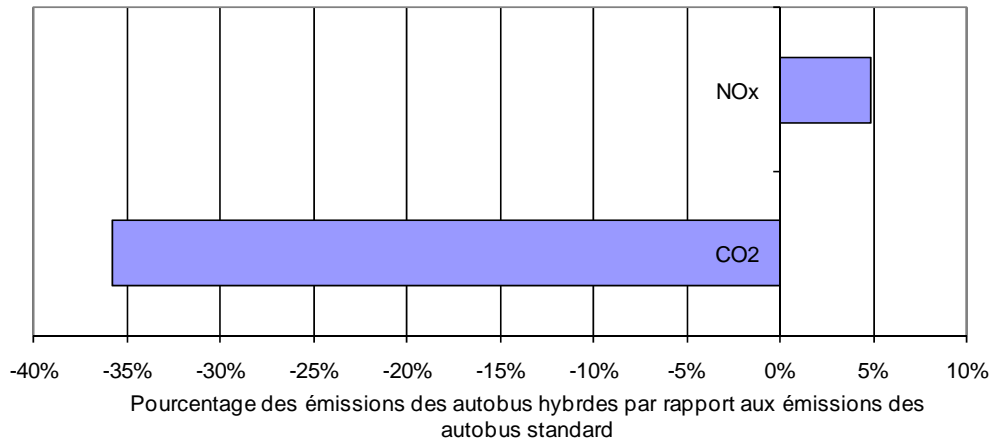
Les tests au laboratoire d'Environnement Canada ont permis de caractériser les émissions de GES des deux systèmes de propulsion comparés. La Figure 3-10 présente les valeurs en grammes par kilomètres des GES mesurés pour les systèmes de propulsion avec moteurs qui rencontrent les exigences de la norme EPA 2007, tandis que la Figure 3-11 présente les données en pourcentage. Ces résultats indiquent :

- Que les moteurs conformes à la norme EPA 2007 n'émettent pas de quantité significative de particules ni d'hydrocarbures totaux (HCT);
- Le système de propulsion hybride émet 5 % plus d'oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) que le système de propulsion standard et 36 % moins de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>).

**Figure 3-10 Émissions de GES des systèmes de propulsion hybrides et standard, conformes à la norme EPA 2007, obtenus au laboratoire d'Environnement Canada à + 20 °C (gramme/kilomètre)**



**Figure 3-11 Comparaison des émissions de GES des autobus hybrides par rapport aux autobus standard, conformes à la norme EPA 2007, obtenus au laboratoire d'Environnement Canada à + 20 °C**



Les résultats des essais effectués au laboratoire d'Environnement Canada ont été obtenus en conditions idéales et contrôlées; ils ne sont pas directement comparables aux résultats obtenus en service clientèle. D'ailleurs, l'écart entre les résultats de consommation de carburant le démontre. (Voir Figures 3-1 et 3-4)

Dans un but d'uniformité avec d'autres études à ce sujet, le facteur de conversion normalement accepté de 2,7 kg de GES par litre de diesel est utilisé. Cette méthode de calcul implique que les quantités de GES émises lors de la consommation de diesel sont directement proportionnelles à la quantité consommée.

**2,7 kg de GES par litre de diesel consommé par les autobus de la STM**

L'analyse des résultats obtenus en service clientèle a permis de constater que la relation entre la consommation de carburant et la vitesse moyenne, pour les véhicules hybrides et standard, pouvait être représentée mathématiquement. Ainsi, lorsque la vitesse moyenne est connue, il est possible de calculer la consommation de carburant théorique et conséquemment les émissions de GES correspondantes.

Un gestionnaire de parc d'autobus qui souhaiterait avoir une idée du potentiel de réduction des GES que pourrait lui permettre la propulsion hybride, peut l'obtenir en utilisant la formule suivante. Seule la connaissance de la vitesse moyenne est requise pour l'utiliser. Le résultat est exprimé en termes de kilogrammes de GES évités par 100 kilomètres parcourus. Il faut noter que cette équation a été formulée à partir de données obtenues à une moyenne de température ambiante de 6,6 °C<sup>10</sup>.

$$GES = ((255,331 \times V^{-0,4753}) - (101,031 \times V^{-0,2761})) \times 2,7$$

Où : GES = Réduction de GES en kg/100 km  
 V = Vitesse moyenne en km/h

<sup>10</sup> Autobus Nova sans air climatisé et transmission ZF sur l'autobus standard

Pour les autobus de la STM dont la vitesse moyenne est de **18 km/h**, l'économie de carburant de l'autobus hybride est d'environ **20 litres/100 km**. Avec une hypothèse de 70 000 km parcourus annuellement par autobus, on obtient une réduction de **36 tonnes de GES par autobus hybride annuellement**.

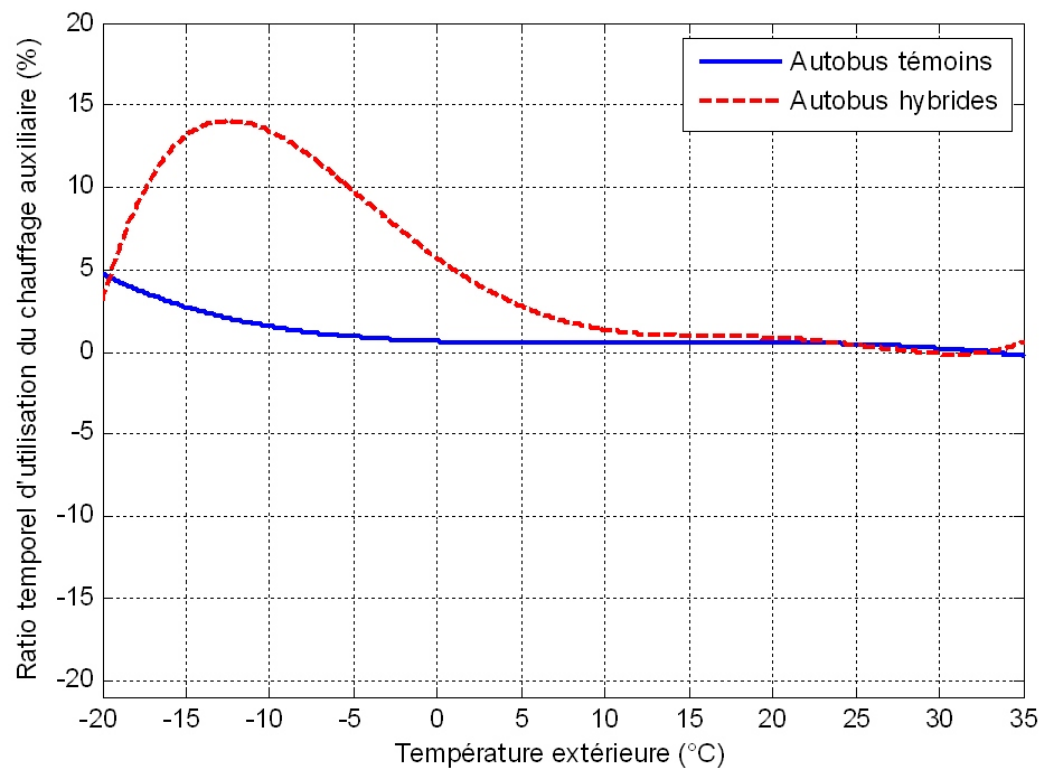
### 3.5 Cycle de vie

En plus de la différence du coût d'achat entre un autobus hybride et un autobus standard, les coûts d'entretien et d'opération diffèrent également pour ces deux types de véhicules. Les principales différences sont expliquées ci-après, alors que le détail du cycle de vie est fourni à l'annexe F.

- Les coûts **d'entretien du moteur à combustion interne** devraient être moins élevés pour l'autobus hybride que pour l'autobus standard, puisqu'il est beaucoup moins sollicité en configuration hybride.
- Les coûts **d'entretien des freins** des autobus standard STM et STO devraient être très similaires aux coûts d'entretien des autobus hybride, contrairement à ce que plusieurs exploitants d'autobus hybrides ont noté après avoir mis de tels autobus en service. Ceci s'explique par le mode de fonctionnement du ralentisseur de la transmission des autobus standard dont sont équipés les autobus de la STM et de la STO.
  - Les autobus standard disposent d'un système mécanique interne de ralentisseur dans la transmission. Ils sont configurés pour utiliser ce ralentisseur dès le relâchement de l'accélérateur. Ainsi, les freins sont peu sollicités.
  - Les autobus hybrides sont configurés pour faire ralentir fortement l'autobus dès le relâchement de l'accélérateur afin de récupérer un maximum d'énergie cinétique. La conception du système hybride permet aux moteurs électriques intégrés à la transmission de se transformer en génératrices dès que l'accélérateur est relâché. Ce faisant, ces moteurs créent une force de ralentissement sur les roues motrices. Cette force ralentit l'autobus.
- Coût d'utilisation du **système de chauffage d'appoint**. Une différence notable a été observée concernant l'opération des autobus hybrides et témoins : le taux d'utilisation du chauffage d'appoint est plus élevé entre 0 °C et -15 °C pour les autobus hybrides que les autobus témoins.

La Figure 3-12 illustre le ratio du temps en service pour lequel le chauffage d'appoint au diesel est en utilisation sur les autobus de la STM, en fonction de la température extérieure. On remarque que pour l'autobus témoin, la courbe augmente graduellement à partir d'environ -10 °C alors que l'augmentation commence à partir de +10 °C pour l'autobus hybride. Ce comportement est causé par le fait que le moteur à combustion interne, lorsqu'il est utilisé dans un système de propulsion hybride, est beaucoup moins sollicité que lorsqu'il est utilisé dans une configuration de propulsion standard ; ainsi, dès que la température externe descend sous les -10<sup>0</sup> C, il ne génère pas suffisamment de chaleur pour réchauffer l'habitacle des passagers. Il faut noter que le système de propulsion hybride est calibré afin d'assurer que le moteur à combustion interne fonctionne aux régimes les plus efficaces possible ; son fonctionnement est contrôlé par l'ordinateur de contrôle du système hybride.

**Figure 3-12 Utilisation du chauffage auxiliaire en fonction de la température extérieure - Autobus Nova 2008**



### 3.6 Satisfaction des chauffeurs et des clients

La satisfaction de la clientèle est un facteur important qui peut favoriser l'utilisation du transport collectif. Dans ce cas-ci, la réduction sonore et la douceur de roulement des autobus hybrides sont deux aspects qui peuvent favoriser le transfert modal de l'automobile vers les transports en commun, résultant en une réduction importante des GES. Les principaux résultats des sondages effectués auprès de la clientèle des autobus hybrides de la STM ainsi qu'auprès des employés de la STM sont présentés ci-après alors que les résultats détaillés sont donnés à l'annexe G.

Les réactions des chauffeurs de la STM face à la technologie hybride sont positives. La presque totalité (94 %) des chauffeurs interrogés croit que les autobus hybrides contribuent à protéger l'environnement. Ils se sentent à l'aise de les conduire (92 % des cas) et ils sont

86 % à souhaiter qu'il y en ait plus dans le parc de la STM. L'avantage le plus apprécié des chauffeurs est la réduction du niveau de bruit, suivie de la douceur de roulement. Ces résultats sont indiqués au Tableau 3-1.

**Tableau 3-1 Résultats du sondage auprès des chauffeurs de la STM**

Question	% d'accord	Détail des réponses
<b>Les autobus hybrides contribuent à protéger l'environnement</b>	94 %	Tout à fait d'accord 73 % Plutôt en accord 21 %
<b>Se sentent à l'aise de conduire un autobus hybride</b>	92 %	Tout à fait d'accord 71 % Plutôt en accord 21 %
<b>Souhaitent qu'il y ait plus d'autobus hybrides dans le parc de la STM</b>	86 %	Excellent 67 % Bien 19 %

Parmi les clients interrogés, la très grande majorité (94 %) croit que les autobus hybrides contribuent à protéger l'environnement et la plupart d'entre eux (88 %) souhaitent qu'il y en ait plus dans le parc d'autobus de la STM. Parmi ceux qui sont montés à bord d'un autobus hybride, 63 % les trouvent plus silencieux que les autobus standard et 54 % trouvent qu'ils roulent plus en douceur. Ces résultats sont indiqués au Tableau 3-2.

**Tableau 3-2 Résultats du sondage auprès de la clientèle de la STM**

	Question	% d'accord	Détail des réponses
Parmi ceux qui ont entendu parler des autobus hybrides	<b>Contribuent à protéger l'environnement</b>	94 %	Tout à fait d'accord 78 % Plutôt d'accord 16 % Ne sait pas 6 %
	<b>Apprécient que la STM en ait fait l'acquisition</b>	90 %	Tout à fait d'accord 81 % Plutôt d'accord 9 % Plutôt en désaccord 1 % Tout à fait en désaccord 2 % Ne sait pas 6 %
	<b>Souhaitent qu'il y en ait plus dans le parc d'autobus de la STM</b>	88 %	Tout à fait d'accord 79 % Plutôt d'accord 9 % Plutôt en désaccord 2 % Tout à fait en désaccord 3 % Ne sait pas 6 %
Parmi ceux qui sont montés à bord d'un autobus hybride de la STM	<b>Sont plus silencieux que les autobus standard</b>	63 %	Tout à fait d'accord 56 % Plutôt d'accord 7 % Plutôt en désaccord 7 % Tout à fait en désaccord 0 % Ne sait pas 29 %
	<b>Roulent plus en douceur que les autobus standard</b>	54 %	Tout à fait d'accord 44 % Plutôt d'accord 10 % Plutôt en désaccord 5 % Tout à fait en désaccord 0 % Ne sait pas 41 %

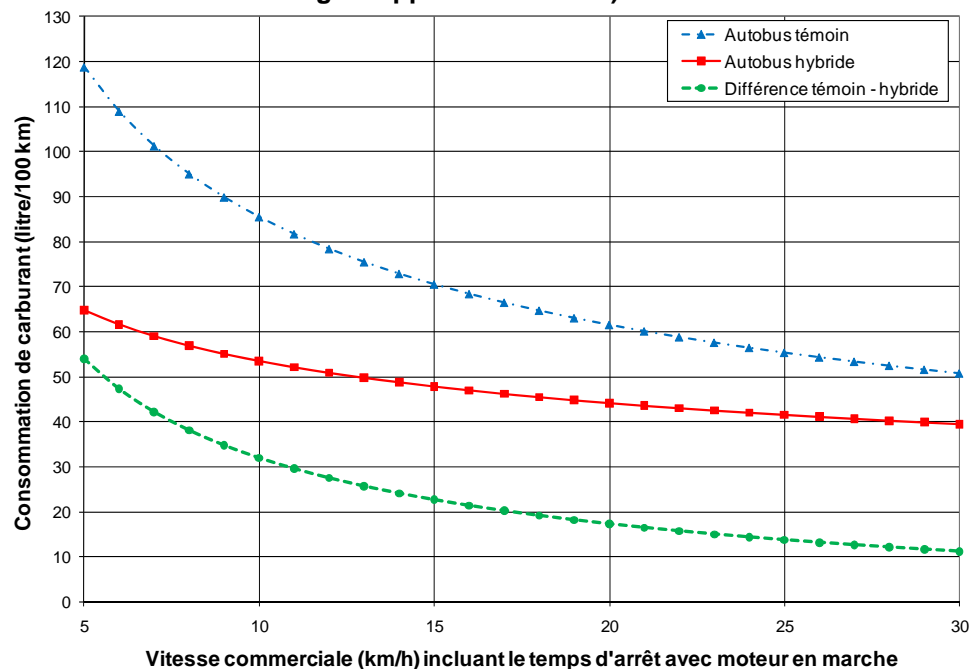
## 4 Outil décisionnel

Un gestionnaire de société de transport collectif qui souhaite réduire les émissions de GES produites par les véhicules de son parc d'autobus peut, à l'aide des graphiques présentés dans cette section, estimer le potentiel que lui offrirait la propulsion hybride. Pour ce faire il n'a besoin de connaître que la vitesse moyenne et la consommation totale moyenne des autobus de son parc.

Les graphiques qui suivent représentent des moyennes de résultats opérationnels, colligés tout au long de l'année qu'a duré l'étude. Au cours de cette année, la température extérieure a varié de -28 °C à +33 °C; la température moyenne a été de 6,6 °C. Les autobus ont maintenu une vitesse moyenne de 18 km/h, ils ont effectué une moyenne de 3,8 arrêt/km et leur moteur a fonctionné au ralenti<sup>11</sup> pendant 34 % du temps.

La Figure 4-1 présente la consommation de carburant pour les véhicules hybrides et témoins de type Nova 2008 en fonction de la vitesse moyenne. Dans un milieu fortement congestionné, soit pour une vitesse moyenne de 10 km/h, l'autobus hybride consomme environ 32 litres/100 km de moins que l'autobus standard. À une vitesse moyenne de 30 km/h, soit la vitesse moyenne dans des villes moyennement denses ou dans des banlieues, l'autobus hybride consomme environ 11 litres/100 km de moins que l'autobus standard.

**Figure 4-1** Consommation de carburant en fonction de la vitesse moyenne pour des vitesses variant de 5 à 30 km/h – Autobus hybride et témoin modèle NOVA 2008, sans climatisation (la consommation du système de chauffage d'appoint est exclue)

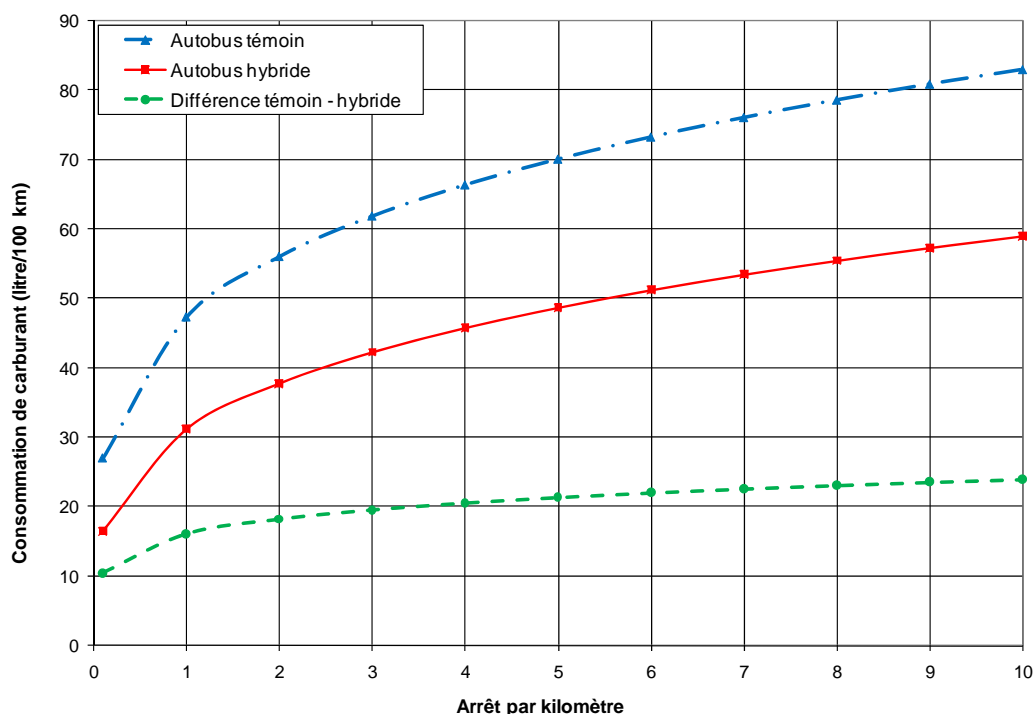


**Note :** Moyenne des résultats récoltés sur une année, avec une vitesse moyenne d'environ 18 km/h, une température minimale de -28,5 °C, une température maximale de 33,4 °C et une température moyenne de 6,6 °C ainsi que 34 % de temps de fonctionnement au ralenti. Cette courbe s'applique pour des autobus sans air climatisé et avec transmission ZF sur les témoins et Allison Electric Drive EP-40 sur les hybrides.

<sup>11</sup> Le temps au ralenti s'est produit principalement lorsque les autobus étaient immobilisés à un arrêt d'autobus pour le débarquement et l'embarquement des passagers, ou immobilisés dans le trafic.

La Figure 4-2 présente la consommation de carburant pour les véhicules hybrides et témoins de type Nova 2008 en fonction du nombre d'arrêts par kilomètre.<sup>12</sup> Lorsque les autobus effectuent un arrêt par kilomètre, le véhicule hybride consomme en moyenne 16 litres de moins par 100 km que le véhicule standard. Les bienfaits de l'autobus hybride s'accroissent à mesure que le nombre d'arrêts par kilomètre augmente. À dix arrêts par kilomètre, le véhicule hybride consomme en moyenne 24 litres/100 km de moins que le véhicule standard.

**Figure 4-2 Consommation de carburant en fonction du nombre d'arrêts par kilomètre pour un nombre d'arrêts variant de 0 à 10 – Autobus hybride et témoin modèle NOVA 2008, sans climatisation (la consommation du système de chauffage d'appoint est exclue)**



Il a été démontré dans le chapitre précédent que le système de propulsion hybride est moins performant à très basse température; les résultats obtenus dans un climat plus tempéré ne peuvent être que plus bénéfiques. Finalement, ces résultats reposent sur la technologie hybride en vigueur au moment de l'étude. Le perfectionnement de la technologie hybride fera en sorte qu'elle sera vraisemblablement plus performante dans les années à venir.

Un exploitant de transport collectif peut valider la pertinence de ces courbes par rapport à ses propres opérations. Il peut obtenir avec précision la consommation de carburant de ses moteurs diesel, temps de marche, en se branchant sur les ports de données de l'ordinateur de contrôle des moteurs. Une fois la vitesse moyenne et la consommation moyenne calculées, il peut transposer ces données sur la courbe « consommation témoin » afin de valider l'applicabilité de la courbe à ses opérations.

<sup>12</sup> Le terme «arrêt» inclut non seulement les arrêts lorsque l'autobus s'immobilise pour faire débarquer ou embarquer les clients, mais aussi lorsqu'il s'immobilise dans le trafic.

La vitesse moyenne « V » résultante des conditions opérationnelles d'autobus est déterminée à l'aide des informations enregistrées dans l'ordinateur ECM du moteur Cummins des autobus avec moteur ISL de la norme EPA 2007 et transmission ZF. Les informations qu'il faut noter sont :

- Le nombre total de kilomètres parcourus;
- Le nombre total d'heures en marche du moteur;
- Le nombre total de litres consommés.

On peut ainsi calculer la vitesse moyenne, V en km/h, selon l'équation suivante :

$$V = \frac{\text{nombre total de kilomètres parcourus}}{\text{nombre total d'heures en marche}}$$

La consommation totale moyenne, en litre/100 km, est obtenue selon l'équation suivante :

$$\text{Consommation totale moyenne} = \frac{\text{nombre total de litres consommés}}{\text{nombre total de kilomètres parcourus}/100}$$

Une représentation algébrique a été élaborée pour estimer l'économie de carburant de l'autobus hybride par rapport à l'autobus standard en fonction de la vitesse moyenne pour une température moyenne de 6,6 °C.

Cette équation est la suivante :

$$EC = (255,331 \times V^{-0,4753}) - (101,031 \times V^{-0,2761})$$

Où : EC = Économie de carburant en litre/100 km  
V = vitesse moyenne en km/h

Il est ainsi possible de calculer l'économie possible de carburant d'un autobus hybride par rapport à un autobus diesel standard. En connaissant la distance annuelle parcourue par les autobus, il est possible de transposer cette économie de carburant en réduction annuelle de GES par l'équation suivante :

$$RG = \frac{F_{GES} \times EC \times DA}{100\ 000}$$

Où RG = Réduction de GES en tonnes par année  
F<sub>GES</sub> = Facteur d'émission de GES en kg par litre de carburant  
= 2,7 kg/litre pour les autobus diesel  
EC = Économie de carburant en litre/100 km  
DA = Distance moyenne annuelle de l'autobus en kilomètre

## 5 Au-delà de la technologie hybride

Bien que l'objectif premier du volet STM du PDTU fût d'évaluer l'impact environnemental de la propulsion hybride, ce projet a créé des opportunités permettant d'aller un peu plus loin. L'instrumentation des autobus hybrides et témoins avec le système d'acquisition de données ISAAC a permis d'évaluer et de quantifier les impacts environnementaux de deux autres solutions technologiques qui sont fréquemment mentionnées dans la documentation de l'industrie :

- L'utilisation d'une ventilation entièrement à moteur électrique à bas voltage (24 volts) plutôt qu'une ventilation à moteur hydraulique pour refroidir le moteur;
- L'optimisation de la programmation des transmissions standard selon les conditions spécifiques des utilisateurs d'autobus en transport urbain. Le logiciel de programmation se nomme « Topodyn ».

La documentation relative à la propulsion des véhicules routiers prône les potentiels de ces technologies à réduire la consommation de carburant et, par le fait même, à réduire les émissions de GES.

### 5.1 Ventilation électrique à bas voltage

La plupart des autobus urbains à plancher surbaissé disposent d'un système de ventilation du radiateur qui est mû par un moteur hydraulique, lequel reçoit sa puissance d'une pompe hydraulique entraînée par le moteur diesel. Les principaux inconvénients de tels systèmes sont :

- Efficacité énergétique relativement basse : la mise en mouvement du fluide hydraulique sous pression subit une perte de chaleur significative et donc une perte de rendement;
- Contrôle de la puissance difficile à optimiser : plusieurs zones du système ont des besoins différents en refroidissement. Un ventilateur unique couvre toutes les zones à la fois; il y a ainsi de la puissance gaspillée à refroidir par moment une partie du système qui n'en a pas besoin.

Ces deux aspects peuvent facilement être améliorés par la mise en place d'un système de ventilation électrique composé de plusieurs petits ventilateurs qui couvrent les zones séparément. Ce système améliore l'efficacité énergétique puisqu'il y a moins de perte de chaleur dans le transfert électrique, entre le moteur diesel et les ventilateurs, au moyen d'un alternateur 24 volts à haut rendement. Il est important de noter que cette modification peut être faite sur les autobus hybrides et les autobus standard.



Le système de ventilateurs électriques à bas voltage est installé sur le côté extérieur du radiateur des autobus de la STM, montré ici avec sa grille extérieure ouverte. Vu le manque d'espace près du radiateur du moteur et le temps limité pour réaliser cet essai, une section de refroidissement supplémentaire pour l'huile de la transmission hybride a été ajoutée sur le toit. Celle-ci, est faite en aluminium non peinte. Dans une version optimisée, la configuration de ce refroidisseur d'huile serait mieux intégrée à la carrosserie.

## 5.2 Programmation optimisée de la transmission standard (logiciel Topodyn)

La modification de la programmation de la transmission standard n'entraîne pas de modifications physiques sur les autobus, car elle se fait au moyen de l'ordinateur de contrôle de la compagnie ZF. Deux jours d'essais sur la route avec un autobus de la STM ont été requis pour calibrer et optimiser la programmation. Par la suite, la programmation optimisée a été mise en place sur des autobus en service. Elle s'effectue simplement en remplaçant le module électronique d'origine par un module reprogrammé. Seuls les autobus diesel témoins sont équipés de transmission standard.

Les effets de la programmation Topodyn sont les suivants :

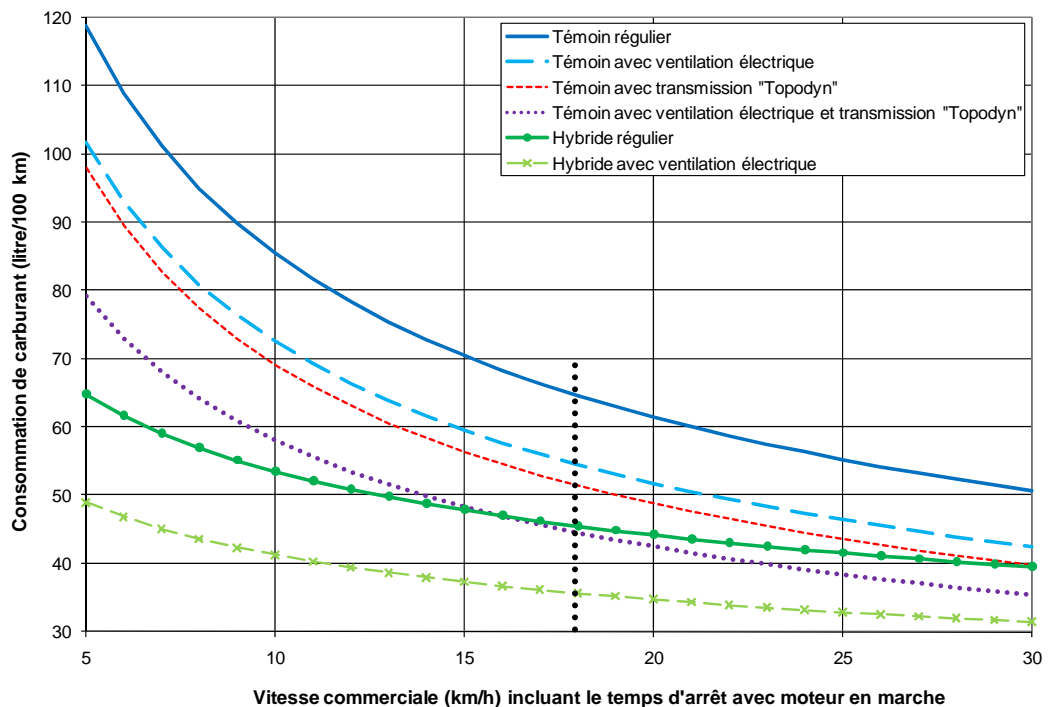
- Elle crée des conditions similaires aux conditions inhérentes à la conduite écolo. Somme toute, elle assure une accélération en douceur :
  - Elle tempère l'accélération demandée lorsque la vitesse de l'autobus est sous les 40 km/h;
  - Elle maintient le niveau d'accélération quand l'autobus est dans une pente ou qu'il est chargé.
- Elle optimise les conditions de consommation de carburant en réduisant la vitesse de rotation du moteur au moment de changer de vitesse. Ceci augmente le couple produit, et cause une augmentation de la température et de la pression de combustion qui se traduit par une réduction de la consommation pour une même puissance produite.

## 5.3 Impact sur la consommation en carburant et la réduction des GES

La Figure 5-1 présente, pour des vitesses variant de 5 à 30 km/h, la consommation de carburant en fonction de la technologie testée, et ce, sur des autobus hybrides et témoins de la STM. À une vitesse moyenne d'environ 18 km/h incluant les arrêts, on peut constater les points suivants :

- L'installation d'une ventilation électrique a permis de réduire la consommation de carburant d'environ 16 % (de 65 à 54 litres/100 km) sur un autobus standard et de 22 % (de 46 à 36 litres/100 km) sur un autobus hybride;
- La programmation de la transmission ZF (Topodyn) a permis de réduire la consommation de carburant d'environ 21 % (de 65 à 51 litres/100 km) sur un autobus standard;
- L'effet combiné de l'installation d'une ventilation électrique et de la programmation Topodyn a permis de réduire la consommation de carburant de 31 % (de 65 à 45 litres/100 km) sur un autobus standard.
- L'autobus hybride équipé de la ventilation électrique maintient une réduction de consommation de carburant d'environ 20 % (de 45 à 36 litres/100 km) par rapport au témoin qui combine la ventilation électrique et la programmation de la transmission. Notons que sans ces modifications, l'autobus hybride affiche une économie de carburant de 30 % (de 65 à 46 km/h) par rapport au témoin.

**Figure 5-1 Effet de la ventilation électrique et de la programmation de la transmission (Topodyn) sur la consommation de carburant (la consommation du système de chauffage d'appoint est exclue)**



Note : La vitesse moyenne de la STM est d'environ 18 km/h

La comparaison de consommation de carburant pour les divers scénarios est montrée au Tableau 5-1 pour une vitesse de 18 km/h. Plus d'information concernant l'analyse de ces deux technologies est donnée à l'annexe H.

**Tableau 5-1 Consommation de carburant (en litre/100 km) pour les divers scénarios et comparaison des réductions de consommation de carburant - Pour une vitesse moyenne de 18 km/h**

	Unité	Témoin régulier	Témoin avec ventilation électrique	Témoin avec transmission « Topodyn »	Hybride régulier	Témoin avec ventilation électrique et transmission « Topodyn »	Hybride avec ventilation électrique
<b>Consommation moyenne</b>	<b>Litre par 100 km</b>	<b>64,6</b>	<b>54,4</b>	<b>51,4</b>	<b>45,5</b>	<b>44,5</b>	<b>35,6</b>
<b>Réduction par rapport à</b>							
<b>Témoin régulier</b>	litre		10,2	13,3	19,1	20,1	29,0
	%		16 %	21 %	30 %	31 %	45 %
<b>Témoin avec ventilation électrique</b>	litre			3,1	8,9	9,9	18,8
	%			6 %	16 %	18 %	35 %
<b>Témoin avec transmission « Topodyn »</b>	litre				5,9	6,9	15,8
	%				11 %	13 %	31 %
<b>Hybride régulier</b>	litre					1,0	9,9
	%					2 %	22 %
<b>Témoin avec ventilation électrique et transmission « Topodyn »</b>	litre						8,9
	%						20 %

## 6 Synthèse et recommandations

### 6.1 Synthèse

L'objectif principal de cette étude consistait à mesurer l'impact environnemental des autobus à propulsion hybride en les comparant à des autobus diesel standard. Les résultats d'analyse, sur une période d'un an, ont permis de dresser un portrait détaillé et concluant sur les bienfaits environnementaux de la technologie hybride.

La technologie hybride (Nova 2008) a permis de réduire la consommation de carburant en moyenne de **30 %** par rapport à la propulsion standard. La vitesse moyenne des autobus suivis dans le cadre du projet a été d'environ **18 km/h**, tandis que le nombre d'arrêts moyen a été de 3,8 par kilomètre. La moyenne des températures pendant l'année qu'a duré le projet a été de 6,6°C (de -28,5 °C à +33,4 °C).

Le pourcentage de réduction de la consommation de carburant obtenu avec les autobus hybrides se traduit en une **réduction des émissions des GES de près de 36 tonnes annuellement** pour un autobus qui parcourt environ 70 000 km par an. Ceci représente 7 voitures particulières de moins sur la route, en supposant une production moyenne de 5 tonnes de GES par année et une distance parcourue de 20 000 km/an.

Plus spécifiquement, notons que :

- Les moteurs conformes à la norme EPA 2007 n'émettent pas de quantité significative de particules ni d'hydrocarbures totaux (HCT);
- Le système de propulsion hybride émet 5 % plus d'oxyde d'azote (NO<sub>x</sub>) que le système de propulsion standard et 36 % moins de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>).

Les analyses des résultats ont montré que la technologie hybride est particulièrement avantageuse lorsque la vitesse d'opération moyenne est relativement basse et que la distance entre les arrêts demeure courte. Les principaux résultats obtenus après un an d'essai en service clientèle, selon les conditions en vigueur à la STM sont les suivants :

- L'autobus hybride consomme environ 20 litres/100 km de moins que l'autobus témoin lorsque le nombre d'arrêts par kilomètre varie entre deux et dix;
- Par temps froid, la consommation de carburant de l'autobus hybride est plus grande. À 18 km/h, la consommation de carburant de l'autobus hybride augmente de 16 % lorsque la température extérieure passe de +15 °C à -15 °C. Cette variation est de 2 % pour l'autobus témoin;
- Le niveau d'accélération a un impact plus prononcé sur la consommation de carburant de l'autobus témoin. À 18 km/h, une accélération agressive génère une consommation de carburant 42 % plus élevée qu'une accélération douce dans le cas de l'autobus témoin. Cette variation est de 18 % dans le cas de l'autobus hybride.

**Les outils d'analyse** développés au cours de cette étude permettent à tout gestionnaire d'une société de transport d'évaluer les bienfaits escomptés de la technologie hybride à partir de facteurs facilement mesurables tels que la vitesse totale moyenne et la consommation de carburant totale. De plus, les données recueillies permettent d'établir les circonstances dans lesquelles la technologie hybride est optimale, entre autres, en termes de température extérieure ou de niveau d'accélération.

Sans égard au prix de revient, la technologie hybride électrique alliée à un moteur thermique optimisé demeure pour le moment **le moyen le plus performant** pour réduire la

consommation de carburant et conséquemment les émissions de GES pour les sociétés de transport où la vitesse moyenne et la distance entre les arrêts sont faibles. Par ailleurs, l'analyse des coûts du cycle de vie et l'évaluation des coûts d'implantation doivent être complétées afin de quantifier tous les impacts financiers à encourir si la propulsion hybride était intégrée au parc d'autobus. Finalement, il faut aussi tenir compte des attentes de la clientèle et de l'impact que l'introduction d'une telle technologie peut avoir sur l'image de la société de transport. Un impact positif pourrait engendrer une augmentation de l'achalandage et un transfert modal au bénéfice du transport en commun.

Notons que par le biais de cette étude, **d'autres technologies** ont pu être testées et se sont montrées prometteuses. Le remplacement du système de ventilation hydraulique par un système électrique à bas voltage permet de réduire les émissions de GES tant pour les autobus hybrides que les autobus standard, et ce, à un coût d'implantation avantageux. L'optimisation de la programmation des transmissions standard permet de réduire les émissions de GES des autobus réguliers tout en nécessitant un investissement minimal.

## 6.2 Recommandations

Les exploitants et gestionnaires de parcs d'autobus urbains qui envisagent de s'équiper de véhicules hybrides peuvent se référer à l'outil décisionnel développé dans cette étude et présenté dans ce document. Il permet de faire un choix éclairé quant aux économies potentielles de carburant et de réductions de GES, et ce, à partir de données facilement mesurables.

Par ailleurs, la réduction des émissions de GES n'est pas l'affaire d'une seule solution. Les courbes présentées dans ce rapport illustrent que l'efficacité des différentes technologies étudiées varient en fonction des conditions opérationnelles et climatiques. De plus, les résultats recueillis indiquent que le facteur humain peut jouer un rôle significatif sur la consommation de carburant. Ainsi, il est recommandé qu'un exploitant qui souhaite réduire sa consommation de carburant et par le fait même ses émissions de GES, se dote d'une stratégie multidisciplinaire et technologiquement variée.

## Documentation de référence

070216 AED, Student workbook, Allison Transmission, Février 2007

N8884393-L350, Manuel de pièces, Nova Bus, Mars 2009

SRME No 08-34, Environnement Canada, Mars 2009