

# Rapport technique Technologie hybride

Mars 2009



# **Rapport technique – Technologie hybride**

## Remerciements

L'équipe de réalisation tient à remercier l'ensemble des acteurs et des partenaires du projet, dont les partenaires financiers, soit Transports Canada, instigateur et subventionnant 33 % du financement du programme, ainsi que le ministère des Transports du Québec; et les acteurs principaux, soit les équipes de travail de la Société de transport de l'Outaouais et de la Société de transport de Montréal. Un remerciement à l'ensemble des équipes de l'exploitation, de l'entretien, de l'informatique, des communications, des ressources humaines pour leur collaboration et leur support dans le cadre de ce projet.

### Société de transport de Montréal

#### **Comité de pilotage**

- Renée Amilcar
- Pierre Bourbonnière
- François Chamberland
- Carl Desrosiers
- Jacques Durocher
- Benoit Gendron
- Serge Jolin
- Pierre Lemay
- Serge Migneault
- André Poisson
- Pierre Rocray
- Claude Savage
- Luc Y. Tremblay
- Denise Vaillancourt
- Liette Vinet

#### **Comité de travail**

- Véronique Angers
- Cynthia Arruda
- Alain Bédard
- Nathalie Boisvert
- René Boucher
- Marie-Claude Chartrand
- Normand Couture
- Guylaine Di Tomaso
- Manuel Dubuc
- Jacques Durocher
- Nathalie Garneau
- Richard Landry
- Chan Ly
- Pascal Oceau
- Maud Ouellet
- André Pagé
- Nathalie Pomerleau
- Sylvain St-Denis
- Isabelle St-Louis
- Jean-Claude Théroux

- Isabelle Tremblay
- Luc Y. Tremblay
- Carole Vaillancourt
- André Veilleux

#### **Soutien Technique**

- Hugues Allard
- Joseph Armand
- Sébastien Bellefeuille
- Samuel Bertrand
- François Bolduc
- Pierre Corbeil
- Martin Dragon
- Miville Dupuis
- Geneviève Froment
- Clarence Gagnon
- Joscelyn Gingras
- Sylvain Hardy
- Steve Héту
- Alexandre Leduc
- René Leduc
- Raynald Marcotte
- Pierre Martin
- Luc Michaud
- Jean-François Morin-Verville
- Daniel Myre
- Hisham Nour
- Pascal Ouellette
- Jacques Poirier
- Georges Poutedfé
- Prosper Tremblay

#### **Équipe de rédaction du rapport**

- Marc Glogowski
- René Leduc
- Pascal Oceau
- Luc Y. Tremblay

### **Collaboration spéciale**

- Alain Beaudry
- Mario Blondeau
- Serge Carignan
- Claude Dauphin
- Jacques Déry
- Yves Devin
- Chantale Dion
- Bernard Donato
- Charles Dubois
- Richard Giubelli
- Marc Glogowski
- Yvon Huard
- Pierre Laforest
- Guy Lambert
- Louis-Michel Lanoie
- Mireille L'Archevêque
- Michel Lauzier
- René Léonard
- Éric Lourmède
- Hassan Mahmalat
- Lyne Paquette
- Pierre Raby
- Guylaine St-Louis
- Réjean Trudel
- Laurent Vivier

### **Participation du personnel de l'usine de Crémazie**

Le personnel affecté à la ligne mécanique, la tôlerie, la peinture, la soudure, les petites composantes électriques, les petites composantes mécaniques et à la planification.

### **Participation directe du CT LaSalle**

Tout le personnel affecté à l'exploitation et à l'entretien des autobus, de même qu'à l'entretien des bâtiments et au soutien administratif.

### **Partenaires financiers**

#### **Ministère des Transports du Québec**

- Robert Bégin
- Marc Carrier
- Serge Charrest
- Jacques Gagnon
- Stéphane Lauzon

#### **Transports Canada**

- Nathalie Laroche
- Alain Paquette
- Éric Sévigny

### **Partenaires de réalisation**

#### **Centre national du transport avancé**

- Daniel Lévesque
- Maxime Ouellet

#### **Comité technique**

##### **Société de transport de l'Outaouais**

- Guy Langlois
- Michel Paré
- Philippe Rousseau

#### **Direction de projet**

##### **Société de transport de l'Outaouais**

- Salah Barj
- Georges O Gratton
- Lawrence Cannon
- Hugues Charron
- Richard Bergeron
- Marco Cruz
- Carmel Dufour

#### **Environnement Canada**

- Michel Souigny
- Mike White

#### **Équipe de réalisation**

##### **Société de transport de l'Outaouais**

- Yassine Boussikouk
- Marco Cruz
- Céline Gauthier
- Guy Langlois
- Anne-Marie Proulx
- Philippe Rousseau

#### **NovaBus**

- Stéphane Gagnon
- Yves Gaumond
- François Lafond

### **Fournisseurs de soutien**

#### **Cummins Est du Canada**

- Johnny Mulfati

#### **ISAAC**

- Jean-Sébastien Bouchard

#### **MARCON**

- Pierre Ducharme
- Jules Gagnie

#### **Tecsult**

- Cédric Bachmann
- Patrick G. Déoux
- Benjamin Fischer
- Nadine Lafond

## **Collaboration spéciale**

### **DDACE /Allison**

- Nicolas Blais
- Robert Claude
- Marin Coulombe
- Duwayno Robertson

### **EMP**

- Mike Lasecki

### **King County Metro Transit**

- Jim Boon
- Alain Paquet
- Bruce Dahl

### **National Renewable Energy Laboratory**

- Leslie Eudy

### **ZF Friedrichshafen AG**

- Ali Poonawala
- Franz Sorg

# 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

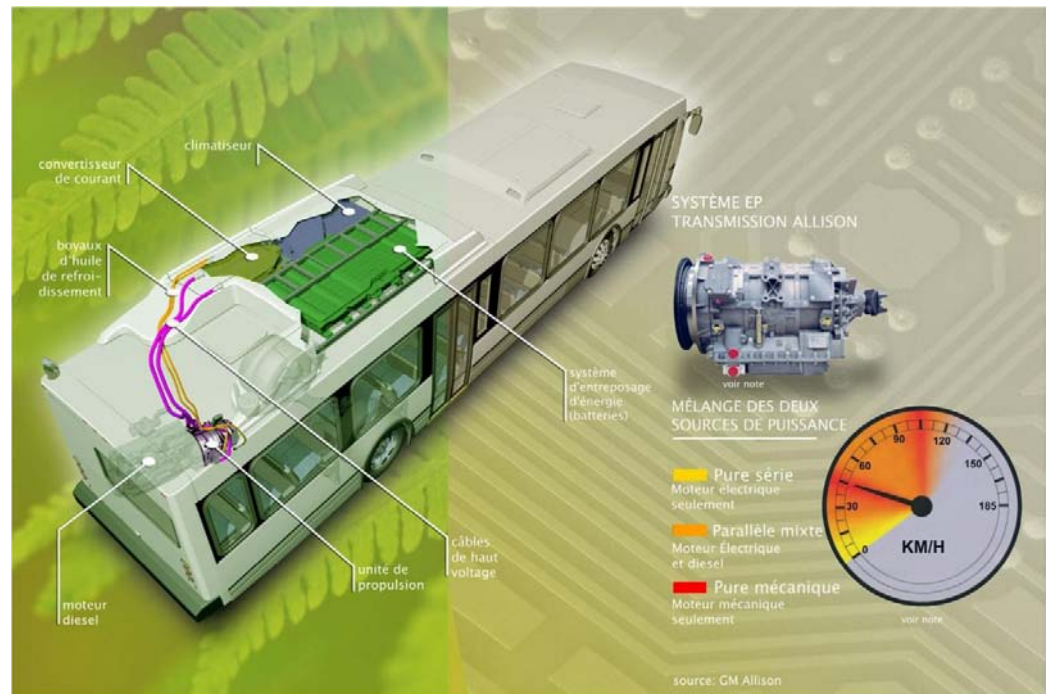
Les systèmes de propulsion hybride utilisent des composantes électriques pour le transfert, la récupération et l'accumulation d'énergie. Ce sont des groupes motopropulseurs hybrides diesel-électrique, soit la combinaison d'un moteur diesel à combustion interne et de moteurs et générateurs électriques.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

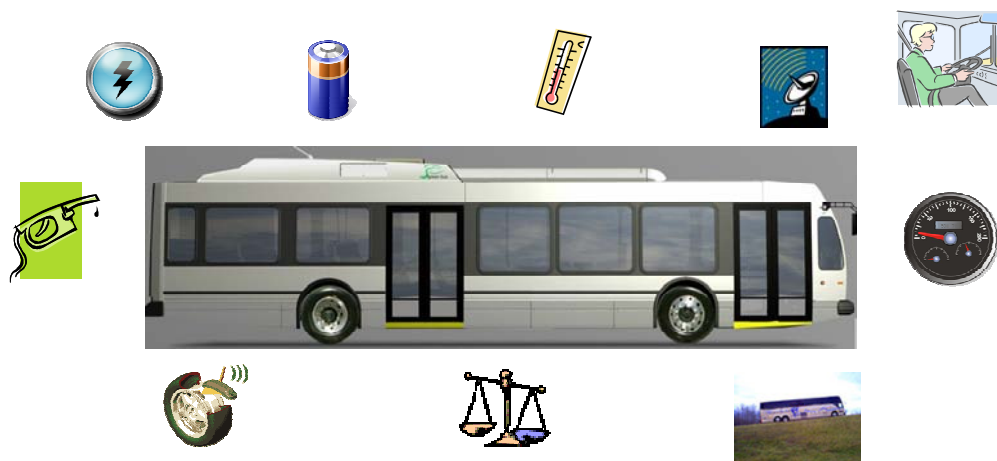
Les premiers autobus témoins de la STM ont été livrés à la fin du mois de janvier 2008. Le premier autobus hybride a été livré le 13 février 2008, alors que les autres autobus hybrides de la STM ont été livrés entre la mi-mars et le début du mois d'avril 2008 et ont été mis en service pour la clientèle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



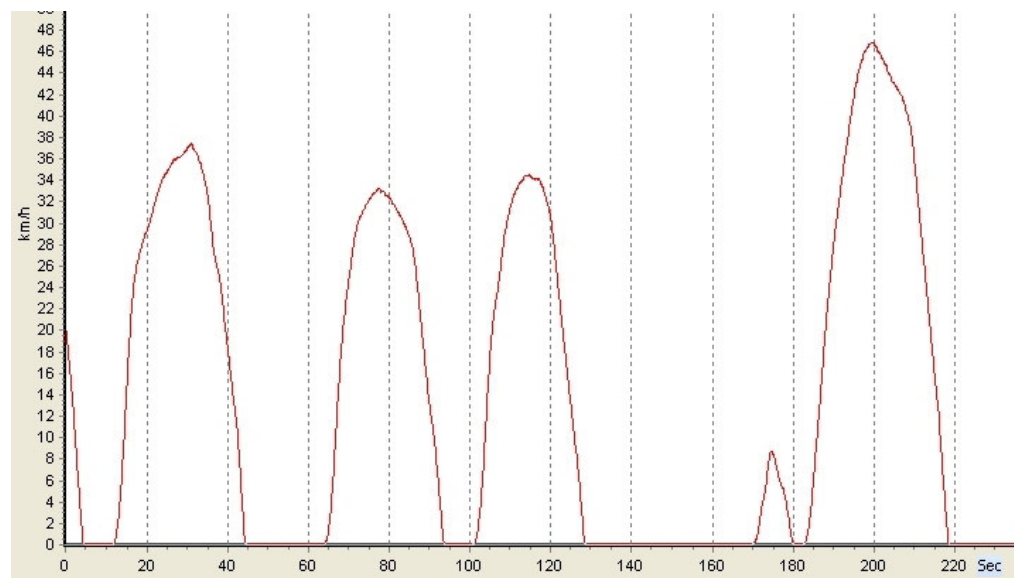
Pour enregistrer toutes ces données, un système avancé d'acquisition de données de la compagnie québécoise ISAAC Instruments Inc. et a été mis en place dans les autobus hybrides et témoins de la STM et de la STO. Ce système enregistre en continu les données concernant le fonctionnement du groupe motopropulseur 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 présentaient 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

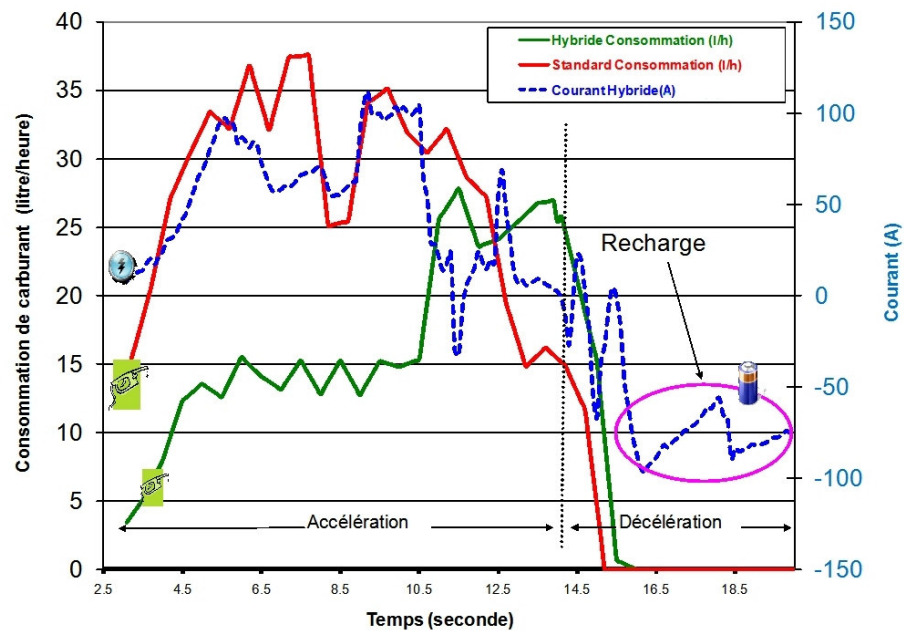
de carburant de tous les bonds qui ont une même vitesse moyenne, mais à des températures différentes.

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



Système de réfrigération qui a servi à maintenir la salle à -20 °C pour certains parcours spécifiques.

Les gaz d'échappement sont aspirés et l'analyse chimique permet de mesurer et quantifier les polluants émis lors des essais ainsi que la consommation de carburant.

L'autobus doit être solidement fixé à l'arrière comme à l'avant pour éviter tout risque de déplacement en cours d'essais.

Le type et la qualité du carburant sont contrôlés durant les essais. Dans ce cas-ci, le carburant provient d'un contenant externe au lieu du réservoir de l'autobus.

Les efforts de traction sont imposés autant pour l'accélération que pour le ralentissement, tout comme pour le maintien de la vitesse.

La puissance transmise aux roues varie continuellement au cours d'un essai en fonction de la simulation. Le système guide le chauffeur qui doit suivre la vitesse cible constamment indiquée sur un écran.

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

étaient 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**

 Une photographie montrant deux autobus sur une piste d'essai. À l'avant, un autobus hybride bleu et blanc est visible, suivi d'un autobus témoin blanc. Des véhicules jaunes et noirs sont également présents à gauche. Un bâtiment rouge est en arrière-plan. Une date rouge '25 8 2008' est visible en bas à droite.	<p>Les essais sur la piste sont réalisés simultanément sur un autobus témoin et hybride.</p>
 Une vue depuis le siège du conducteur à l'intérieur d'un autobus. On voit le volant, le tableau de bord et un ordinateur portable sur le tableau de bord qui affiche des données. Une date rouge '25 8 2008' est visible en bas à droite.	<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>
 Une vue de l'intérieur d'un autobus montrant des sièges bleus et des sacs de sable noirs utilisés pour simuler une charge de passagers. Une date rouge '26 8 2008' est visible en bas à droite.	<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.

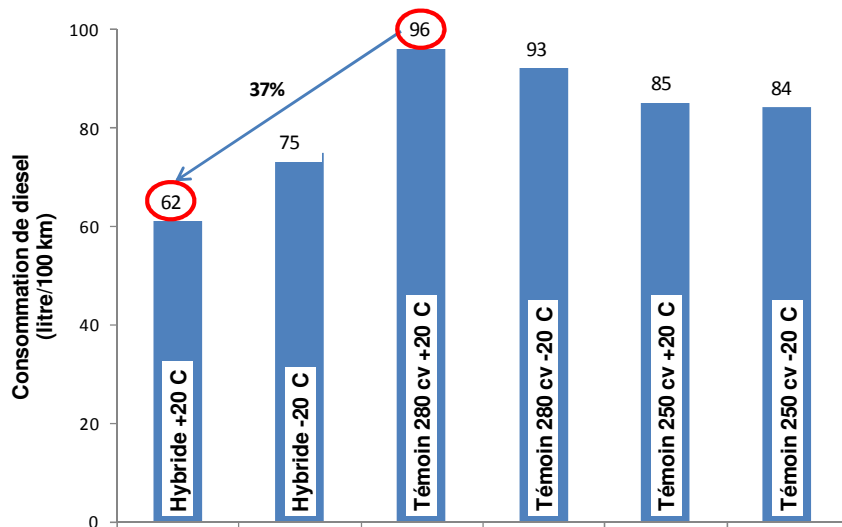
La comparaison de la consommation de carburant entre les autobus hybrides et témoins de la STM est présentée à la Figure 3-1 alors que les résultats des autobus de la STO sont exposés à la Figure 3-2.

---

<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».

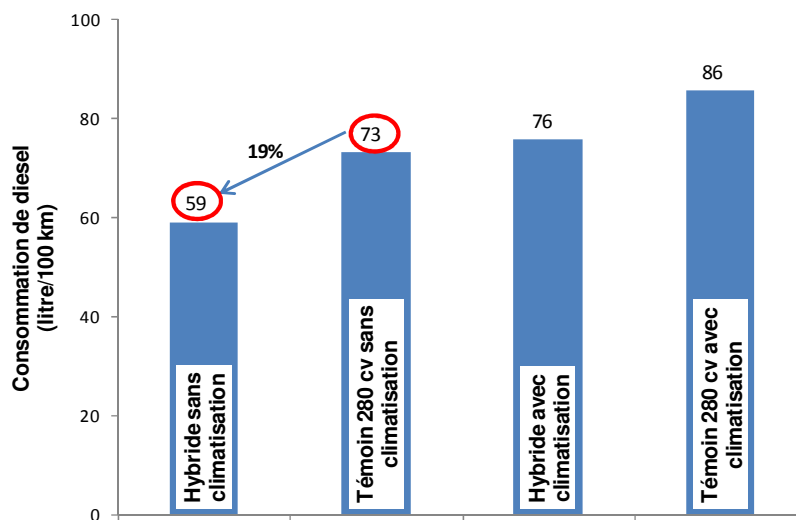


**Figure 3-1 Consommation de carburant des autobus de la STM – Résultats des essais aux laboratoires d’Environnement Canada (vitesse moyenne de 11 km/h)**



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>.

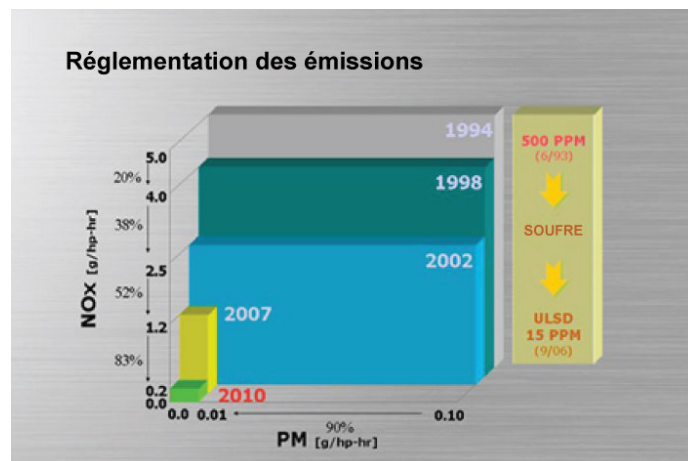
**Figure 3-2 Consommation de carburant des autobus de la STO – Résultats des essais aux laboratoires d’Environnement Canada (vitesse moyenne de 19 km/h)**



<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 :

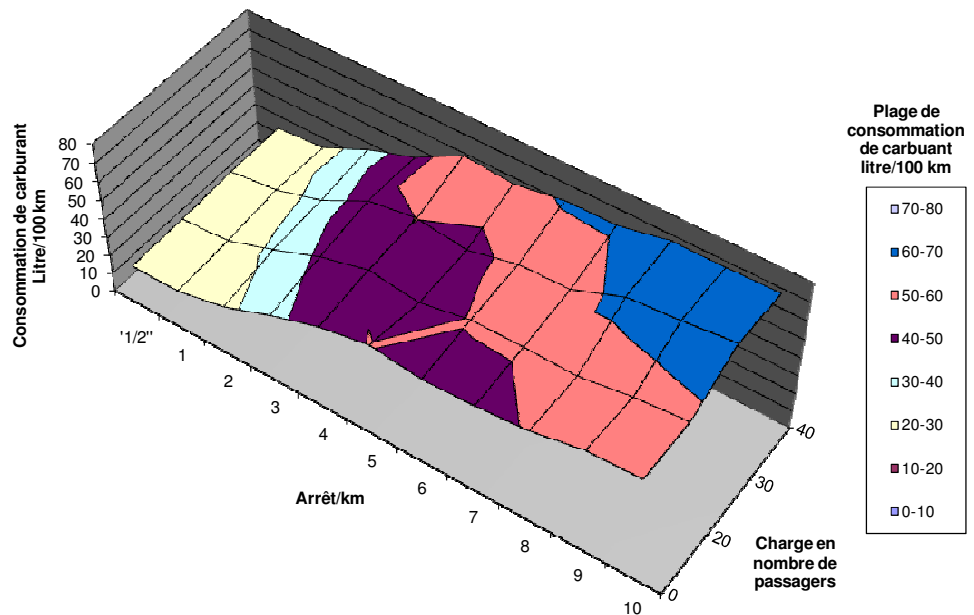
- Ils procurent une réduction de la consommation en carburant lorsque la vitesse est faible et les arrêts sont fréquents;
- Ils ont peu d'impacts à vitesse élevée sur de longs trajets avec peu ou pas d'arrêts.

## 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.

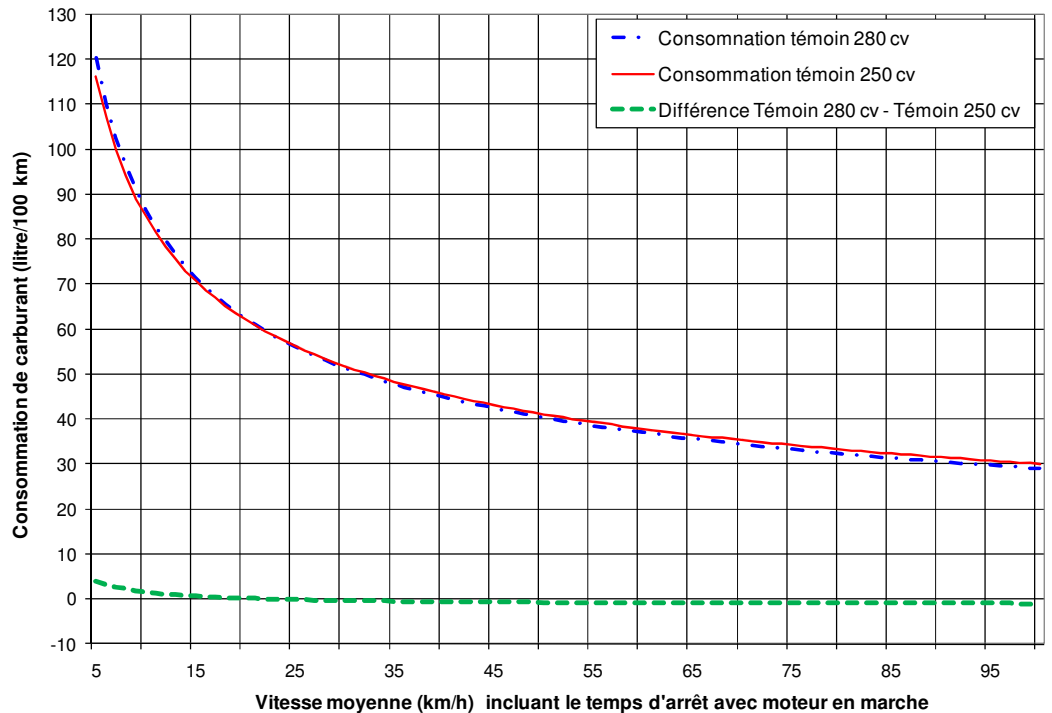
Bien que les résultats obtenus avec l'autobus témoin présentent les mêmes tendances, ils démontrent que le niveau d'accélération exercé par le conducteur avait beaucoup plus d'impact sur un autobus standard que sur un autobus hybride. Cette variation a faussé les données recueillies sur l'autobus standard 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).

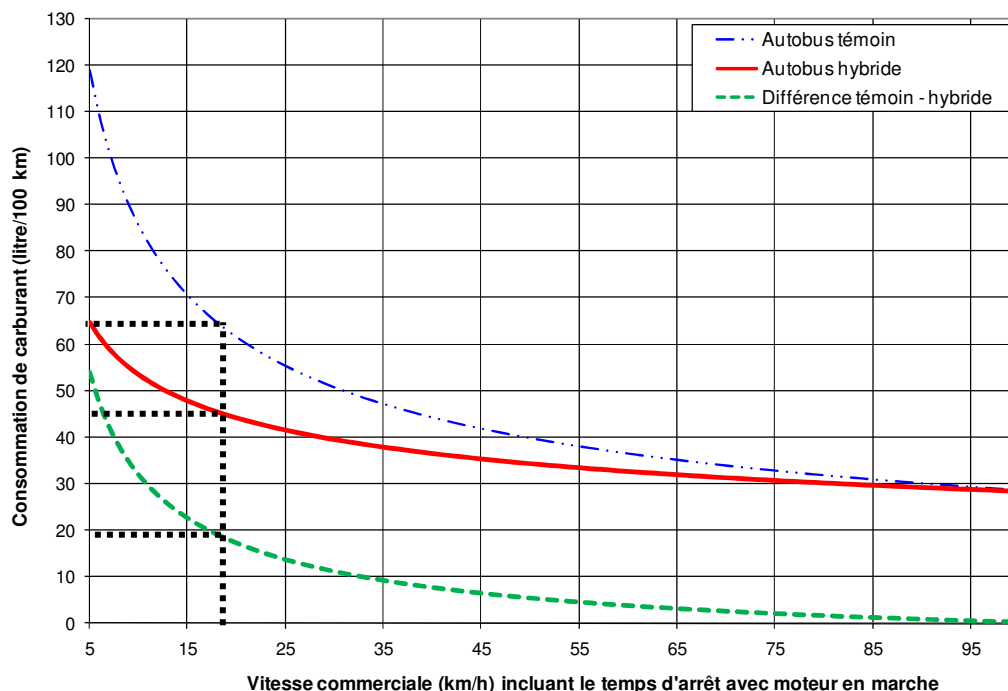
Les données recueillies quant aux nombres d'arrêts par kilomètre confirment que plus le nombre d'arrêts au kilomètre est élevé, plus la consommation de carburant est élevée. C'est d'ailleurs dans de telles conditions que la propulsion hybride trouve son avantage, puisque lors des nombreuses décélérations, 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)**



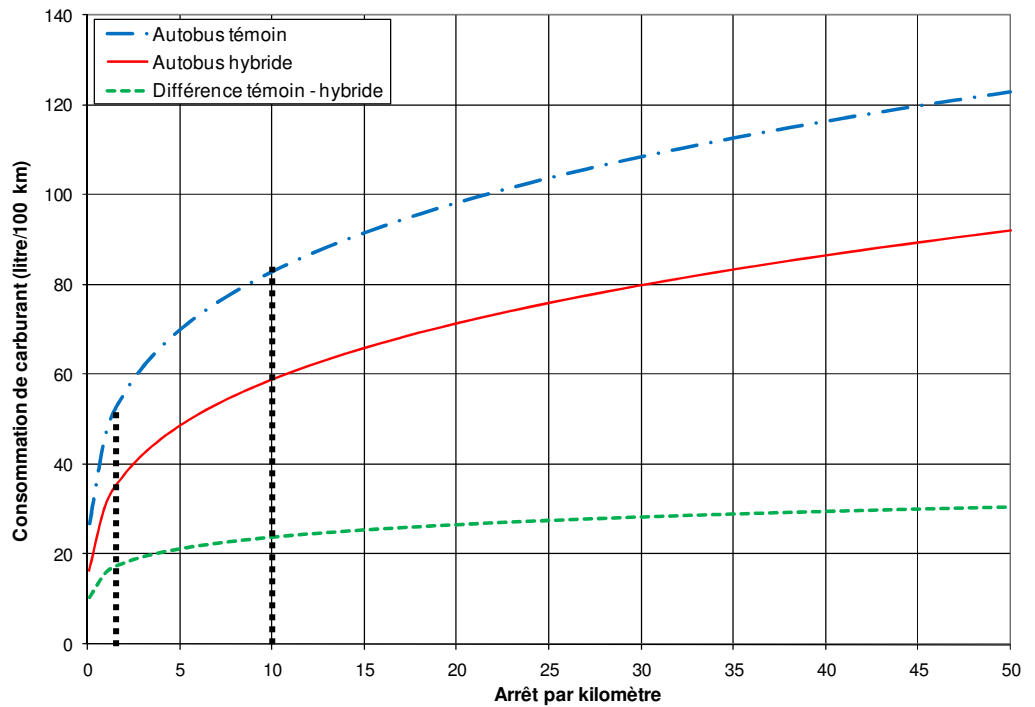
**Note :** Moyenne des résultats récoltés sur une année, avec une vitesse moyenne d'environ 18 km/h, une température minimale de -28,5 °C, une température maximale de 33,4 °C et une température moyenne de 6,6 °C ainsi que 34 % de temps pendant lequel le moteur a tourné au ralenti. Cette courbe s'applique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

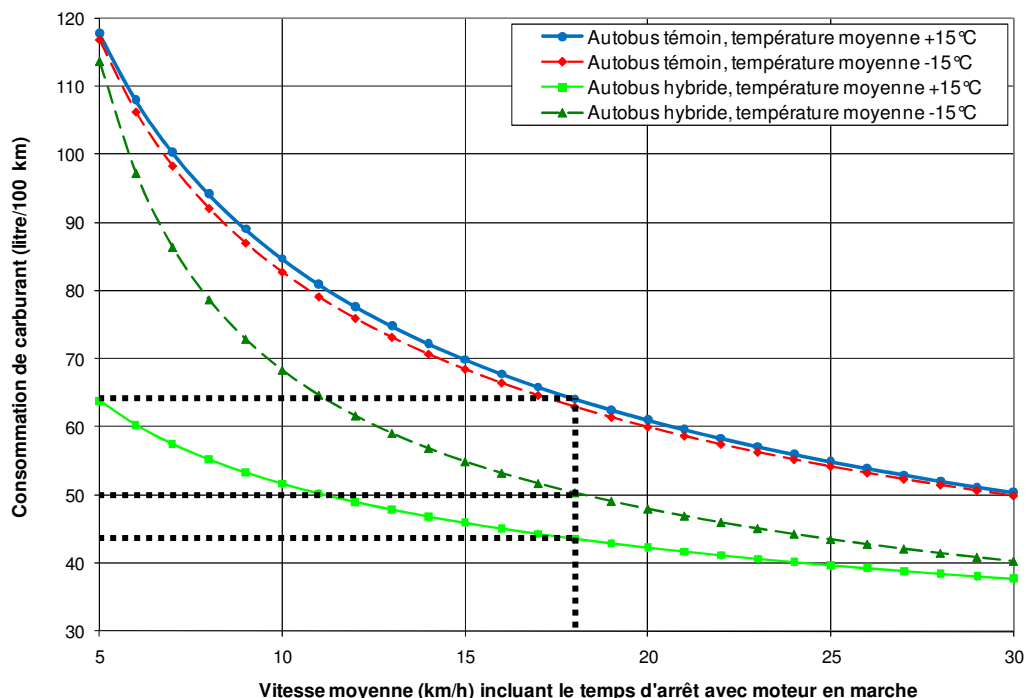


La Figure 3-7 présente la consommation de carburant en fonction de la vitesse moyenne à des températures de +15 °C et -15 °C pour les autobus hybrides et témoins de la STM.

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.

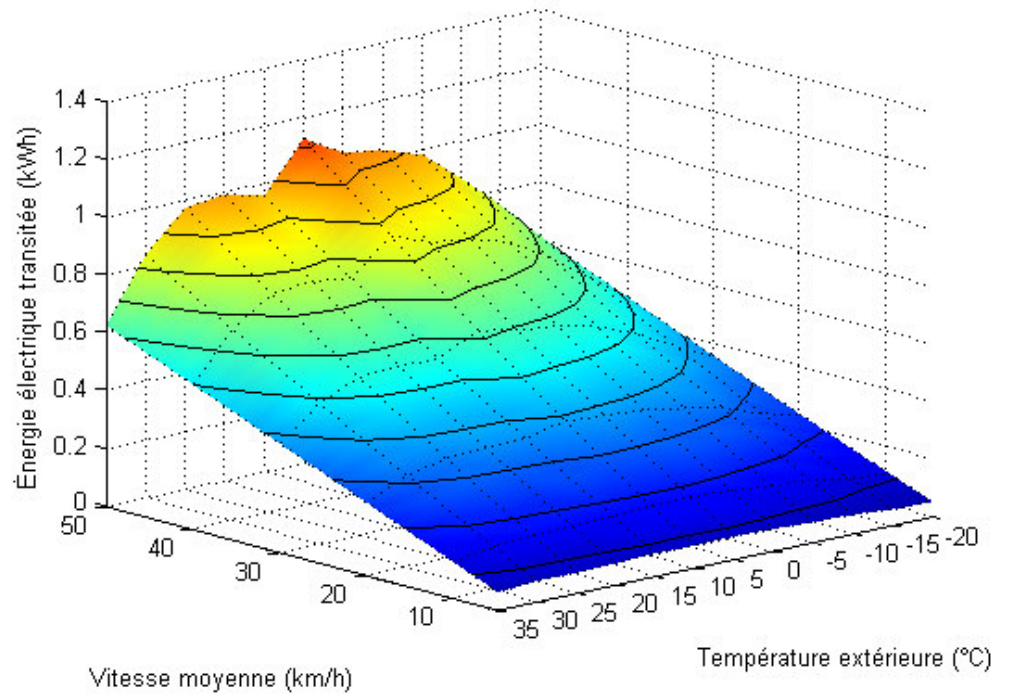
Sur cette différence de 7 litres/100 km observée pour les autobus hybrides, la consommation du chauffage d'appoint à elle seule compte pour environ 3 litres/100 km. Cela s'explique par le fait que le moteur thermique de l'autobus hybride est beaucoup moins sollicité à basse vitesse que celui opéré dans 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**



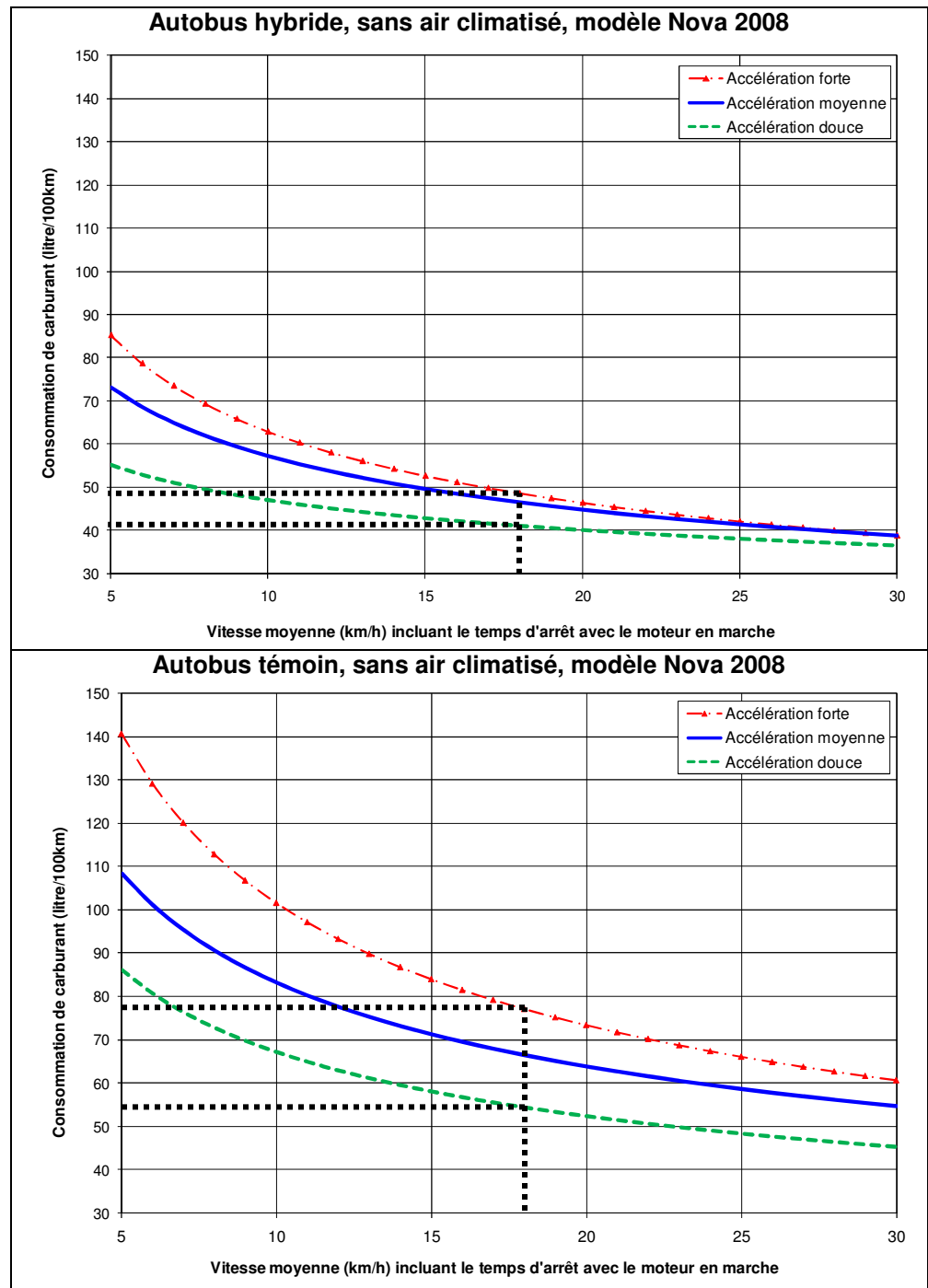


**Figure 3-8** Énergie électrique transmise par le système hybride en fonction de la température extérieure – Autobus hybride Nova 2008 (la consommation du système de chauffage d'appoint est exclue)



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.

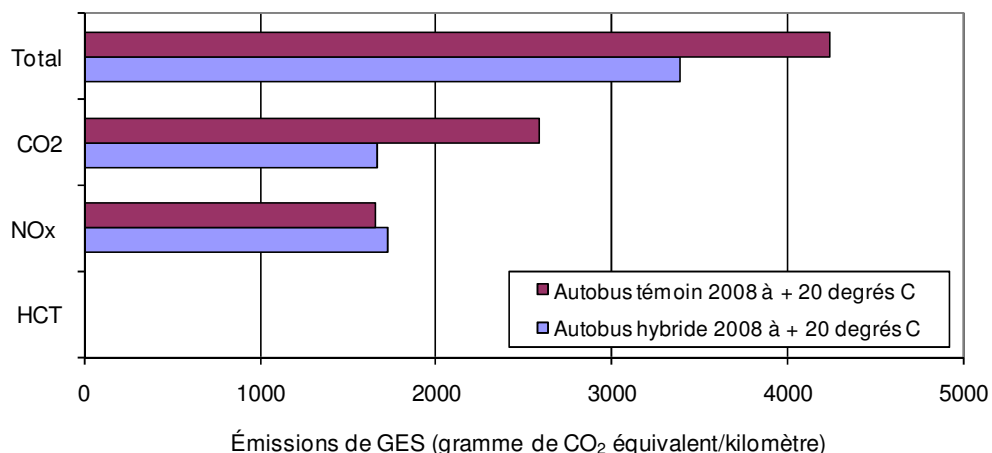
Plusieurs résultats d'analyse sont présentés à l'annexe D.

### 3.4 Bilan des GES

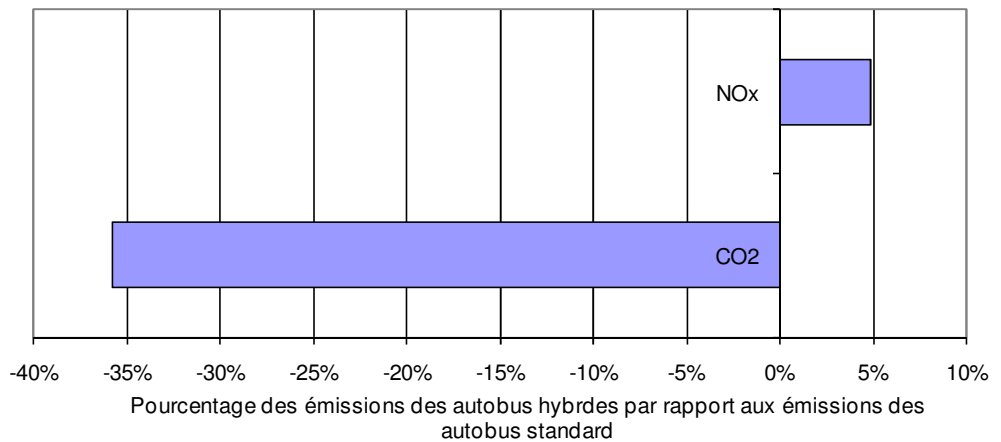
Les tests au laboratoire d'Environnement Canada ont permis de caractériser les émissions de GES des deux systèmes de propulsion comparés. La Figure 3-10 présente les valeurs en grammes par kilomètres des GES mesurés pour les systèmes de propulsion avec moteurs qui rencontrent les exigences de la norme 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**.

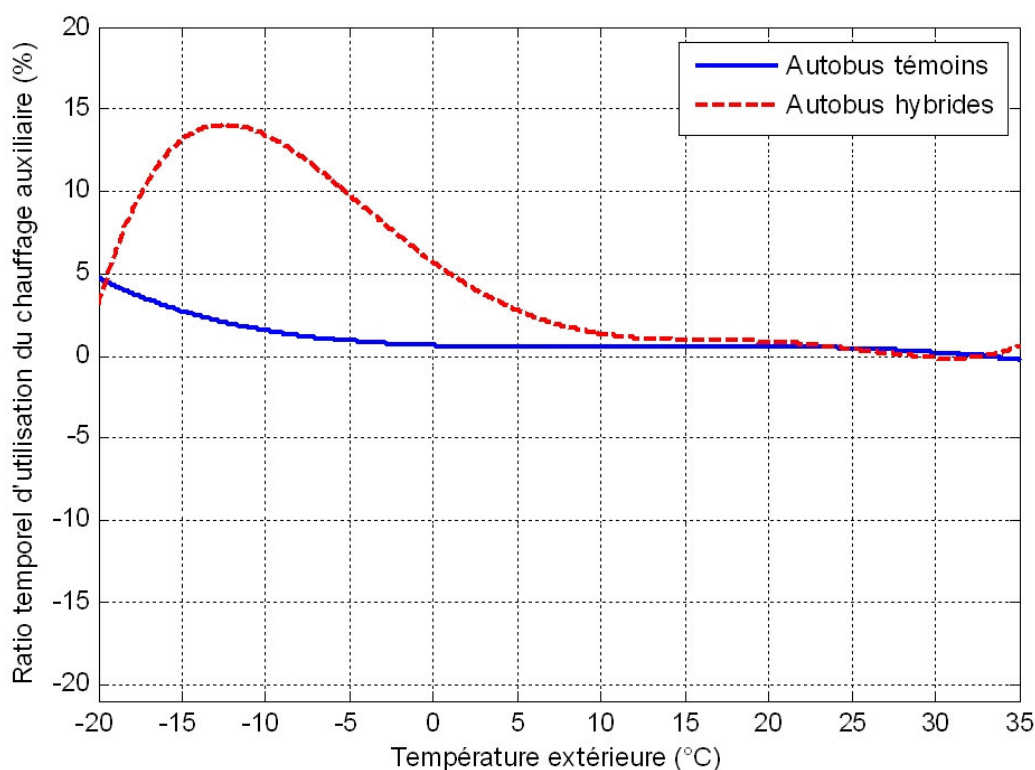
### 3.5 Cycle de vie

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

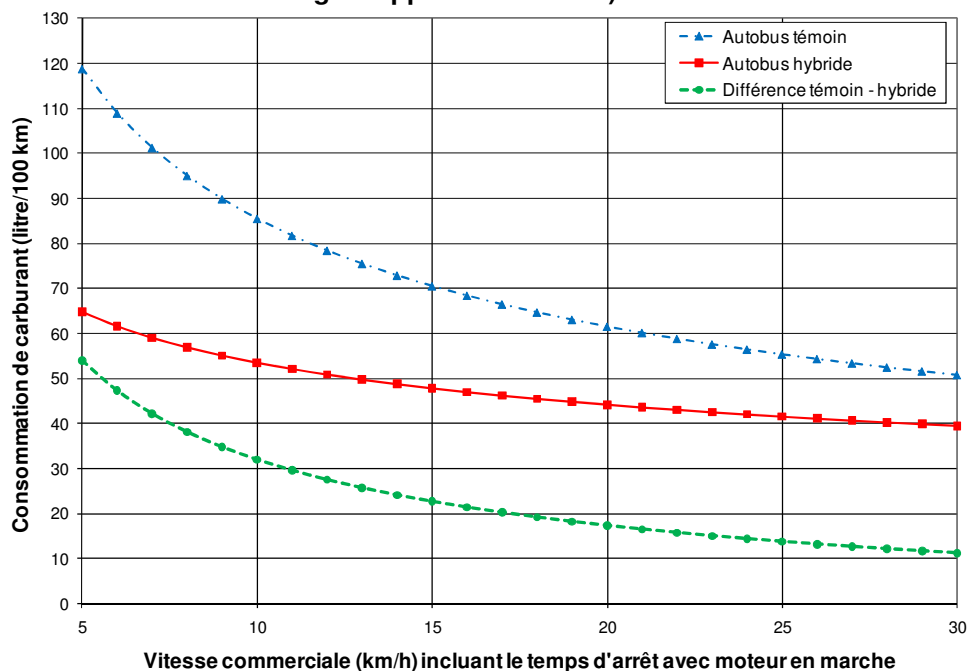
## 4 Outil décisionnel

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)



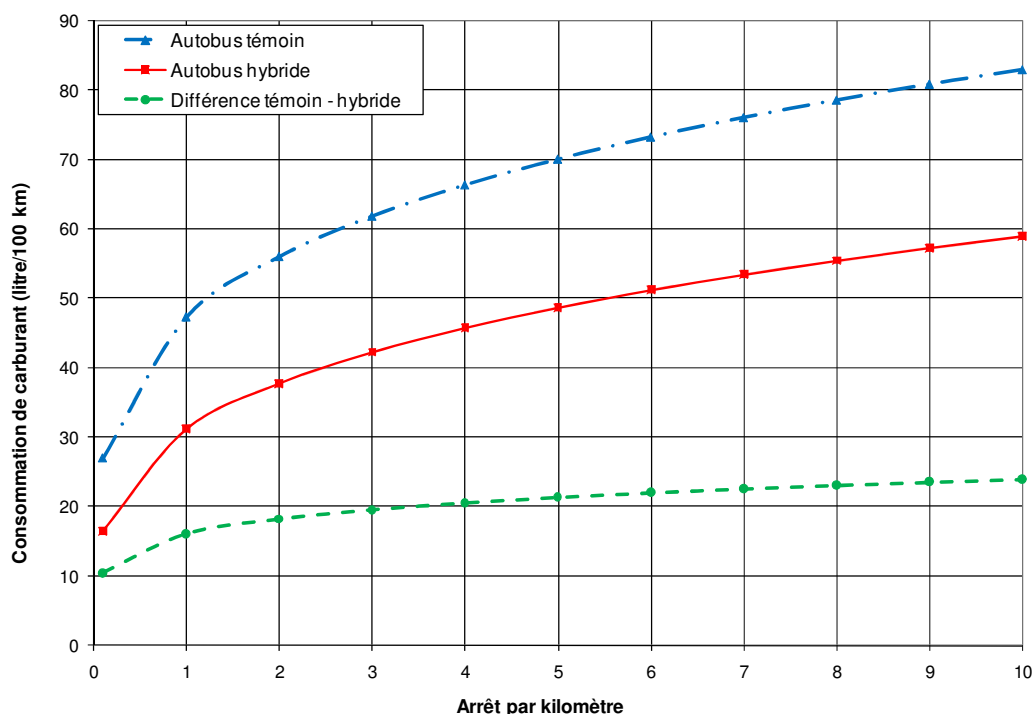
**Note :** Moyenne des résultats récoltés sur une année, avec une vitesse moyenne d'environ 18 km/h, une température minimale de -28,5 °C, une température maximale de 33,4 °C et une température moyenne de 6,6 °C ainsi que 34 % de temps de fonctionnement au ralenti. Cette courbe s'applique pour des autobus 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 :

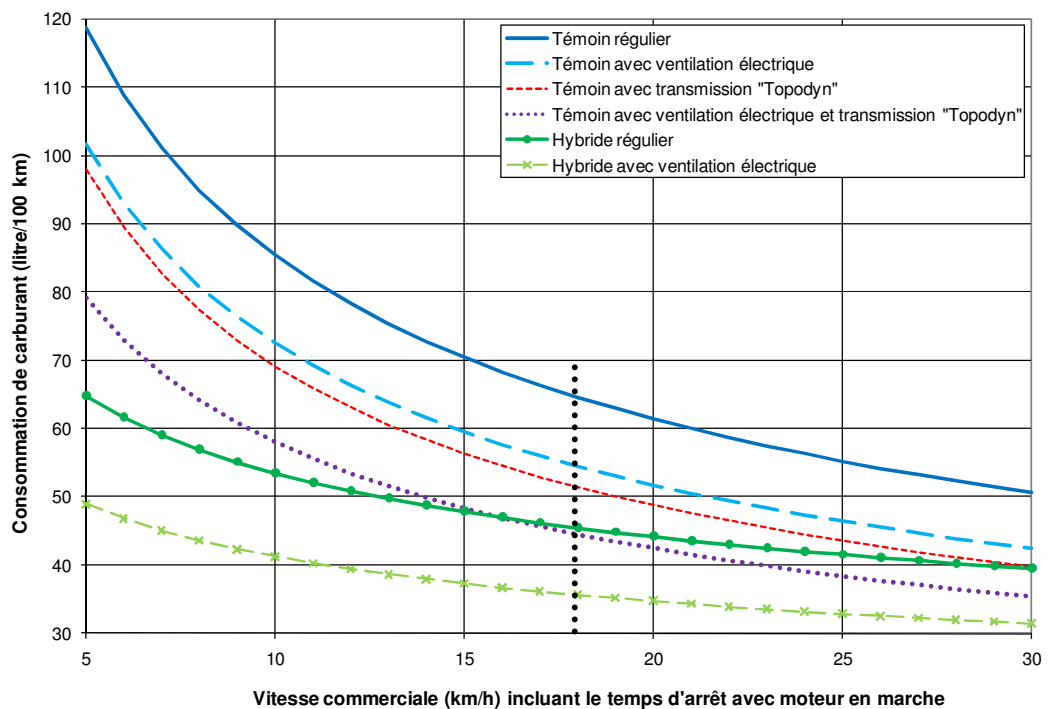
- Elle crée des conditions similaires aux conditions inhérentes à la conduite écolo. Somme toute, elle assure une accélération en douceur :
  - Elle tempère l'accélération demandée lorsque la vitesse de l'autobus est sous les 40 km/h;
  - Elle maintient le niveau d'accélération quand l'autobus est dans 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



# **Rapport technique - Technologie hybride**

---

*Annexes*

Annexe A : Technologie hybride  
Annexe B : Système d'acquisition de données ISAAC  
Annexe C : Résultats des 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

# **Annexe A**

---

**Technologie hybride**

## 1. Général

Un autobus équipé d'un **système de propulsion hybride** diesel-électrique est un autobus qui est muni, à la fois, d'un moteur à combustion interne et de un (ou plusieurs) moteur électrique. **Le système de propulsion hybride** utilise conjointement les deux types de moteur<sup>1</sup>.

## 2. Les systèmes de propulsion hybrides

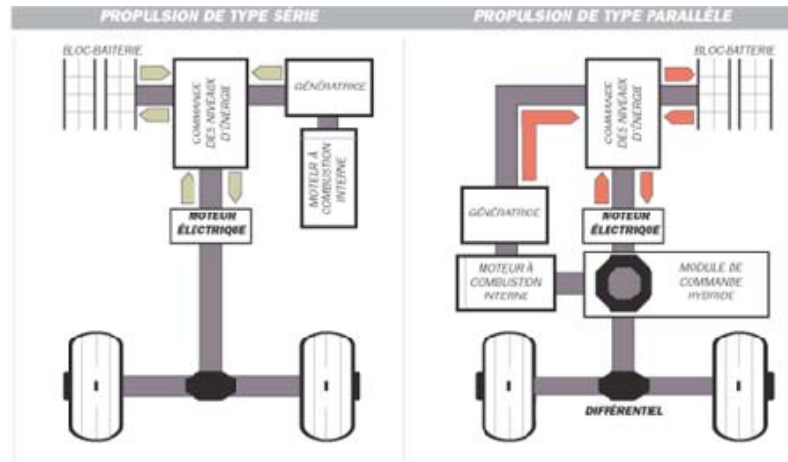
Deux configurations de **systèmes de propulsion hybrides** pour autobus urbains sont disponibles sur le marché : une configuration de type **Série** et une autre de type **Parallèle**. Le tableau A-1 décrit ces deux types de système.

**Tableau A-1 : Description des systèmes hybrides de type série et parallèle**

	Propulsion de type série	Propulsion de type parallèle
Les principales différences	Le moteur électrique est le seul moteur connecté aux roues pour faire avancer le véhicule.	Le moteur électrique et le moteur à combustion interne sont connectés à une unité motrice qui, elle, est connectée aux roues pour faire avancer le véhicule.
	Le moteur à combustion interne est branché à une génératrice qui transforme l'énergie qu'il produit en électricité.	Le moteur à combustion interne est aussi connecté à une génératrice qui transforme une partie de l'énergie qu'il produit en électricité.
	Un module de commande hybride n'est pas nécessaire puisque seul le moteur électrique est connecté aux roues.	Un module de commande hybride gère l'utilisation du moteur à combustion interne et du moteur électrique.
Les similitudes	Lors de la décélération ou de la descente des pentes, le moteur électrique se transforme en génératrice. Ce sont les roues de l'autobus qui font tourner et, ce faisant, il génère de l'électricité qui est stockée dans le bloc-batterie	
	Le bloc-batterie stocke l'énergie électrique produite par le moteur à combustion interne ainsi que l'énergie récupérée par le moteur électrique à la décélération.	
	Une génératrice est utilisée pour transformer l'énergie produite par le moteur à combustion interne en électricité.	
	Un module de commande des niveaux d'énergie gère la circulation de l'électricité entre la génératrice reliée au moteur à combustion interne, le bloc-batterie et le moteur électrique.	
Les avantages	<b>Consomment moins de carburant</b>	
	<b>Polluent moins/Émettent moins de GES</b>	
	<b>Font moins de bruit</b>	
Les désavantages	<b>Augmentent les poids du véhicule (Le bloc-batterie est très lourd)</b>	
	<b>Très dispendieux à l'achat</b>	

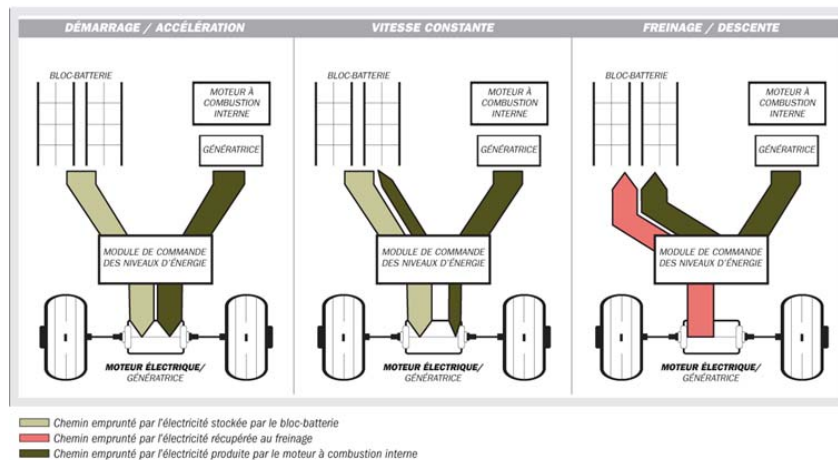
<sup>1</sup> Bien qu'il existe en principe d'autres systèmes de propulsion hybrides : par exemple, un moteur à combustion interne jumelé à un système pneumatique ou hydraulique, l'objet de cette étude porte sur la propulsion hybride diesel-électrique.

Figure A-1 Illustrations des propulsions hybrides de type série et parallèle



La figure A-1 présente les deux types de système de propulsion hybrides, mais comment fonctionnent-ils? Prenons le système de type **Série**, illustré à la figure A-2, pour expliquer leur fonctionnement, puisqu'il est conceptuellement plus simple que le système de type **Parallèle**, ce dernier n'étant qu'une variante du premier.

Figure A-2 Gestion de l'énergie du système de propulsion hybride de type série



Les phases d'opération qui exigent le plus d'électricité sont la **mise en mouvement** et l'**accélération**. Au cours de ces phases, le moteur électrique est alimenté par l'électricité fournie par le bloc-batterie et par l'électricité générée par le moteur à combustion interne<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Le moteur à combustion interne agit comme les génératrices portatives utilisées lors de la crise du verglas.

Lorsque l'autobus roule à **vitesse constante**, le moteur électrique est alimenté par l'électricité fournie par le bloc-batterie et, si celle-ci est insuffisante (selon la vitesse et la distance requises), par l'électricité générée par le moteur à combustion interne. Dans certaines circonstances, le moteur à combustion interne produira également de l'électricité destinée à recharger les batteries.

Lorsque l'autobus **freine ou descend une pente**, le moteur électrique ne sert plus à faire avancer l'autobus. Il se transforme en génératrice pour récupérer l'énergie de la décélération et la transformer en électricité qui est stockée par le bloc-batterie. De plus, puisque l'électricité produite par le moteur à combustion interne n'est pas requise par le moteur électrique, cette énergie est envoyée au bloc-batterie pour y être stockée.

*Comme l'énergie de la décélération est récupérée et transformée en électricité pour être stockée dans le bloc-batterie, le moteur à combustion interne a besoin de produire moins d'électricité au moment de la mise en mouvement. **Il consomme ainsi moins de carburant et produit moins de GES.***

La théorie derrière le système de propulsion hybride de type **Parallèle** est basée sur le fait qu'un moteur électrique a des caractéristiques de performance différentes de celle du moteur à combustion interne. Ainsi, en faisant fonctionner les moteurs électrique et à combustion interne côte à côte (en parallèle), il est possible de faire appel à ces moteurs de façon à soutirer les meilleures performances de chacun. Les données des essais effectués à ce jour en conditions réelles ne permettent pas de confirmer ou d'infirmer la justesse de cette technologie. Elles permettent toutefois de confirmer que peu importe le type de système de propulsion hybride utilisé, il est plus performant qu'un système ayant seulement un moteur à combustion interne lorsqu'il est utilisé dans des conditions d'exploitation pour lesquelles la vitesse moyenne est peu élevée et que le nombre d'arrêts au kilomètre est élevé.

### **3. Les composantes d'un système de propulsion hybride**

Le **moteur à combustion interne** peut être alimenté au diesel, à l'essence, au gaz naturel ou à l'hydrogène. Il est possible, avec le type **Série**, de remplacer le moteur à combustion interne par une pile à combustible; toutefois cette technologie n'en est qu'au stade de démonstration.

**Tableau A-2 Options disponibles pour les systèmes de propulsion hybride de type série et de type parallèle**

	Propulsion de type série	Propulsion de type parallèle
<b>Moteurs à combustion interne</b>	<b>Moteur diesel</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>C'est le plus répandu des systèmes de propulsion hybrides pour autobus de 12 et de 18 mètres.</li> <li>Pourrait utiliser du biodiesel.</li> </ul>	
	<b>Moteur à essence</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Il gagne en popularité en Californie, mais demeure bien loin derrière le moteur diesel.</li> <li>Pourrait utiliser un mélange essence-éthanol.</li> </ul>	
	<b>Moteur au gaz naturel</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Peu populaire, requiert des infrastructures importantes.</li> </ul>	
	<b>Moteur à l'hydrogène</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Fonctionne comme un moteur au gaz naturel, mais avec de l'hydrogène. Une technologie de démonstration seulement.</li> </ul>	
	<b>Pile à combustible</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Aussi connue sous le nom de pile à l'hydrogène.</li> <li>Technologie de démonstration qui, jusqu'à tout récemment, ne se retrouvait que sur des autobus de moins de 12 mètres.</li> <li>Un projet de démonstration sur autobus de 12 mètres vient de démarrer en Californie.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>La pile à combustible ne peut être utilisée avec le système de type <b>Parallèle</b>.</li> </ul>
<b>Bloc-Batterie</b>	<b>Batteries plomb-acide</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Ce type de batterie est en usage depuis fort longtemps. C'est une technologie bien maîtrisée et fiable.</li> </ul>	
	<b>Batteries Lithium-ion</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Cette technologie de batterie est récente. Bien que les essais en conditions réelles d'exploitation soient positifs, certaines questions demeurent : comment en disposer? Exploitées dans les conditions climatiques québécoises, seront-elles performantes?</li> </ul>	
	<b>Batteries NIMH</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Cette technologie de batterie est récente. Bien que les essais en conditions réelles d'exploitation soient positifs, certaines questions demeurent : comment en disposer? Exploitées dans les conditions climatiques québécoises, seront-elles performantes?</li> </ul>	
	<b>Ultracondensateurs</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Les ultracondensateurs, tout comme les batteries, sont des dispositifs de stockage d'énergie. Cependant, contrairement aux batteries, ils sont conçus pour libérer de l'énergie très rapidement, ce qui est idéal pour assurer le démarrage sur l'accélération d'un véhicule. Ils emmagasinent aussi l'énergie rapidement, condition idéale à la récupération de l'énergie disponible pendant la décélération.</li> </ul>	

	Propulsion de type série	Propulsion de type parallèle
	<p><b>Les volants d'inertie</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Disponibles en version démonstration seulement.</li> <li>• Dans un système à volants d'inertie, l'énergie cinétique est emmagasinée et libérée par l'augmentation et la réduction de la vitesse de rotation du volant. On étudie actuellement l'opportunité d'utiliser de nouveaux matériaux aux rapports résistance-poids élevés et configurations intégrant le volant d'inertie au moteur/génératrice. Comme dans le cas d'autres sources auxiliaires d'énergie, une évaluation complète des coûts, de la fiabilité, de l'efficacité et de la sécurité s'impose.</li> </ul> <p><b>Systèmes hydropneumatiques</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Disponibles en version démonstration seulement.</li> <li>• Il s'agit d'une méthode mécanique de stockage d'énergie. Les systèmes hydropneumatiques emmagasinent l'énergie en comprimant un gaz à l'aide d'un liquide à haute pression. Ces systèmes ont une densité de puissance élevée, permettant une libération très rapide de l'énergie, ce qui est idéal pour l'accélération d'un véhicule. Toutefois, comme la densité d'énergie de ces systèmes est peu élevée, ils ne peuvent emmagasiner qu'une petite quantité d'énergie.</li> </ul>	
<b>Moteur électrique/unité motrice</b>	<p><b>Moteur électrique</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Adapté aux exigences de performance.</li> <li>• Il se transforme en génératrice pour récupérer l'énergie de la décélération.</li> </ul>	<p><b>Moteur électrique</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Adapté aux exigences de performance.</li> <li>• Les systèmes de propulsion hybrides de type Parallèle peuvent utiliser un moteur électrique autonome, mais de telles configurations ne sont pas offertes en Amérique du Nord.</li> </ul> <p><b>Unité motrice</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Le seul système de propulsion hybride de type Parallèle disponible en Amérique du Nord fait appel à une unité motrice, c'est-à-dire à une transmission traditionnelle à laquelle ont été intégrés deux moteurs électriques.</li> <li>• Elle se transforme en génératrice pour récupérer l'énergie de la décélération.</li> </ul>
<b>Génératrice</b>	<p><b>Génératrice</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Équipement standard adapté aux besoins.</li> </ul>	
<b>Module de commande des niveaux d'énergie</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unité électronique conçue par chacun des fabricants de systèmes de propulsion hybrides.</li> </ul>	
<b>Module de commande hybride</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unité électronique conçue par le fabricant du système pour gérer l'utilisation, en parallèle, du moteur électrique et de la transmission mécanique reliée au moteur à combustion interne.</li> </ul>	

**Le bloc-batterie** peut, quant à lui, être composé de batterie plomb-acide, de batteries à hydrure métallique de nickel (NIMH)<sup>3</sup>, de batteries au lithium-ion ou encore d'ultracondensateurs.

<sup>3</sup> Même type de batteries que celles que l'on retrouve dans certains appareils photo, mais en version plus robuste.



Le **moteur électrique**, qui fait tourner les roues, est de type traditionnel sur le système **Série**. Il se transforme en génératrice lors de la décélération et de la descente de pentes. En configuration de type **Série**, ce moteur est physiquement autonome, tandis qu'en configuration **Parallèle**, il est intégré à la transmission qui, elle, est reliée au moteur à combustion interne.

La **génératrice**, qui transforme l'énergie produite par le moteur à combustion interne en électricité, est de type traditionnel sur le système **Série**. En configuration **Parallèle**, elle peut être intégrée à la transmission.

Le **module de commande des niveaux d'énergie** gère la conversion de l'énergie électrique en courant alternatif, d'une part, pour alimenter le moteur électrique, et en courant continu, d'autre part, pour s'accumuler dans le bloc-batterie. La conception de cette unité revient à chacun des fabricants de système hybride, selon des critères qui leurs sont propres.

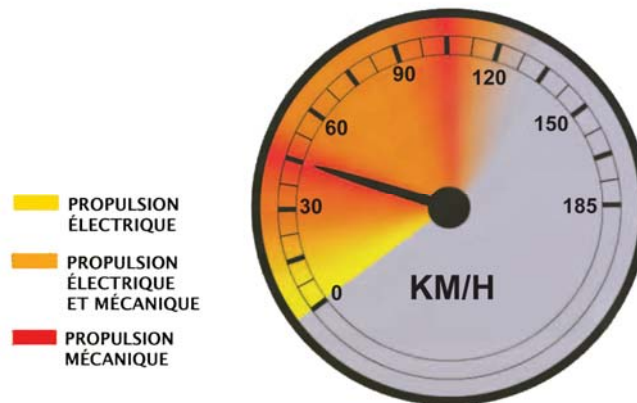
Le **module de commande hybride** est conçu par le fabricant du système de propulsion hybride de type **Parallèle** pour gérer l'utilisation de la transmission reliée au moteur à combustion interne et celle des deux moteurs électriques qui complètent son unité motrice.

#### 4. Complémentarité du moteur électrique et du moteur à combustion interne

Ces deux types de moteur ont des caractéristiques de performance différentes. Les personnes qui se souviennent des petites voitures électriques sur piste de course savent, par expérience, que la caractéristique première du moteur électrique est son accélération rapide. Par ailleurs, les conducteurs d'automobile avec moteur à combustion interne savent que lorsqu'ils démarrent et appuient sur l'accélérateur, le moteur doit prendre de la vitesse avant de fournir une meilleure accélération. Pour compenser, les pilotes de course font tourner leur moteur à haut régime avant d'embrayer pour obtenir la meilleure accélération possible au départ. Ainsi, le couple d'un moteur électrique est à son maximum dès la mise en mouvement, puis diminue à mesure que sa vitesse augmente, tandis que le couple d'un moteur à combustion interne augmente graduellement en prenant de la vitesse.

En configuration de type **Parallèle**, le système de propulsion hybride tire avantage des caractéristiques inhérentes aux moteurs électriques et à combustion interne. Il utilise le moteur électrique pour faire tourner les roues de l'autobus lors de l'accélération, à partir de la vitesse zéro, et intègre progressivement la contribution du moteur à combustion interne, à mesure que l'autobus prend de la vitesse. Le module de commande hybride, grâce à un usage intelligent de la transmission, utilise le moteur à combustion interne lorsqu'il est avantageux de le faire. La figure A-3 illustre les utilisations complémentaires des deux types de moteurs par le système de propulsion de type **Parallèle** de la compagnie GM Allison.

**Figure A-3 Utilisations complémentaires des deux types de moteurs par le système de propulsion de type parallèle de la compagnie GM Allison**

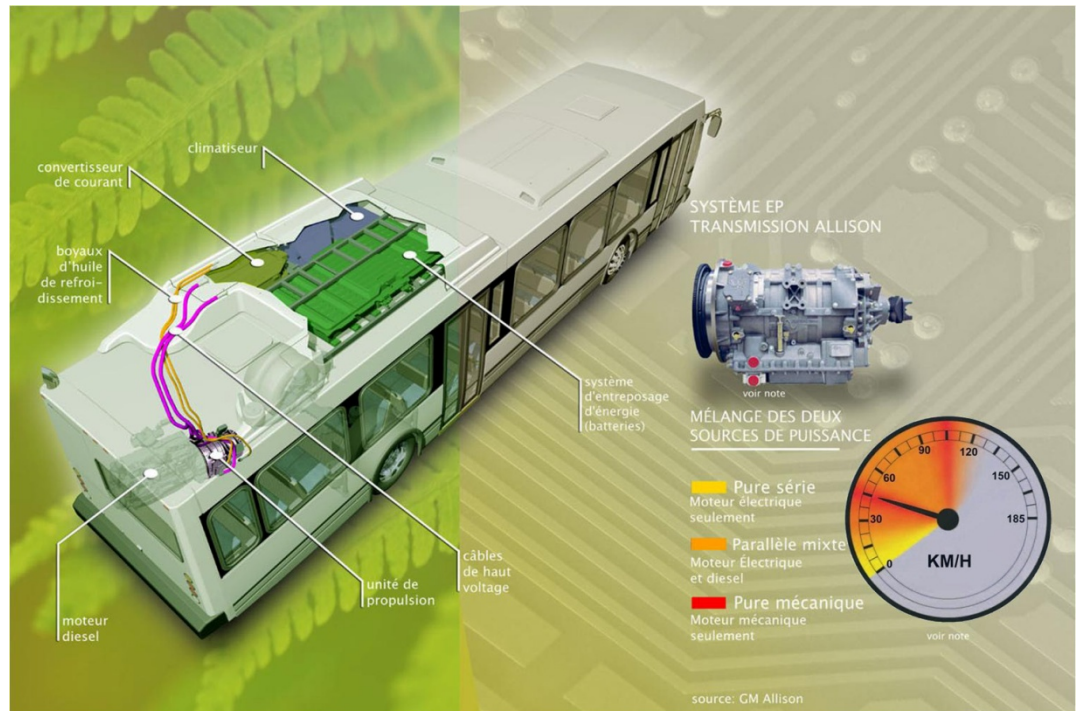


Somme toute, les systèmes de propulsion hybride :

- Maximisent l'efficacité de la combustion du carburant en faisant travailler le moteur à combustion interne à la rotation et au couple idéal selon la puissance requise par la dynamique de l'autobus, ce qui a pour effet de réduire en partie la consommation de carburant;
- Récupèrent l'énergie cinétique (l'élan et la masse du véhicule) lorsque le véhicule ralentit ou descend une pente et la convertissent en électricité pour ensuite l'emmagasiner dans la batterie hybride, ce qui a pour effet de réduire l'effort de freinage sur les autres composantes habituellement utilisées à cette fin;
- **Utilisent l'énergie récupérée au ralentissement** pour l'accélération, ce qui réduit l'énergie mécanique demandée au moteur diesel. **C'est l'effet principal réduisant la consommation de carburant en cycle urbain** (arrêts et départs fréquents);
- Permettent l'utilisation d'un moteur diesel de plus petite cylindrée et puissance, ce qui est possible grâce à l'assistance de la propulsion électrique en accélération ou montée de pente. Le moteur diesel plus petit est généralement plus léger et fonctionne dans une plage de vitesse et puissance plus efficace que le plus gros moteur qu'il remplace, ce qui a pour effet de réduire en partie la consommation de carburant.

## 5. Les autobus hybrides de Nova Bus avec système Allison

Figure A-4 Emplacement des composants du système hybride sur les autobus Nova Bus



## **Annexe B**

---

**Système d'acquisition de données ISAAC**

## 1. Description du système

L'architecture du système d'acquisition de données est basée sur l'équipement conçu par la compagnie québécoise Isaac Instruments Inc. Ce système permet, à l'aide des ports de communication et de capteurs d'effectuer l'acquisition des données nécessaires à notre étude. Ces données sont transférées par modem sans fil lorsque les autobus arrivent au centre de transport. Chaque autobus accumule ainsi plus de 14 Mb de données par jour.

### 1.1 Caractéristiques principales du système d'acquisition de données d'ISAAC (BOXV8-STD) :

- Trois accéléromètres, un pour chaque axe de base (x, y, z);
- Quatre entrées analogiques (utilisées pour suivre les températures intérieure et extérieure, le courant alternatif et les batteries 12 volts standards);
- Quatre entrées numériques (utilisées pour suivre le temps de fonctionnement du chauffage d'appoint, le délestage électrique, le compresseur pneumatique standard);
- Deux ports de communication CAN 2.0 a/b (réseau J1939, IBIS et Beru);
- Trois ports COM RS-232 (utilisés pour le GPS et le modem de communication);
- Un port USB 2.0 (utilisés pour observer en temps réel les paramètres enregistrés, pour la maintenance et la mise à jour informatique);
- Mémoire "flash" de 16 Mb;
- Taux d'échantillonnage de .0017 à 4 Khz.

### 1.2 Liste des modules ou capteurs branchés au système ISAAC :

- Un convertisseur 24 Vdc à 12 Vdc, alimentation de l'ordinateur;
- Deux capteurs de température, températures intérieure et extérieure;
- Deux capteurs de courant, courant de l'alternateur 24 volts et des batteries 24 volts;
- Un détecteur de tension pour détecter le circuit du chauffage d'appoint et la climatisation réfrigérée (STO seulement sur climatisation);
- Un interrupteur de pression, détection de la mise en marche du compresseur pneumatique (freins et suspension);
- Un GPS;
- Une interface IBIS-CAN pour interfacer l'info du compte-personnes à l'ordinateur;
- Un modem 900 Mhz, effectue le transfert des données;
- Un câble Y pour se connecter au réseau J1939 de l'autobus, capte les données du moteur et du système hybride;
- Interface J1939 pour le TPMS de Beru, pression des pneus, un seul bus STM.

### 1.3 Liste des équipements externe aux autobus

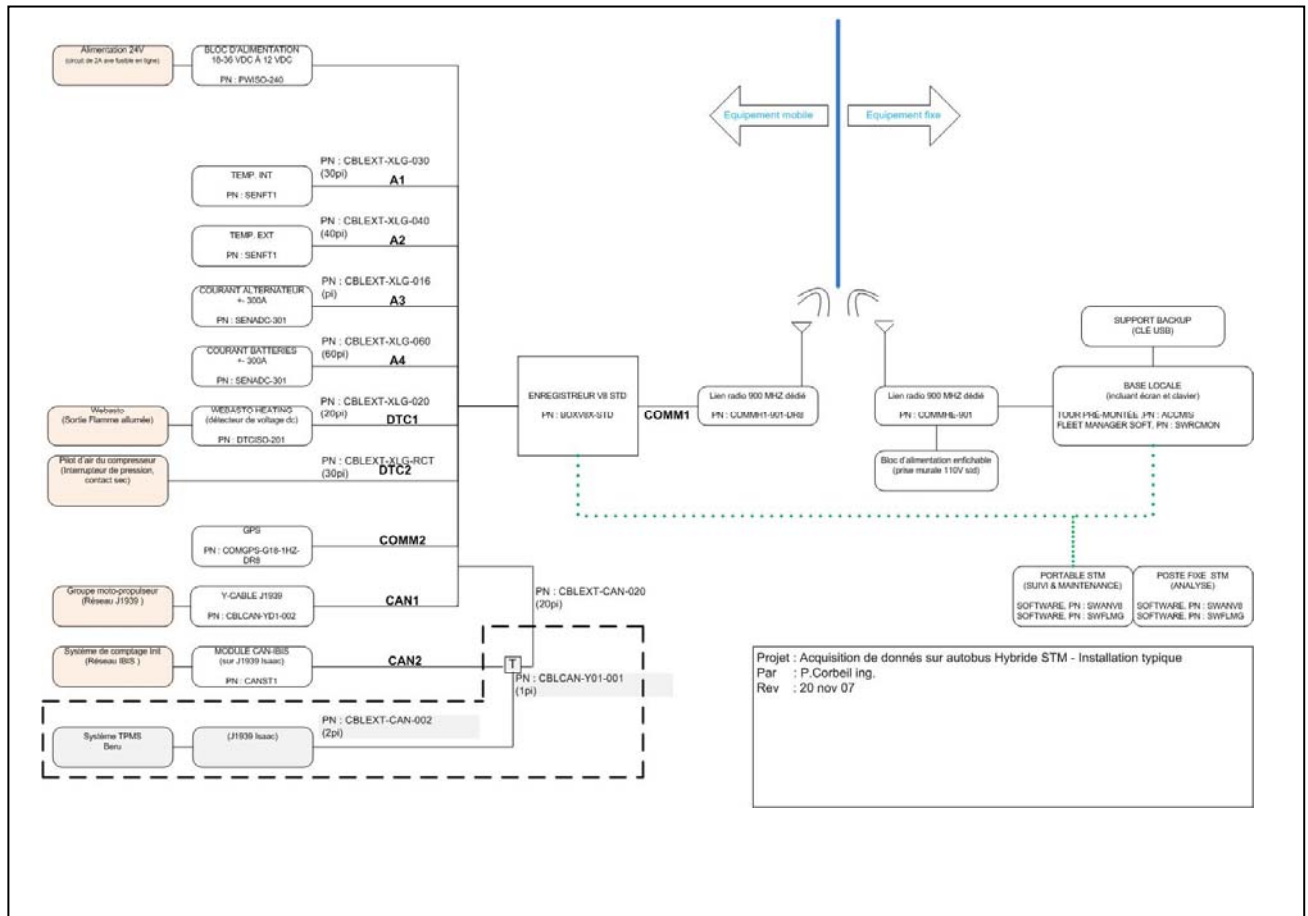
- Un modem 900 Mhz avec antenne à gain élevée (effectue le transfert des données et les mises à jour);
- Ordinateur de table standard avec logiciel Isaac Recorder Monitor.

## 2. Installation

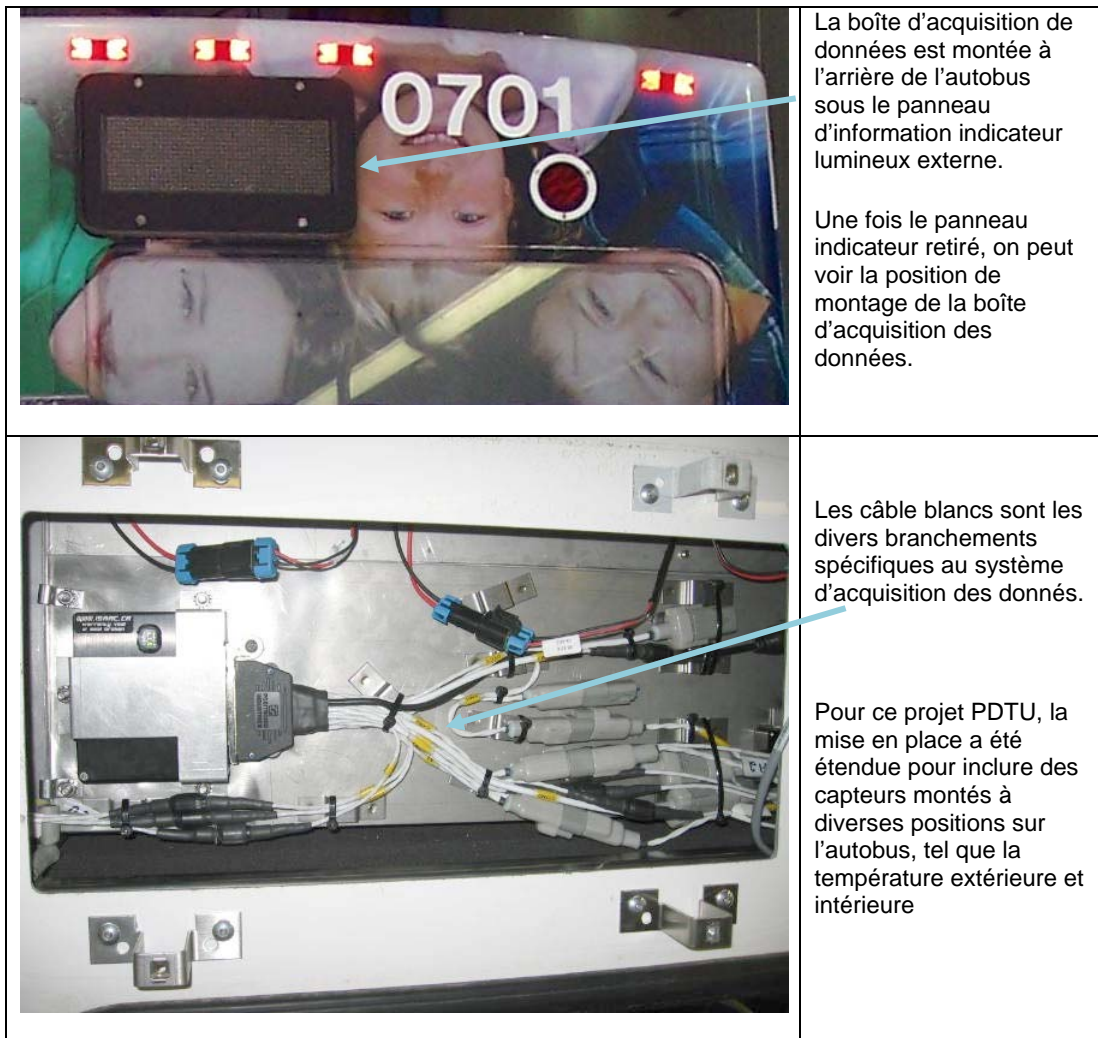
L'installation de l'ordinateur et des différentes interfaces et capteurs a nécessité la conception et la fabrication de plusieurs pièces mécaniques (supports, plaques, attaches, gabarit, etc.). Plusieurs fils et câbles ont dû être fabriqués afin de permettre les interconnexions dans l'autobus.

Typiquement, cette installation du système d'acquisition requiert environ deux journées de travail et une journée pour la fabrication des pièces spéciales. Ceci inclut l'ouverture et le réassemblage de divers panneaux de finition intérieure, derrière lesquels passent plusieurs câbles reliant les capteurs externes à la boîte d'acquisition. L'architecture du branchement est présentée à la Figure B-1. Une illustration de l'installation est présentée à la figure B-2

**Figure B-1 L'architecture du branchement du système d'acquisition des données**



**Figure B-2**      **Système d'acquisition de données Isaac**



### **3. Paramètres mesurés par le système d'acquisition des données**

Quelques 30 paramètres sont mesurés en temps réel et enregistrés sur les huit autobus hybrides et six autobus témoins de la STM ainsi que sur les deux autobus hybrides et sept autobus témoins de la STO. Ces paramètres sont listés au Tableau B-1.

**Tableau B-1 Paramètres mesurés par le système d'acquisition des données**

Paramètre	Unité	Raison
Consommation carburant	l/heure	Mesure dynamique de la consommation en fonction des autres paramètres
Distance	kilomètre	Faire le calcul de consommation l/km
Consommation totale	litre	Faire le calcul de consommation l/km
Courant batterie hybride	ampère	Savoir le niveau d'ampérage récupéré et distribué par la batterie de l'hybride à la transmission Allison
Voltage batterie hybride	volts	Mesurer le niveau de variation du voltage des batteries hybrides
Puissance	watts	Savoir le niveau d'énergie récupéré et distribué par la batterie de l'hybride à la transmission Allison
Position de la pédale de freins	Livres au pouce carré	Savoir quand et comment la pédale de freins est appliquée. L'application de la pédale de freins diminue le niveau de récupération d'énergie au niveau de l'hybride
Position de la pédale d'accélération	%	Savoir quand et comment la pédale d'accélération est appliquée. Le type d'accélération influe énormément la consommation de carburant
Couple moteur	Newton-mètre	Connaître le niveau de puissance développé par le moteur
Accélération 3 axes	G	Connaître les niveaux pentes et topographie des routes
Vitesse roue	kilomètre/heure	Vitesse globale
Températures intérieure et extérieure	° Celsius	Savoir les conditions interne et externe de l'autobus
Chauffage d'appoint	secondes	Connaître le niveau d'utilisation du chauffage d'appoint (4 litres/h)
Compresseur	secondes	Taux de fonctionnement du compresseur, voir si l'impact du 1 000 kg supplémentaire pour l'hybride avait un impact sur la suspension et le besoin en air
Alternateur 24 volts	ampère	Comparer le taux d'utilisation de l'alternateur entre les différents modèles d'autobus
Courant batteries 24 volts	ampère	Mesure le cycle de charge décharge des batteries entre les différents modèles d'autobus
Voltage batteries 24 volts	volts	Mesure le niveau potentiel des batteries 24 volts entre un hybride et un standard afin d'observer si les composantes supplémentaires de l'hybride (ordinateur et autres) demandent plus de puissance aux batteries et savoir si la consommation de carburant peut être utilisée pour recharger les batteries 24 volts, après une longue période d'arrêt
GPS 3 axes	degrés	Positionnement de l'autobus et comparaison de la consommation en fonction de la topographie
Compte-personnes	unitaire	Comparaison de la consommation en fonction de la charge-personnes
Ventilateur hydraulique	secondes	Connaître le taux d'utilisation du ventilateur hydraulique et son impact sur la consommation
Température liquide de refroidissement	° Celsius	Connaître la température du moteur et l'impact sur la consommation
Vitesse de rotation du moteur	Révolutions par minutes	Permettre de calcul de puissance moteur et faire un parallèle avec la consommation de carburant
Taux d'utilisation ventilateur hydraulique pour radiateur moteur	secondes	Mesure l'impact de l'utilisation du système hydraulique sur la consommation de carburant et la température moteur
Air climatisé	secondes	Mesure l'impact de l'utilisation de l'air climatisé sur la consommation de carburant
Pression de pneu par RFID	Livres au pouce carré	Un mauvais niveau pression des pneus peut faire varier la consommation de carburant de l'ordre de 6 %, un autobus était instrumenté 28-707
Régénération du filtre à particules	secondes	La régénération consomme 10 l/h, connaître l'impact sur la consommation de carburant et le nombre de régénérations par km
Usure des freins	pouces	Connaître le taux d'usure des freins entre les différents modèles d'autobus
Température du système catalytique	° Celsius	La régénération consomme 10 l/h, connaître l'impact sur la consommation de carburant et le nombre de régénérations par km
Temps d'opération total moteur	secondes	Pour calculer la vitesse moyenne totale de l'autobus
Nombre de révolution total moteurs	unitaires	Paramètre de base
Temps	secondes	Paramètre de base



## **Annexe C**

---

**Résultats des essais aux laboratoires  
d'Environnement Canada**

## 1. Introduction

Les résultats montrés ci-après proviennent des essais réalisés aux laboratoires d'Environnement Canada en février 2008. Ils ont été tirés du document « Évaluation et comparaison de la consommation de carburant et des gaz d'échappement produits par cinq autobus urbains ayant des systèmes de propulsions différents, à des températures de +20 deg C, -20 deg C avec et sans air climatisé ». Le rapport complet SRME N°08-34, est disponible auprès d'Environnement Canada.

## 2. Sommaire du rapport d'Environnement Canada

«Environnement Canada, par l'entremise de la Section Recherche et mesure des émissions (SRMÉ), s'est joint au Centre d'évaluation des véhicules électrique (CÉVEQ) pour faire une étude comparative de la consommation de carburant et de gaz polluants émis par des autobus urbains Nova LFS Hybride répondant aux normes antipollution de 2006 et de 2008, ainsi que des autobus à propulsion conventionnelle répondant aux normes antipollution de 2006 et 2008 avec des moteurs de 280 et 250 cv. Les essais furent faits dans différentes conditions climatiques, soit à +20 degré C et -20 degré C et, dans certains cas, avec air climatisé.

Les essais ont été faits aux laboratoires de la Section Recherche et mesure des émissions d'Environnement Canada à Ottawa sur un dynamomètre à rouleaux pouvant simuler la charge à la roue produite par l'inertie et l'aérodynamique de l'autobus. Le protocole d'essais utilisé est la méthode reconnue pour les essais sur dynamomètres à rouleaux et système d'échantillonnage à débit constant (CVS). Le cycle de conduite utilisé est le circuit Manhattan.

Les essais comparatifs entre l'autobus hybride 2008 et les 2 autres autobus conventionnels 2008 ont indiqué que l'autobus hybride à +20°C utilise 35 % moins de carburant que l'autobus de 280 cv conventionnel et 27 % de moins que l'autobus de 250 cv conventionnel. À -20°C, la différence est de 24 % et 15 %.

L'autobus conventionnel (STM) de 250 cv utilise 11 % moins de carburant que l'autobus conventionnel (STM) de 280 cv.

Les autobus de 2007 (STO) utilisent moins de carburant que les autobus de 2008 (STM) de 250 et 280 cv; par contre, ils émettent plus de NO<sub>x</sub> et de particules de fumée.

Les autobus (STO) utilisent plus de carburant lorsque l'air climatisé fonctionne et émettent plus de polluants.

Cette étude inclus 5 autobus différents mis à l'essai dans 2 différents scénarios chacun, ce qui produit 16 différents scénario de comparaison. Le rapport qui suit inclut les résultats de chaque autobus, ainsi que les différences entre autobus et type d'utilisation selon les 16 différents scénarios de comparaison.»

### 3. Résultats pour les autobus de la STO avec technologie moteur conforme à la norme EPA 2002

Figure C-1 Monoxyde de carbone

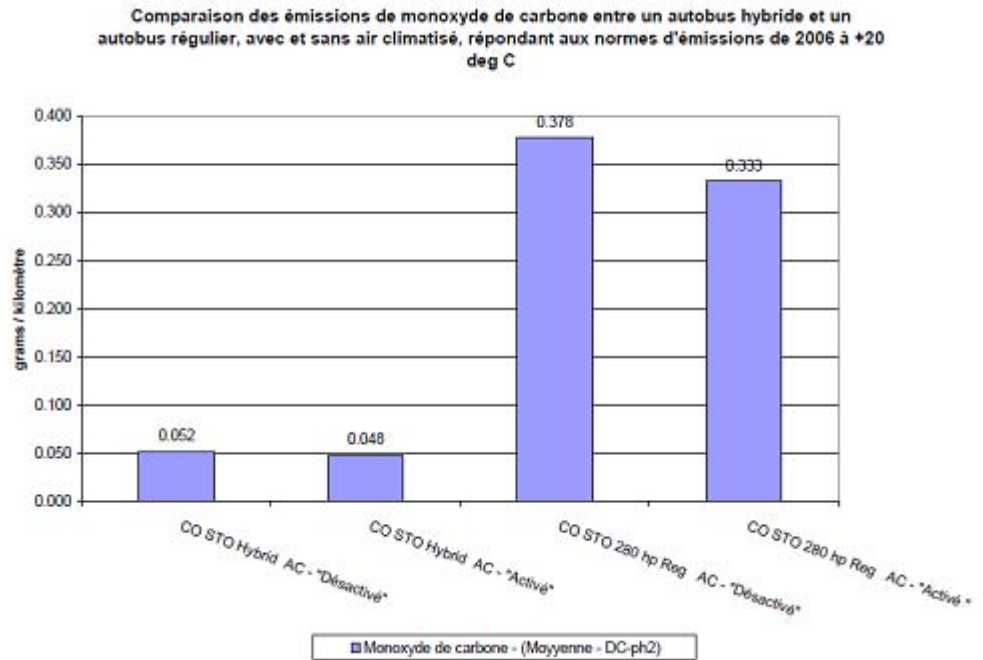
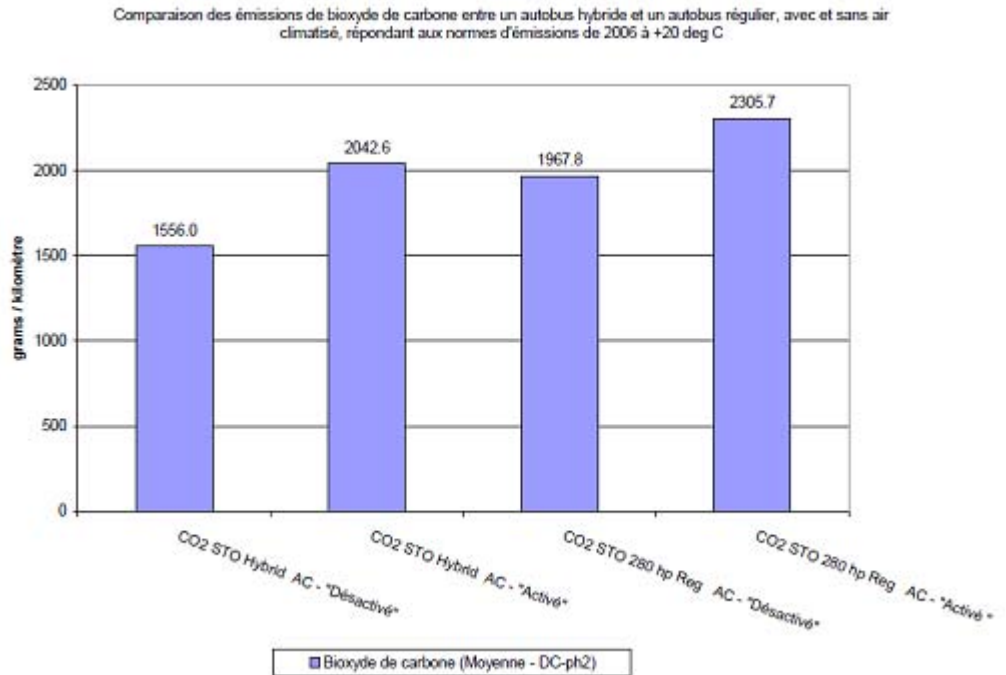
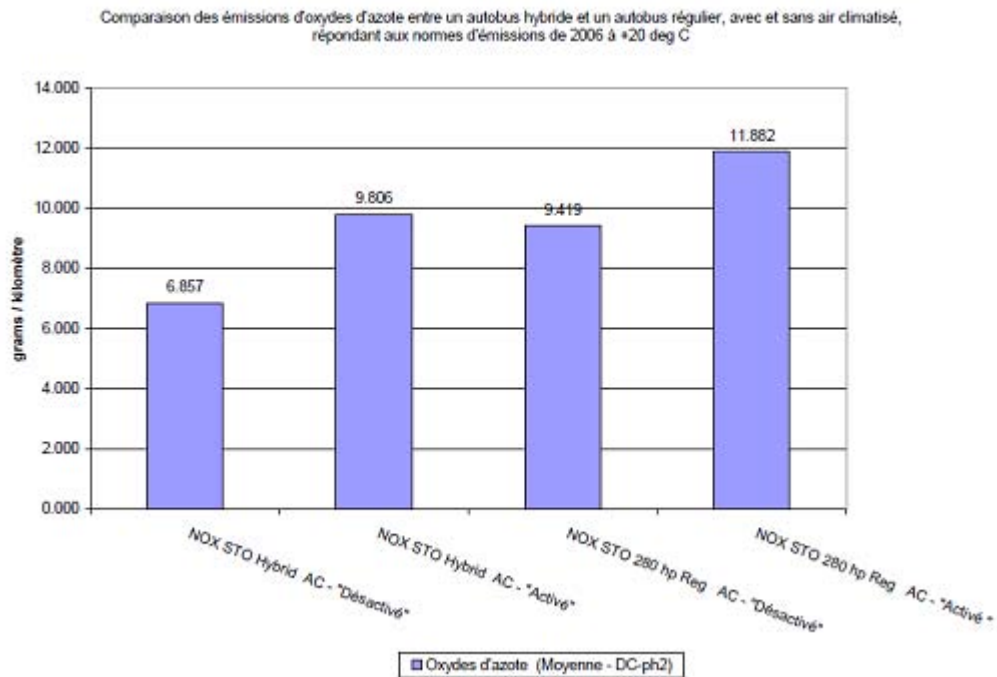


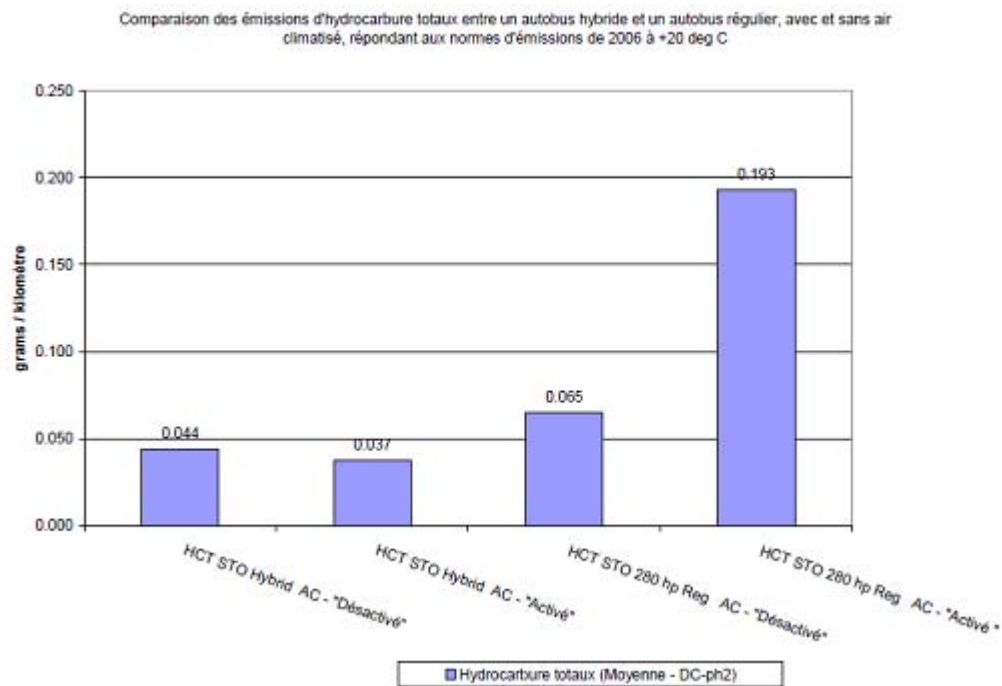
Figure C-2 Bioxyde de carbone



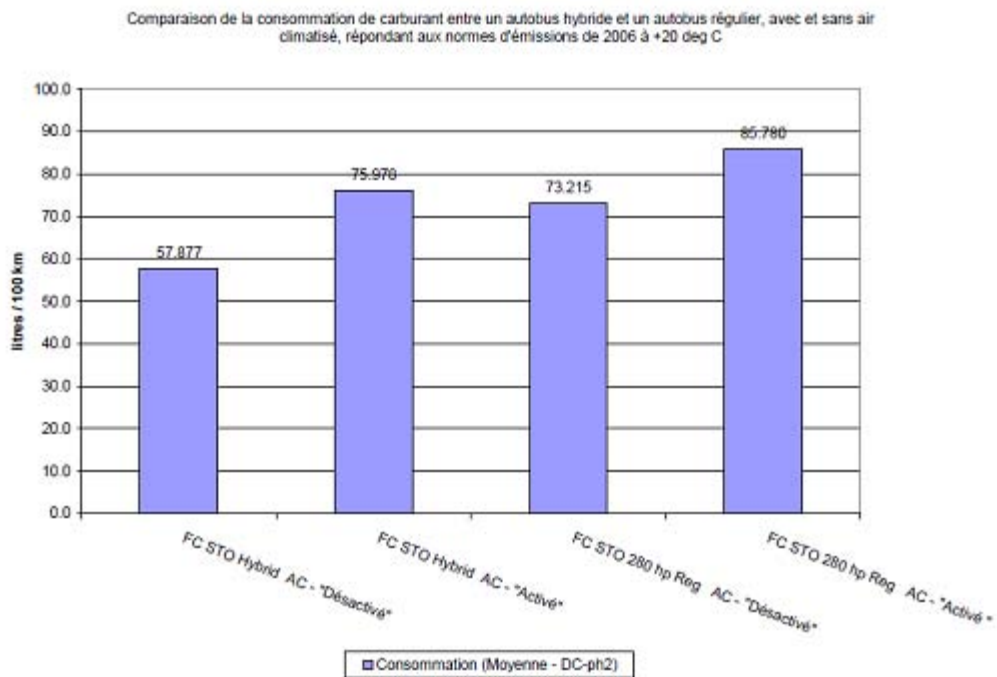
**Figure C-3 Oxyde d'azote (NO<sub>x</sub>)**



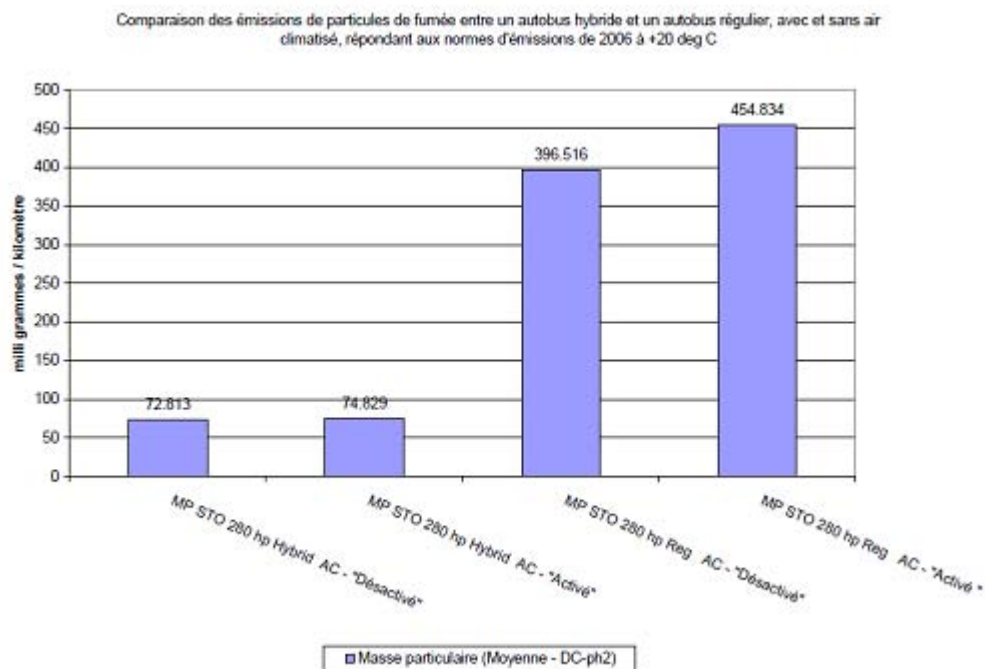
**Figure C-4 Hydrocarbures totaux (HCT)**



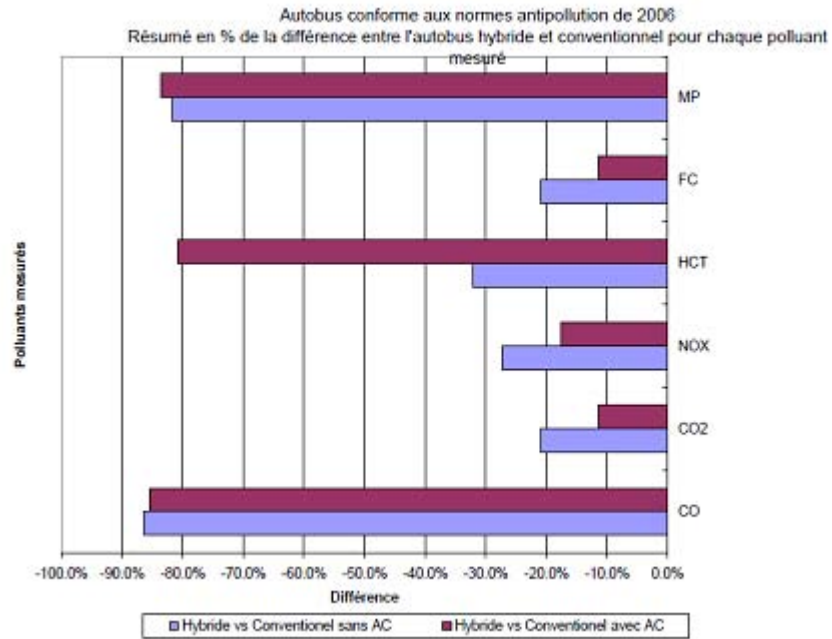
**Figure C-5 Consommation de carburant**



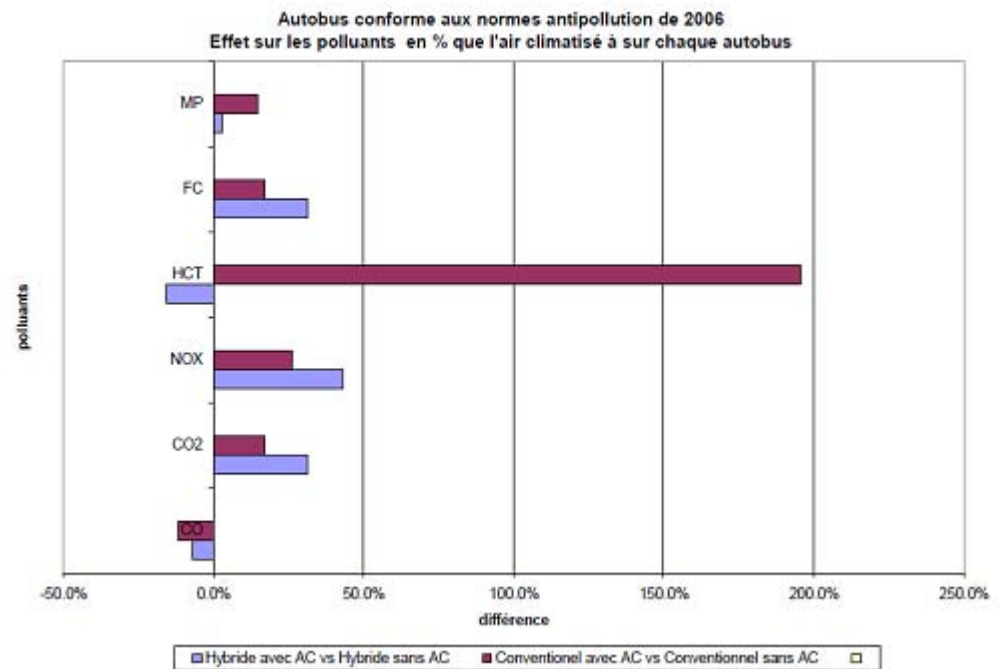
**Figure C-6 Masse particulaire**



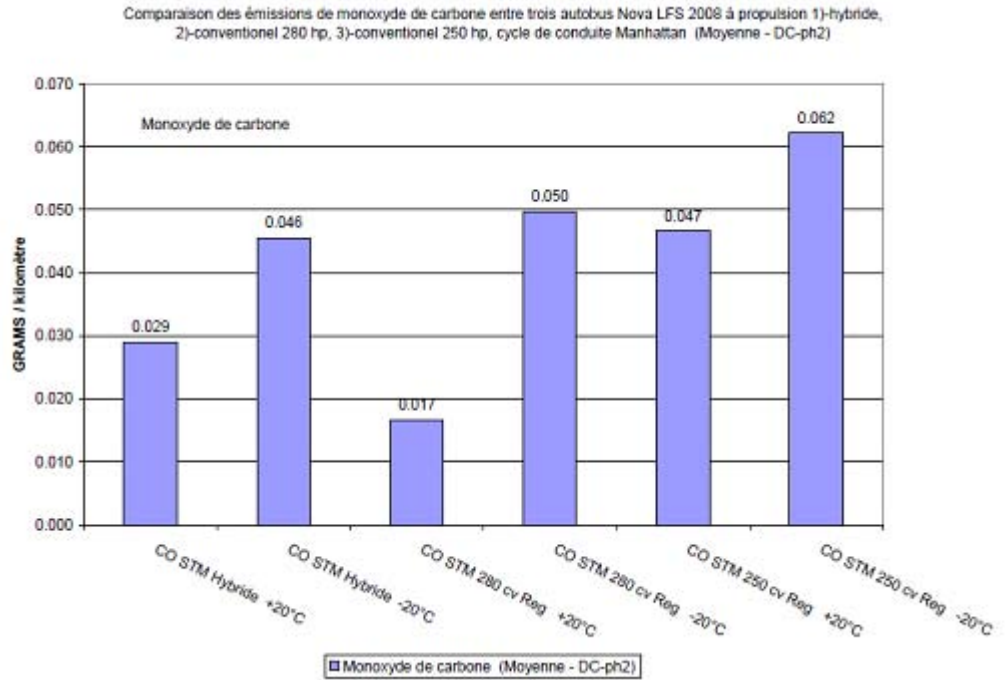
**Figure C-7** Différence des émissions produites, en %, entre les autobus standard et hybrides.



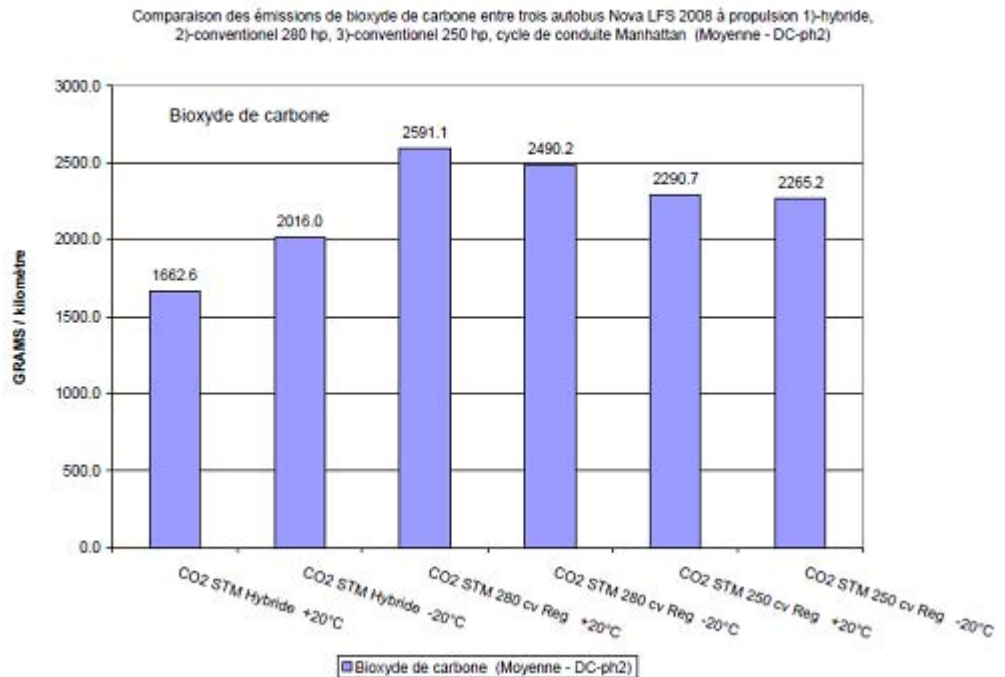
**Figure C-8** Impact de l'air climatisé sur les émissions produites, en %.



**4. Résultats pour les autobus de la STM avec technologie moteur conforme à la norme EPA 2007**  
**Figure C-9 Monoxyde de carbone**

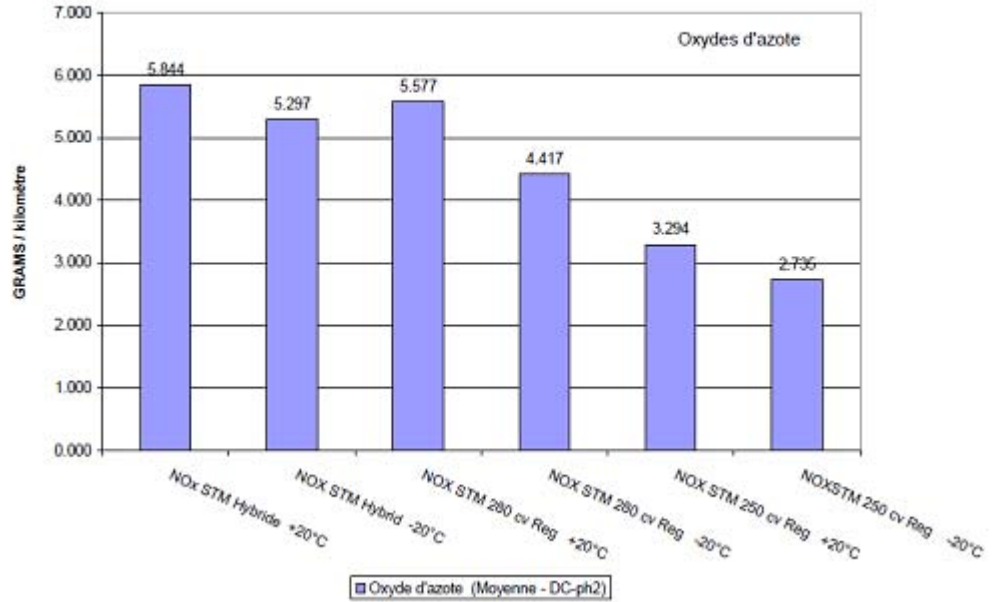


**Figure C-10 Bioxyde de carbone**



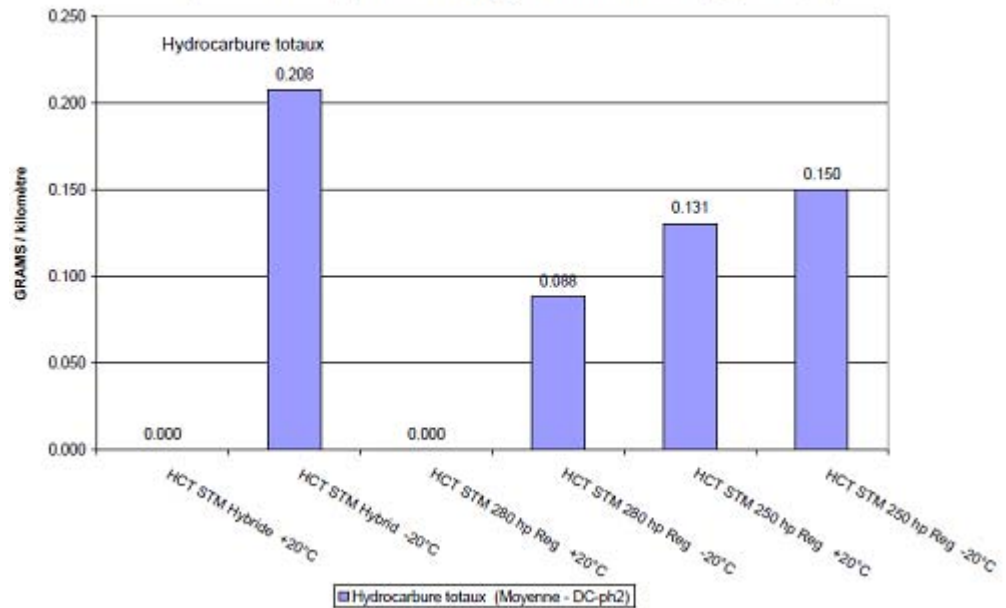
**Figure C-11 Oxyde d'azote (NOX)**

Comparaison des émissions d'oxydes d'azote entre trois autobus Nova LFS 2008 à propulsion 1)-hybride, 2)-conventionnel 280 hp, 3)-conventionnel 250 hp, cycle de conduite Manhattan (Moyenne - DC-ph2)



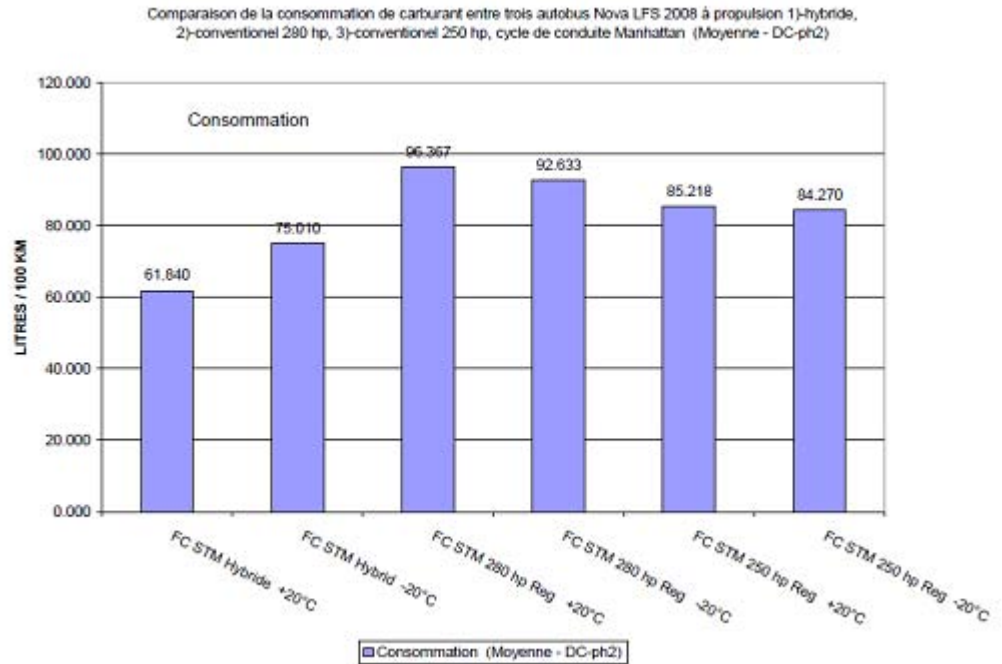
**Figure C-12 Hydrocarbures totaux (HCT)**

Comparaison des émissions d'hydrocarbure totaux entre trois autobus Nova LFS 2008 à propulsion 1)-hybride, 2)-conventionnel 280 hp, 3)-conventionnel 250 hp, cycle de conduite Manhattan (Moyenne - DC-ph2)

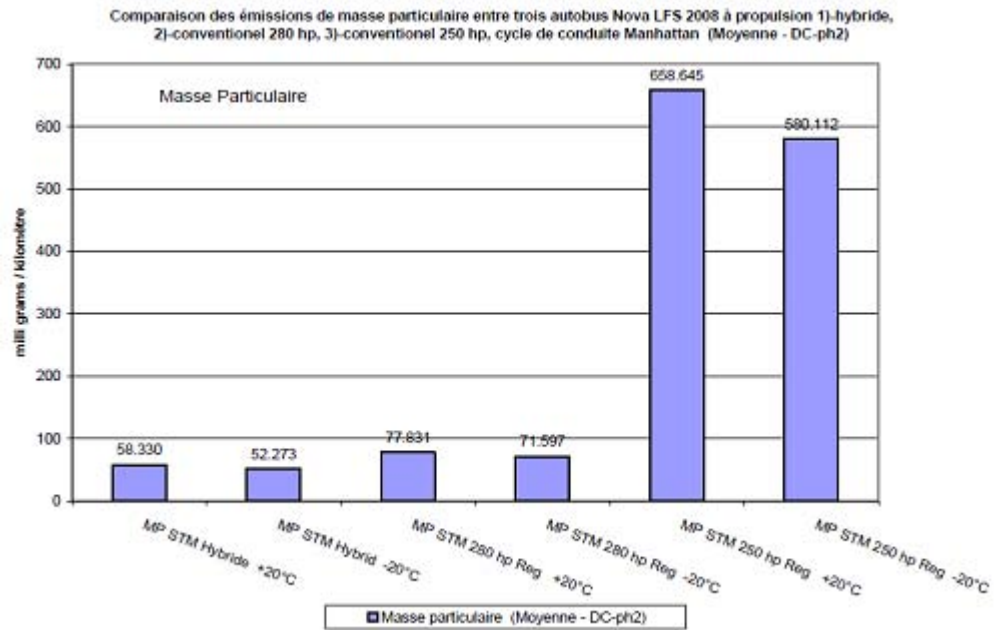




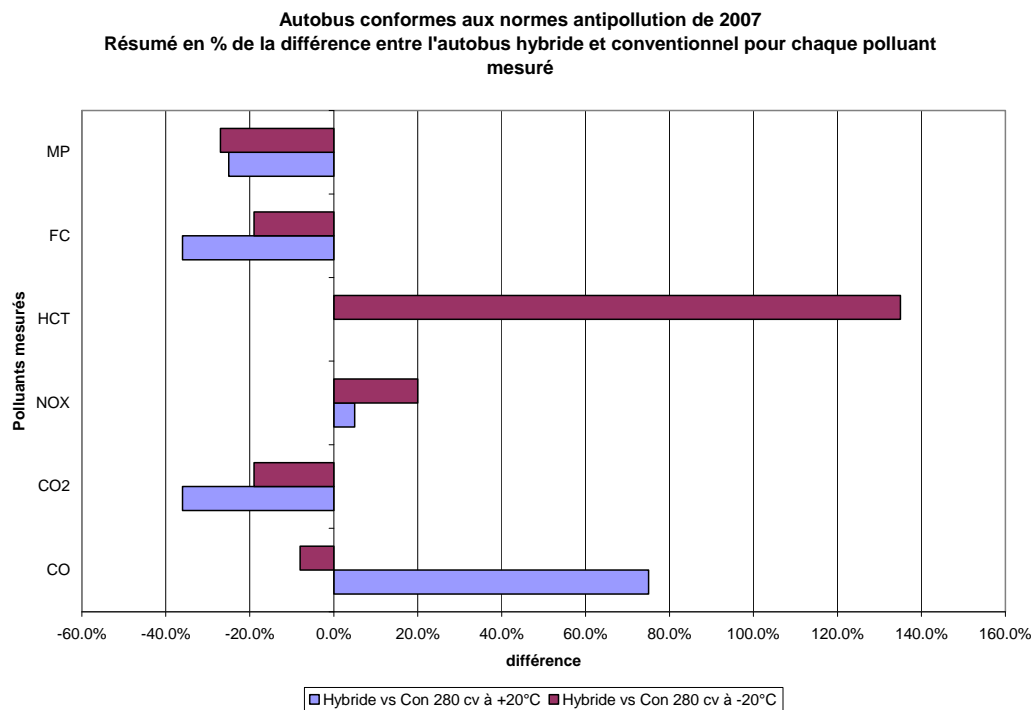
**Figure C-13 Consommation de carburant**



**Figure C-14 Masse particulaire**



**Figure C-15** Différence des émissions produites, en %, entre les autobus standard et hybrides qui sont conformes à la norme EPA 2007.



## 5. Classement des autobus du moins au plus polluant

Le tableau suivant classe les autobus selon le rang obtenu pour chaque polluant mesuré : 1 étant le meilleur et 5 le pire résultat. Dans ce tableau, chaque polluant est traité comme ayant la même importance. Le classement final peut changer si plus d'importance est accordé à un polluant par rapport à un autre.

**Tableau C-1 Classement des autobus, par rang, selon les résultats obtenus pour chacun des polluants.**

	Hybride STM (EPA 2007) 280 CV	Hybride STO (EPA 2002) 280 CV	Standard STM (EPA 2007) 280 CV	Standard STM (EPA 2007) 250 CV	Standard STO (EPA 2002) 280 CV
Polluant mesuré					
CO	2	3	1	4*	5
CO <sub>2</sub>	2	1	5	4	3
NO <sub>x</sub>	3	5	2	1	4
THC	1	2	1	4*	3
FC	2	1	5	4	3
MP	1	2	3	5*	4
TOTAL	11	14	17	22	22
Classement final	1	2	3	égal 4 & 5	égal 4 & 5

\*Le filtre à particule de l'autobus était fissuré, ce qui a pour effet d'augmenter les valeurs mesurées.

Ainsi les résultats indiquent :

- La propulsion hybride émet moins de polluants que la propulsion standard.
- La technologie qui satisfait les normes EPA 2007 est plus efficace que la technologie qui satisfait les normes EPA 2002.

## **Annexe D**

---

### **Résultats des analyses en service clientèle**

## 1. Résultats spécifiques à la STM

Les résultats présentés ci-après sont ceux obtenus suite à une année complète de cueillette de données provenant des autobus de la STM. Les températures maximales, minimales et moyennes enregistrées sont les suivantes :

- Température quotidienne minimale : -28,5 degrés Celsius
- Température quotidienne maximale : 33,4 degrés Celsius
- Température quotidienne moyenne : 6,56 degrés Celsius

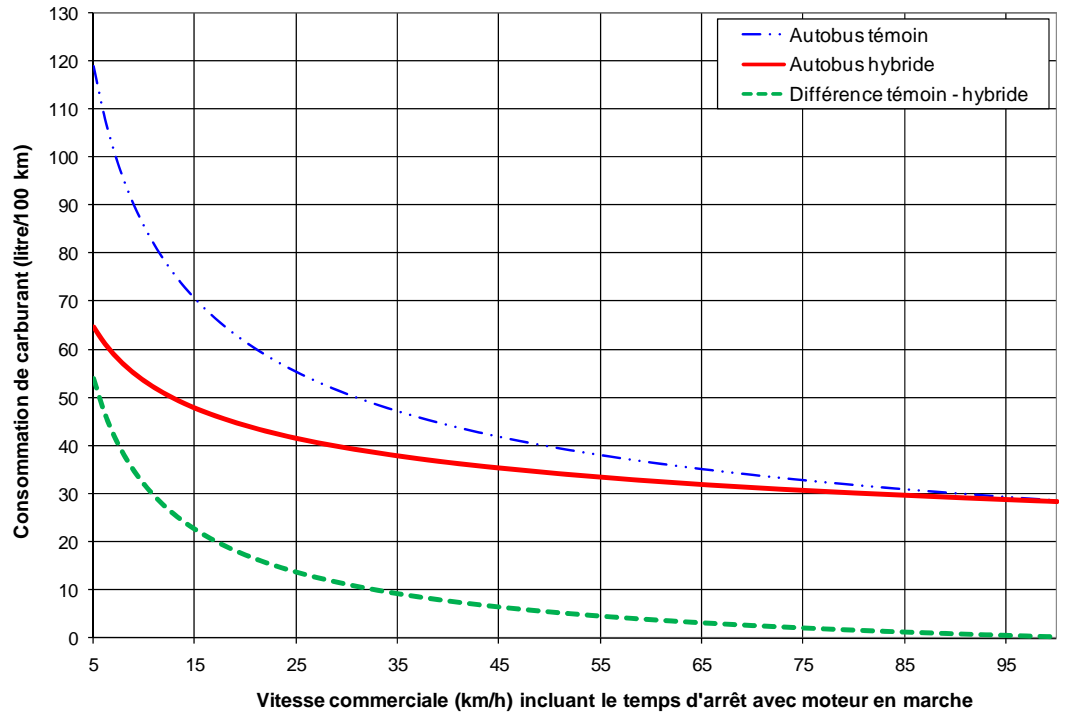
Le nombre d'arrêt par kilomètre et le ratio de temps passé au ralenti ont été calculés pour une série de vitesses moyennes. Les résultats sont présentés au tableau qui suit :

**Tableau D-1 : Nombre d'arrêt par kilomètre et ratio de temps ralenti calculés en fonction de la vitesse moyenne**

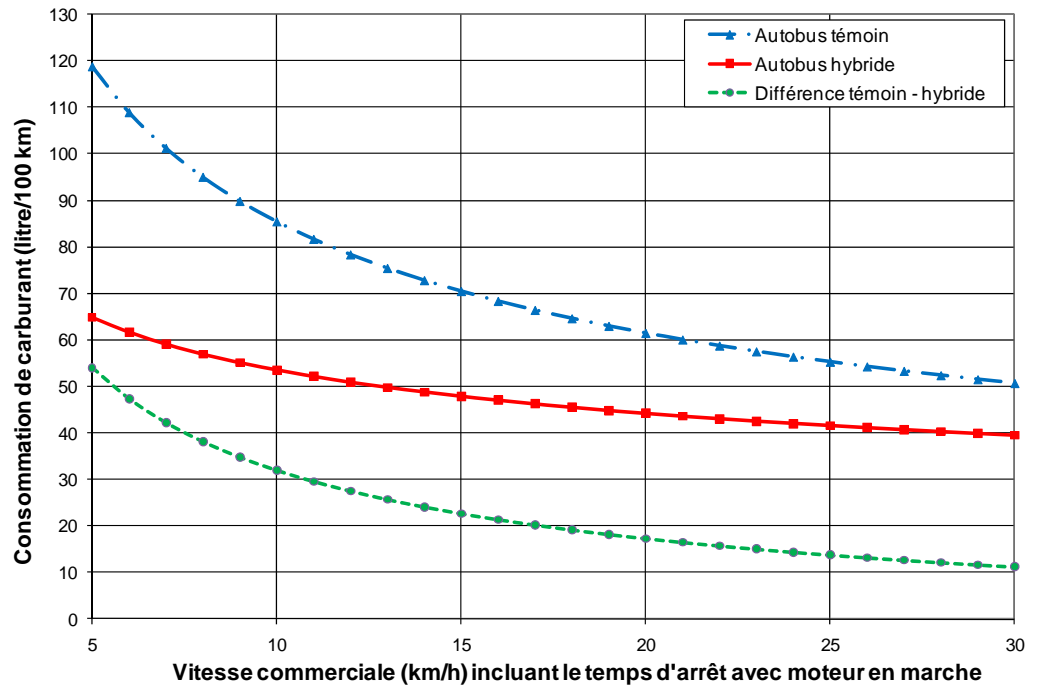
Vitesse moyenne (km/h)	Nombre d'arrêt par kilomètre	Pourcentage de temps ralenti (idle)
10	Témoins : 5,9 Hybrides : 5,8	Témoins : 42,8 % Hybrides : 33,5 %
20	Témoins : 2,7 Hybrides : 2,4	Témoins : 22,2 % Hybrides : 15,2 %
30	Témoins : 1 Hybrides : 0,9	Témoins : 11,3 % Hybrides : 8,3 %
40	Témoins : 0,5 Hybrides : 0,4	Témoins : 8,5 % Hybrides : 6,7 %
Moyenne de tous les essais	3,77	34 %

**Note :** les résultats présentés pour les autobus témoins ont été calculés à partir des données recueillies sur les autobus équipés de moteurs de 250 cv et de 280 cv, la consommation étant relativement similaire pour les deux types d'autobus.

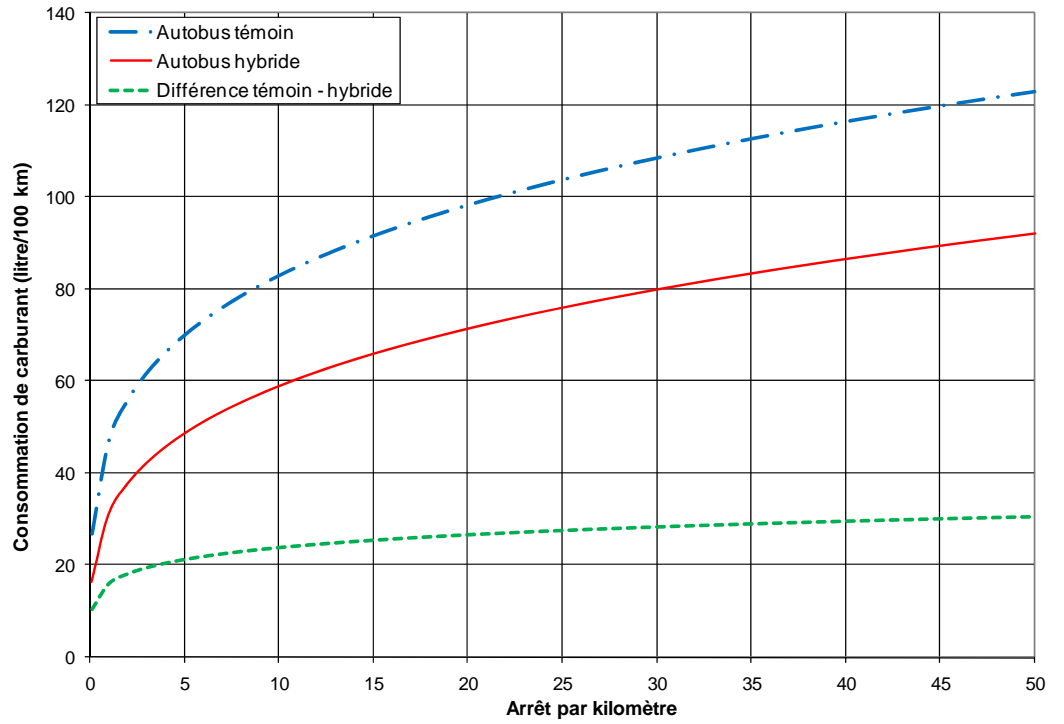
**Figure D-1 Consommation en fonction de la vitesse moyenne – Plein format**



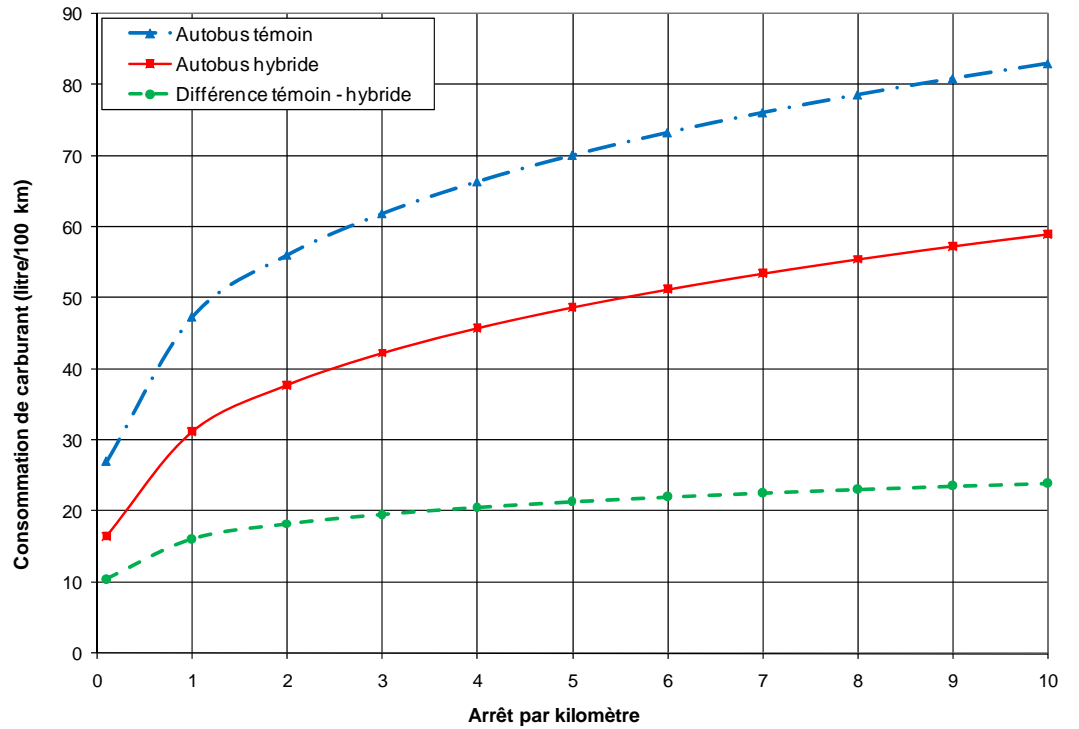
**Figure D-2 Consommation en fonction de la vitesse moyenne – Zoom**



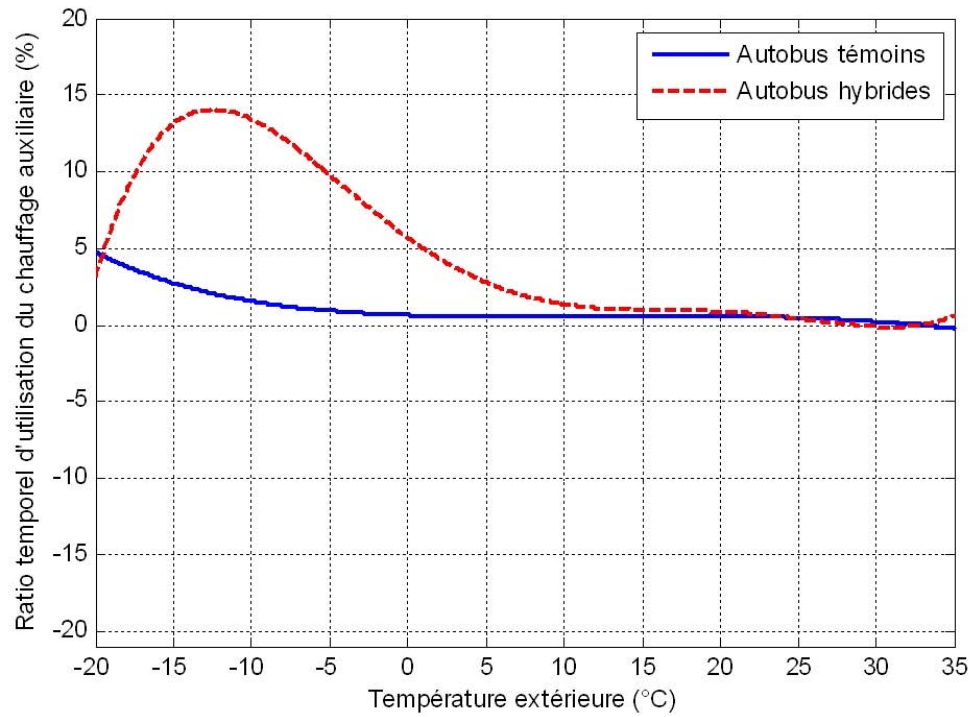
**Figure D-3 Consommation en fonction du nombre d'arrêts**



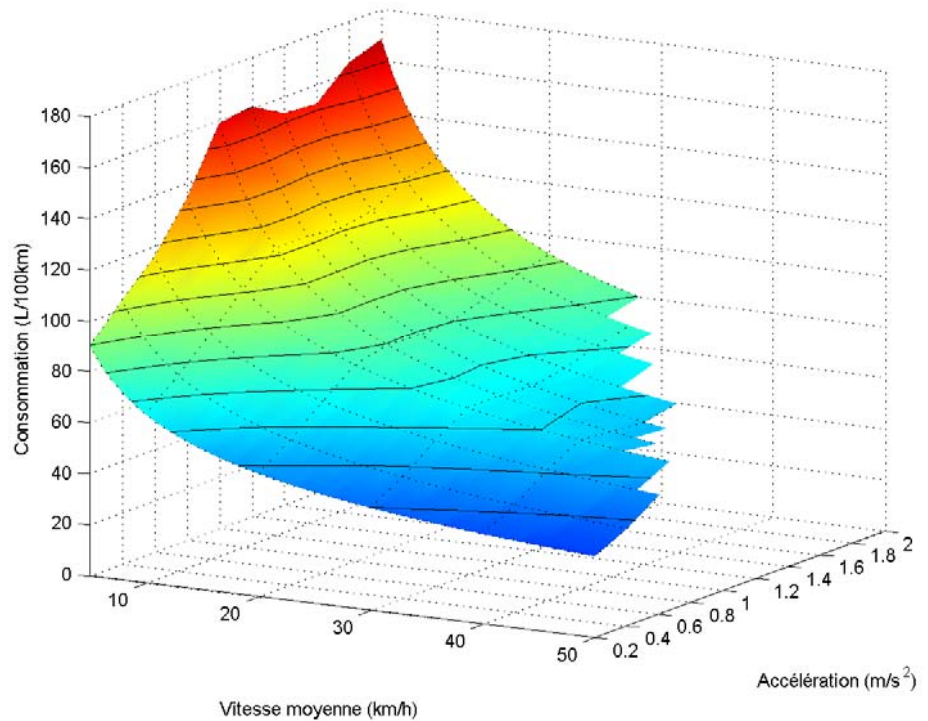
**Figure D-4 Consommation en fonction du nombre d'arrêts – zoom**



**Figure D-5** Utilisation du chauffage auxiliaire en fonction de la température extérieure (Webasto)

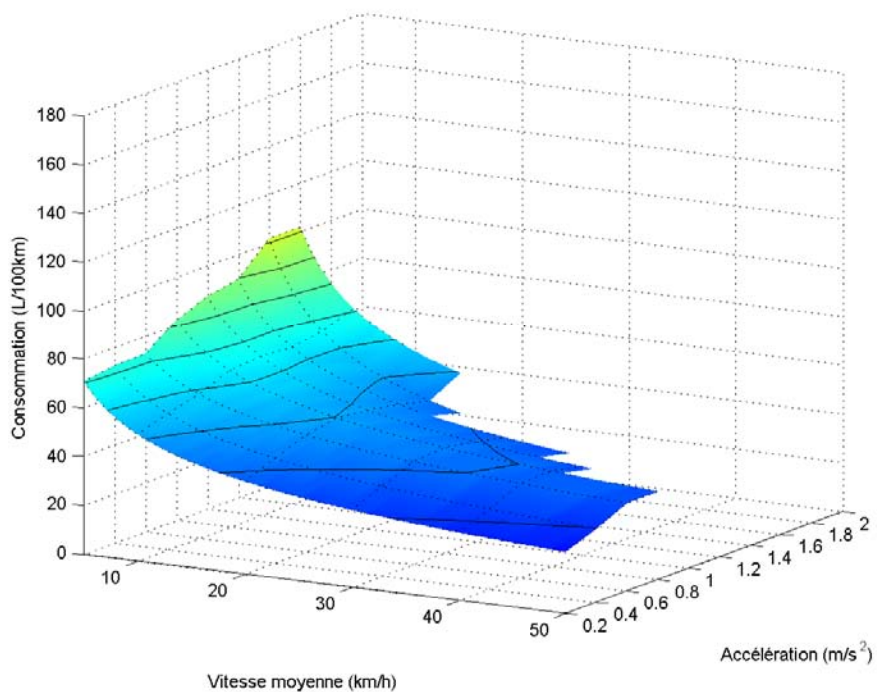


**Figure D-6** Consommation de carburant en fonction de la vitesse moyenne et du taux moyen d'accélération - Autobus témoin 2008

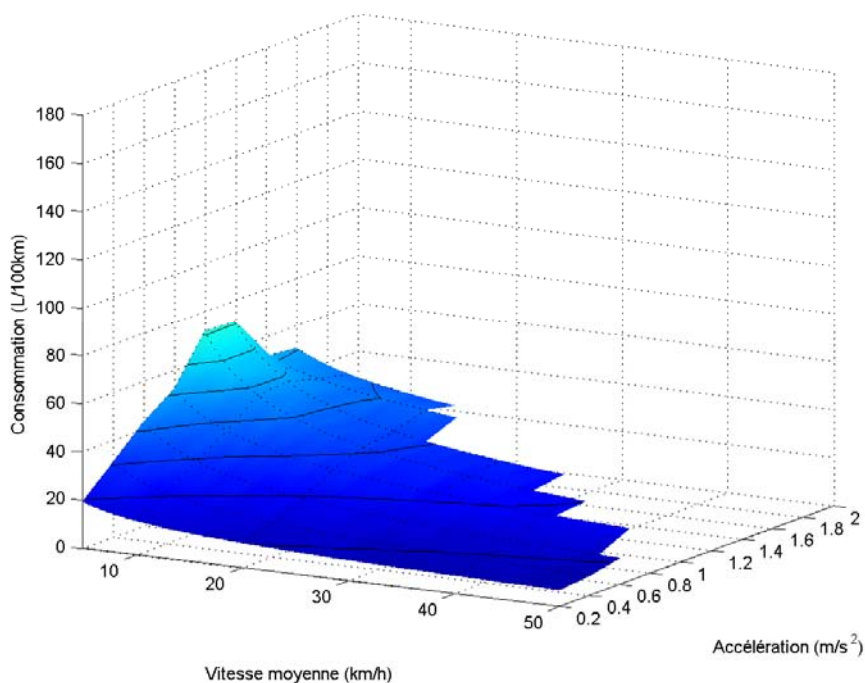




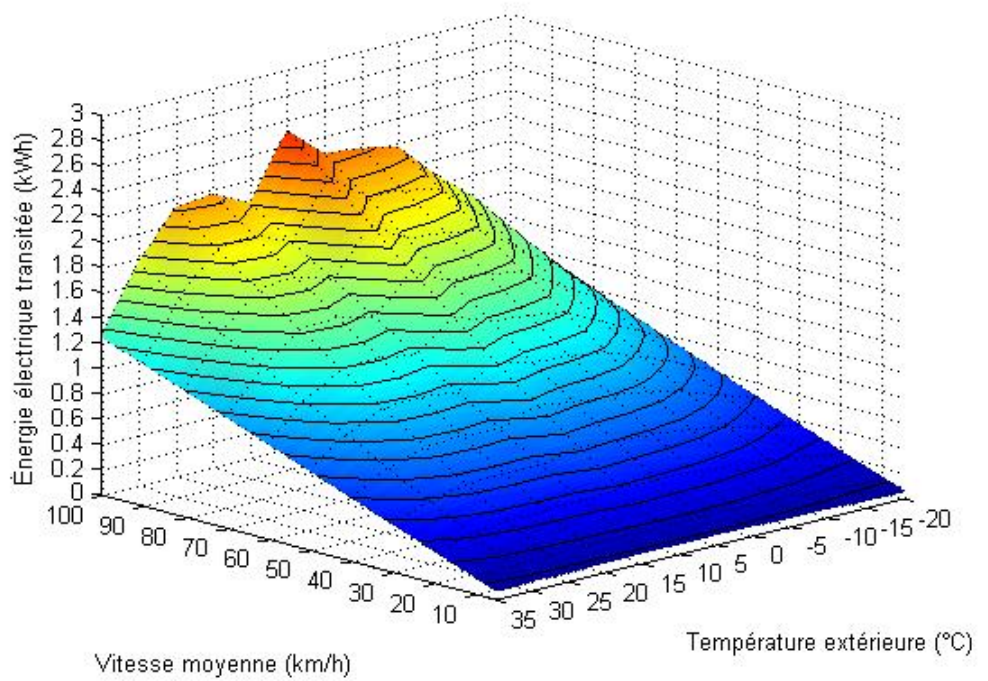
**Figure D-7** Consommation de carburant en fonction de la vitesse moyenne et du taux moyen d'accélération- Autobus hybride 2008



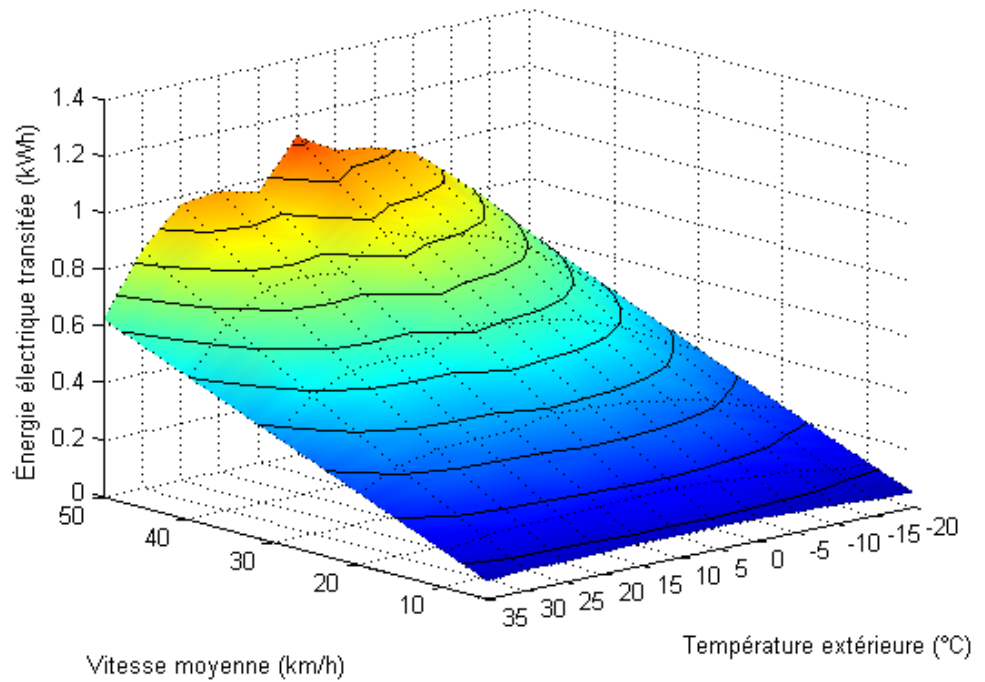
**Figure D-8** Consommation de carburant en fonction de la vitesse moyenne et du taux moyen d'accélération autobus témoins 2008 - Différence entre les autobus témoins et hybrides



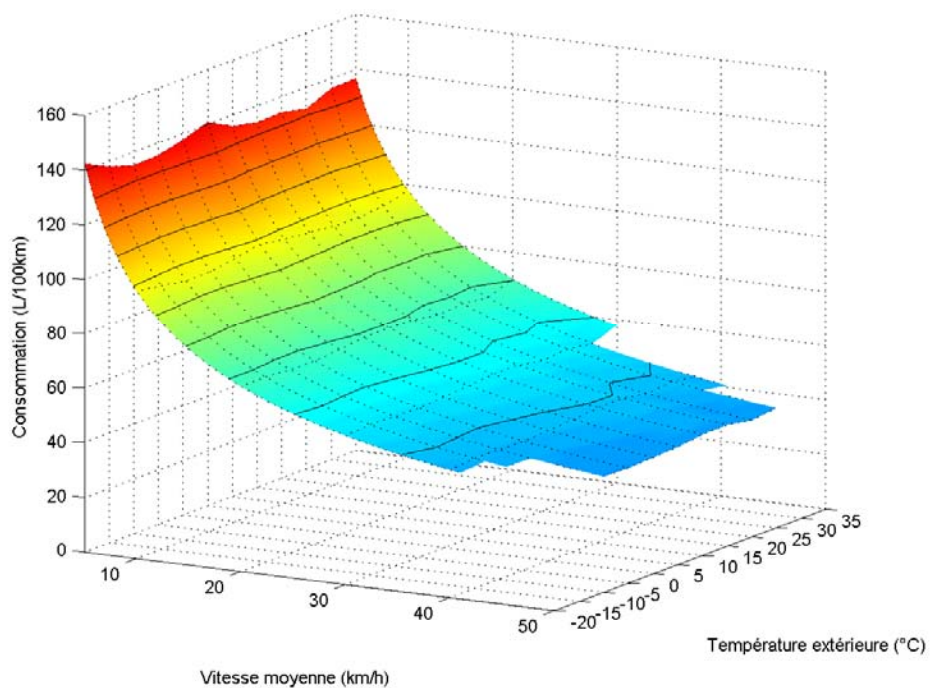
**Figure D-9** Énergie électrique transitée en fonction de la vitesse moyenne et de la température extérieure - Autobus hybride 2008



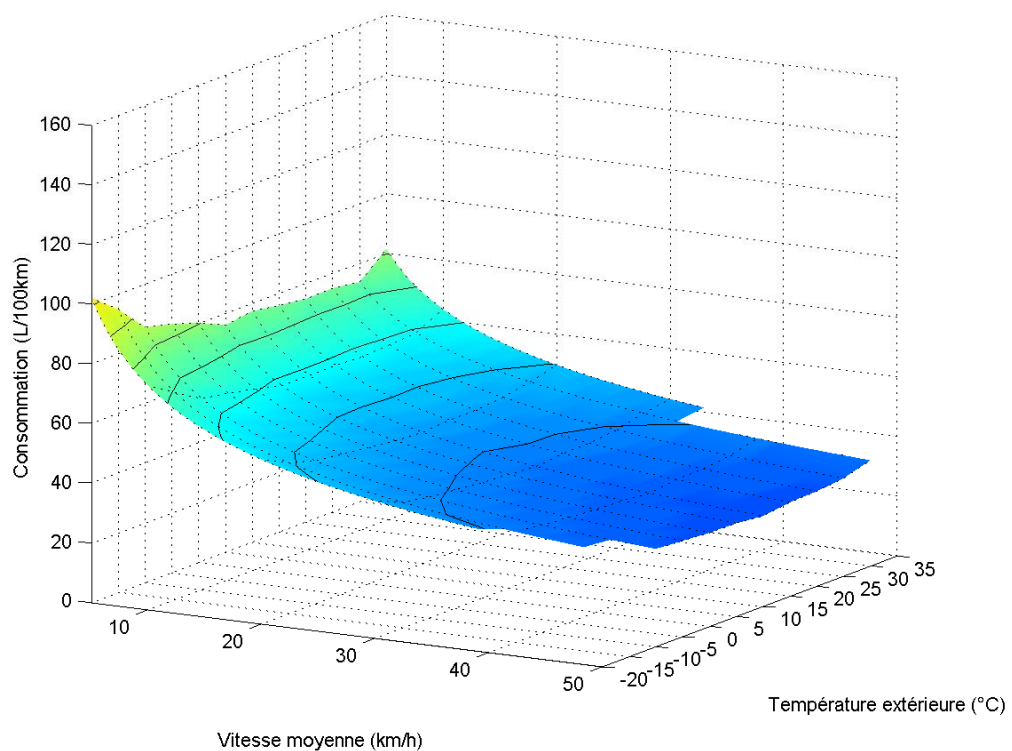
**Figure D-10** Énergie électrique transitée en fonction de la vitesse moyenne et de la température extérieure - Autobus hybride 2008 - Zoom



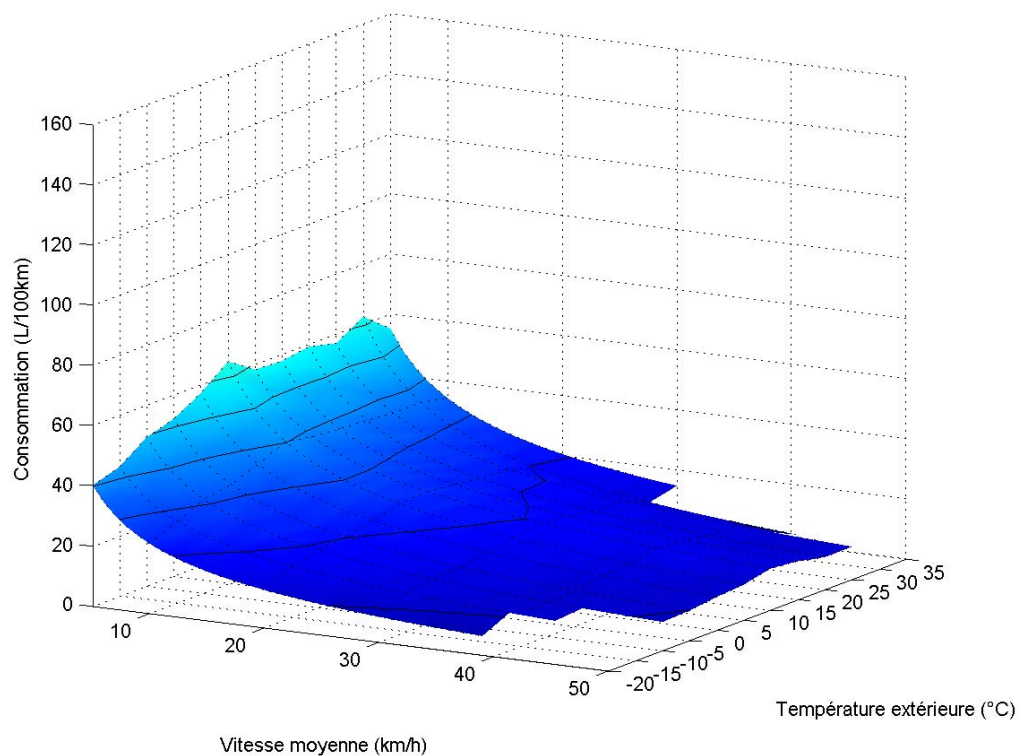
**Figure D-11** Consommation de carburant en fonction de la vitesse moyenne et de la température extérieure - Autobus témoin 2008



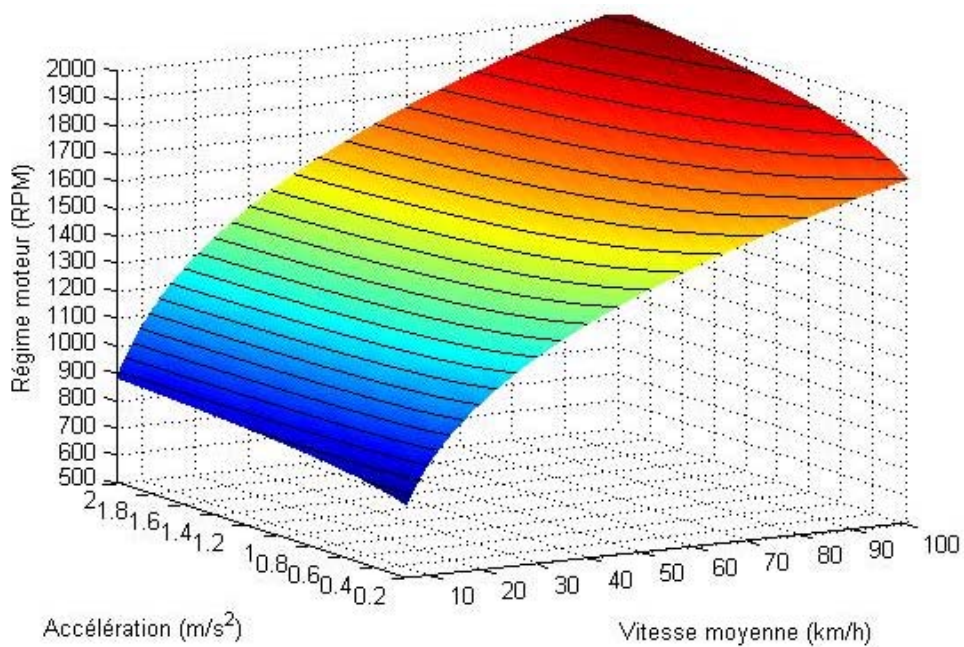
**Figure D-12** Consommation de carburant en fonction de la vitesse moyenne et de la température extérieure - Autobus hybride 2008



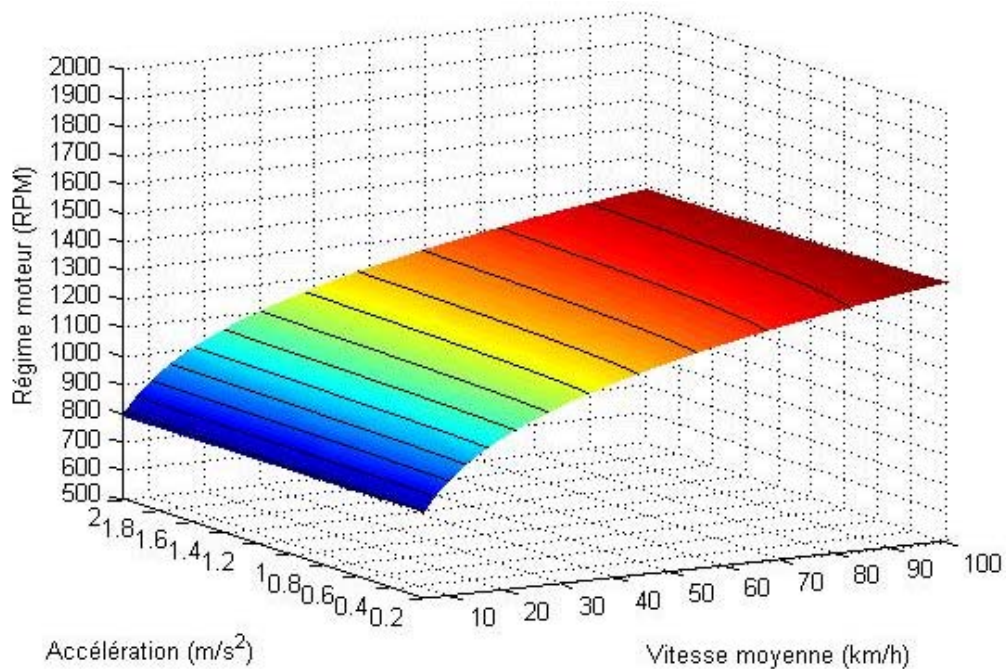
**Figure D-13** Consommation de carburant en fonction de la vitesse moyenne et de la température extérieure - Différence entre les autobus 2008 témoins et hybrides



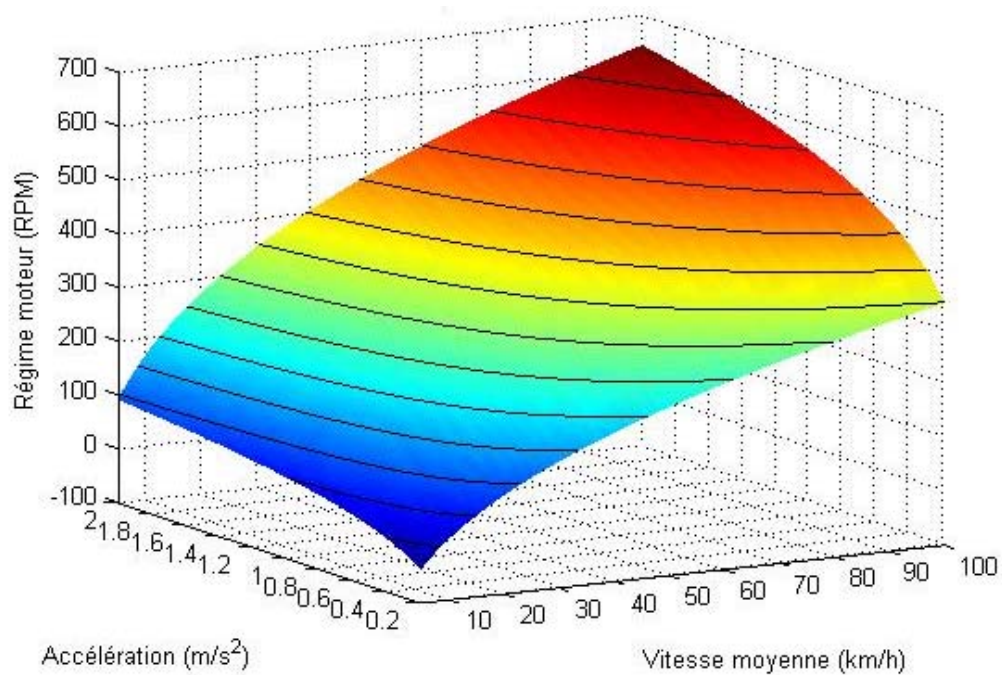
**Figure D-14** Régime du moteur diesel en fonction de la vitesse moyenne et de l'accélération - autobus témoins 2008



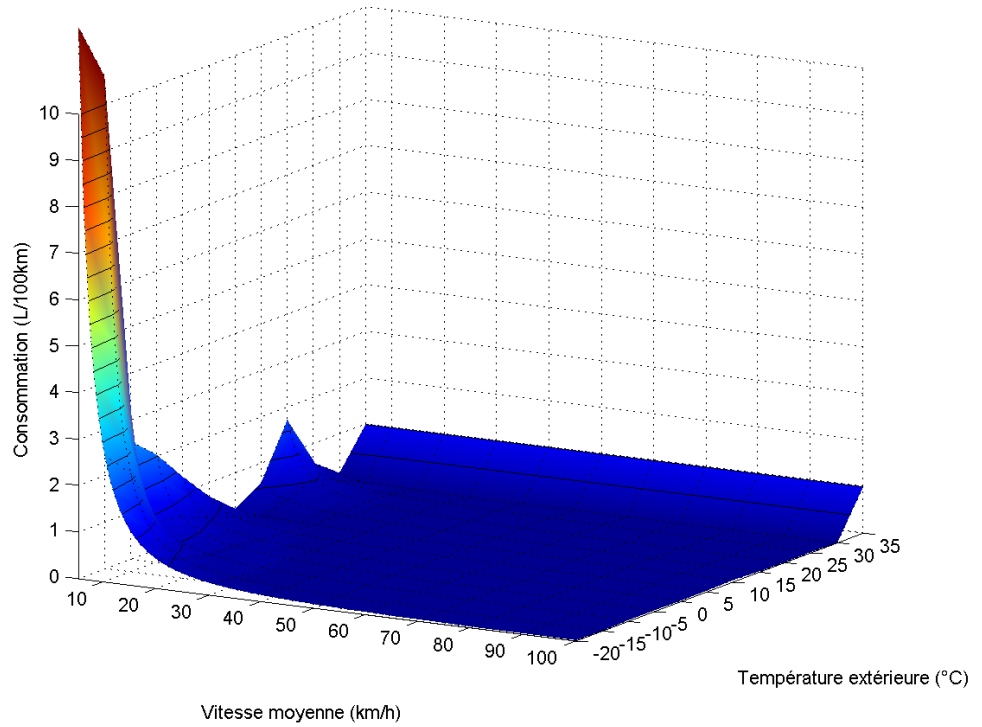
**Figure D-15 Régime du moteur diesel en fonction de la vitesse moyenne et de l'accélération - autobus hybride 2008**



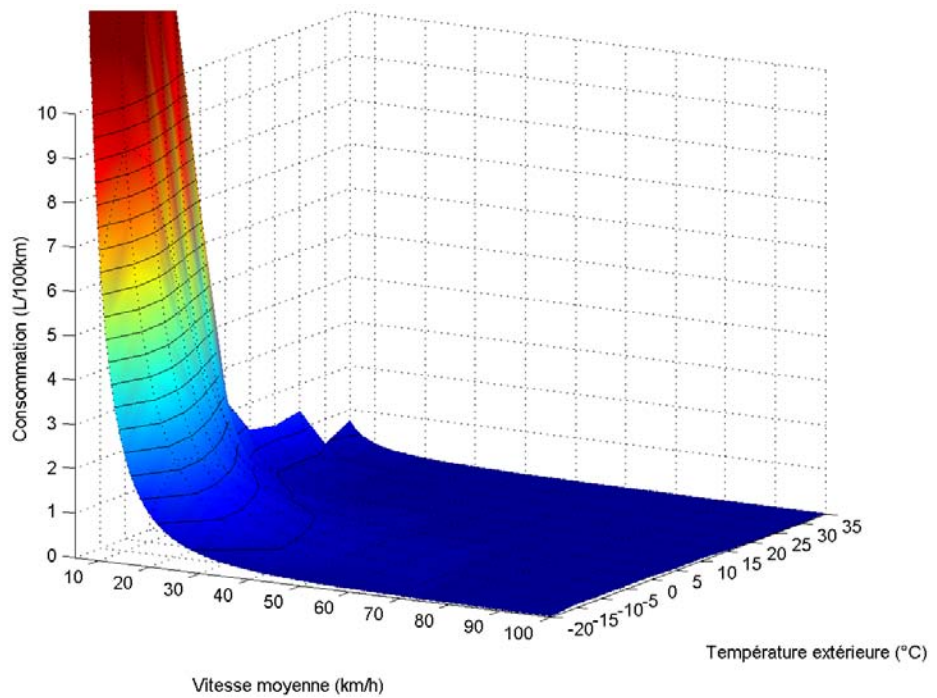
**Figure D-16 Régime du moteur diesel en fonction de la vitesse moyenne et de l'accélération - Différence entre les autobus témoins et hybrides 2008**



**Figure D-17** Consommation équivalente de diesel du chauffage d'appoint en fonction de la vitesse moyenne et de la température extérieure - Autobus témoins 2008



**Figure D-18** Consommation équivalente de diesel du chauffage d'appoint en fonction de la vitesse moyenne et de la température extérieure - Autobus hybrides 2008



## 2. Résultats spécifiques à la STO

Les différences de configuration entre les autobus de la STO et de la STM faisant partie du PDTU rendent difficile toute comparaison directe des résultats observés au cours de cette étude, à cause des principaux points suivants :

- L'utilisation de la climatisation sur les autobus de la STO et pas sur les autobus STM ;
- Les moteurs diesel de la production 2006 sur les autobus hybrides et témoins 2006 de la STO ;
- La transmission de marque Voith, utilisée sur les autobus témoins 2007 de la STO, qui est différente de la transmission de marque ZF, utilisée sur les véhicules témoins de la STM.

Face à cette situation, une analyse des résultats spécifiques à la STO a été réalisée. Les aspects suivants sont illustrés et analysés :

- La comparaison des trois configurations d'autobus hybrides et témoins suivis à la STO au cours du PDTU et la différence sur la consommation moyenne de carburant ;
- L'impact de la climatisation sur la consommation de carburant, observé sur les autobus témoins de la STO.

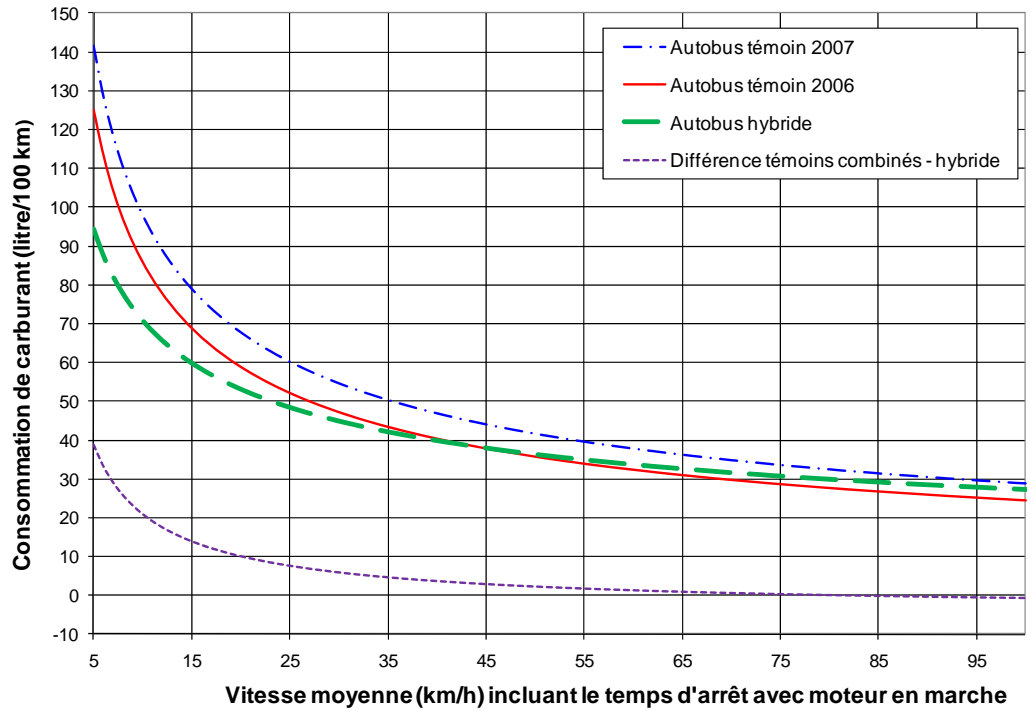
Les deux graphiques qui suivent (Figure D-19 et D-20) illustrent la consommation de carburant les autobus de la STO en fonction de la vitesse moyenne. Dans le cas de la Figure D-19, les courbes sont présentées pour des vitesses allant jusqu'à 100 km/h. Quant à la Figure D-20, elle présente plutôt les vitesses représentatives du transport public en milieu urbain, soit des vitesses entre 5 et 30 km/h. Dans les deux cas, la consommation des autobus témoins 2006 et 2007 est illustrée ainsi que celle de l'autobus hybride. Finalement, la différence les autobus témoins et hybrides est présentée.

On peut remarquer une nette différence de consommation entre les autobus témoins 2006 et 2007. Cette différence provient principalement du moteur diesel qui est construit pour rencontrer les normes EPA 2002-2006 dans le cas de l'autobus témoin 2006 et bien entendu la norme EPA 2007 dans le cas de l'autobus témoin 2007. Bien que le moteur 2007 produise une importante réduction des PAC, la technologie utilisée pour réduire les polluants entraîne une augmentation significative de la consommation. De plus, la ventilation du radiateur est différente entre les véhicules 2006 et 2007 et laisse place à une optimisation qui pourrait réduire cet écart de consommation.

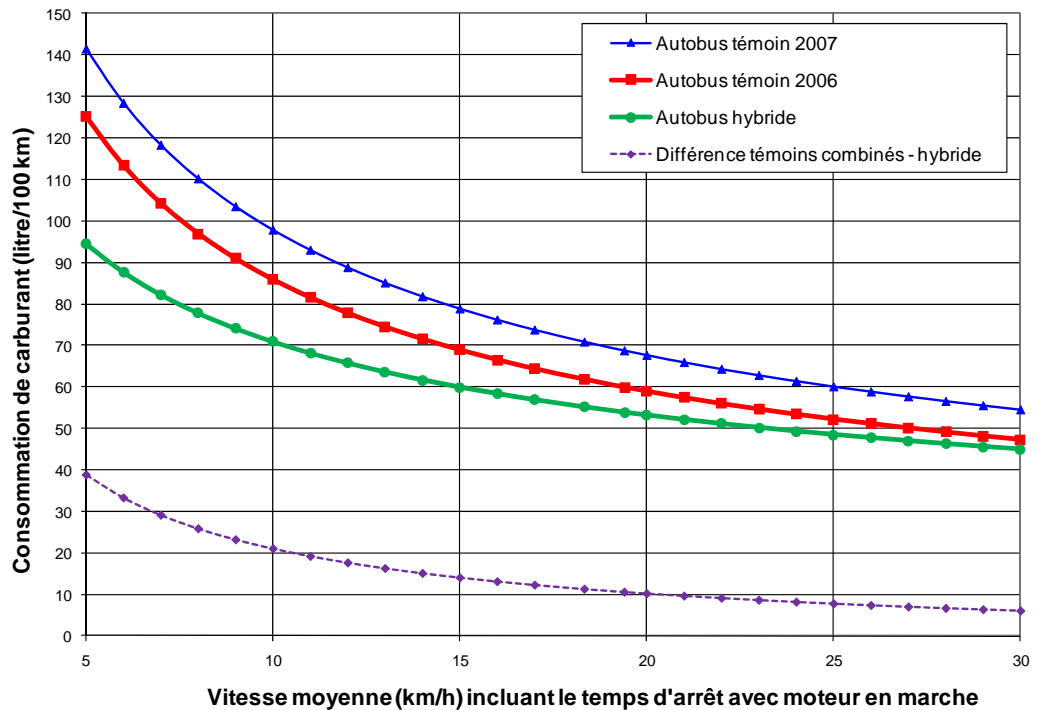
Un autre aspect à remarquer est que l'autobus hybride avec moteur 2006 perd rapidement l'avantage en consommation par rapport à l'autobus témoin 2006, lorsque la vitesse moyenne augmente, comparativement à l'hybride 2008 (voir Figure D-19). Ceci vient en partie de la programmation du système hybride 2006, qui est plutôt optimisée pour la réduction des PAC que pour la réduction des GES (voir section 3.1 du rapport Technologie Hybride). Cette perte de réduction de consommation à haute vitesse vient aussi du désavantage de l'autobus hybride en lien avec son poids et sa trainée aérodynamique plus importants que pour le véhicule témoin.

**Note : les courbes de consommation indiquées sur les graphiques de cette section comptent seulement le carburant utilisé par le moteur diésel et n'incluent pas le carburant utilisé par le chauffage d'appoint.**

**Figure D-19 Consommation en fonction de la vitesse moyenne autobus STO**



**Figure D-20 Consommation en fonction de la vitesse moyenne autobus STO - zoom**



Les Figures D-21 et D-22 qui suivent montrent la consommation de carburant des autobus témoins de la STO en fonction de la température extérieure. Alors que la



Figure D-21 présente les résultats pour l'autobus témoin 2006, la Figure D-22 présente ceux pour l'autobus témoin 2007.

L'analyse des résultats sur les autobus témoins sans climatisation de la STM indique qu'ils montrent une faible variation de consommation en fonction de la température extérieure (voir figure 3-7). On peut donc évaluer que les différences observées en fonction de la température extérieure pour les témoins de la STO proviennent principalement de l'impact de l'utilisation de la climatisation. Son compresseur est utilisé à différent niveau de puissance en fonction de la demande, donc qui augmente proportionnellement à la hausse de la température extérieure. On peut observer que, pour une vitesse moyenne de 20 km/h, la différence de consommation entre la température la plus élevée et la température la plus basse pour les autobus de la STO est d'environ 10 litres/100 km et qu'elle est relativement semblable pour les témoins 2006 ou 2007 même si leurs moteurs diesel sont différents.

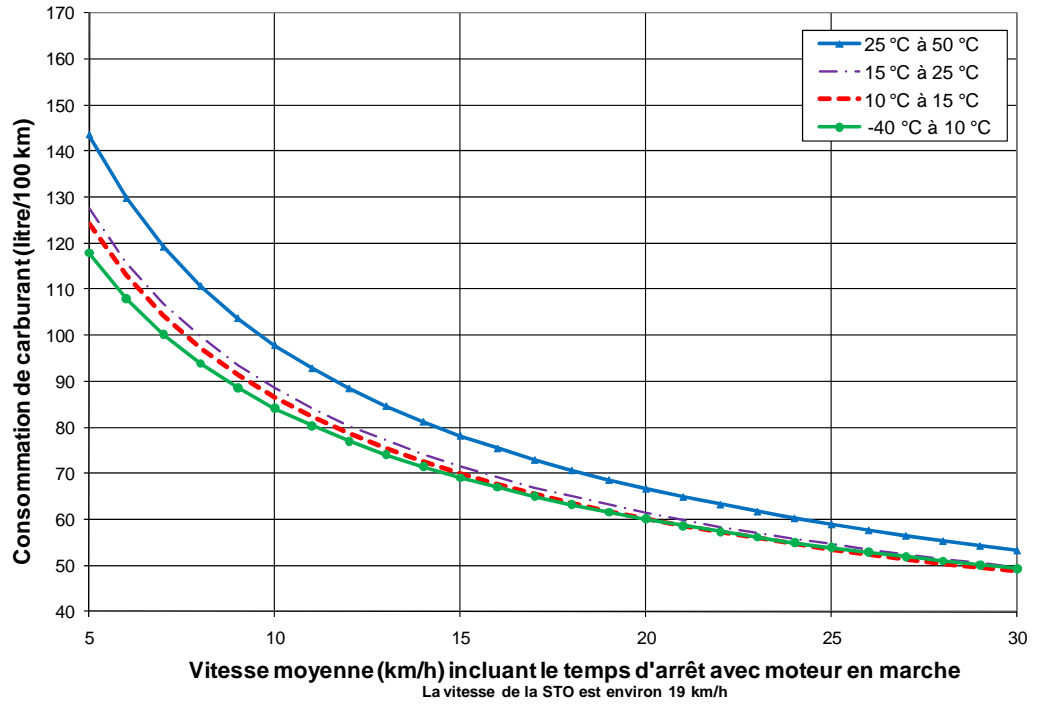
Donc, cette estimation de 10 litres/100 km sur la consommation peut être considéré comme le résultat de la climatisation en mode de fonctionnement maximal pour une vitesse moyenne de 20 km/h. Pour une vitesse moyenne de 11 km/h, le plus grand écart illustré sur la courbe pour le témoin 2006 se rapproche de la différence observée en laboratoire (Environnement Canada) pour le parcours Manhattan avec une augmentation de près de 13 litre/100 km pour le mode sans climatisation ou climatisation maximale.

Cette différence de consommation liée à l'impact de la climatisation est réduite lorsque la vitesse moyenne augmente. Une analyse plus poussée pourrait expliquer en détail cet aspect, mais on peut l'expliquer de manière sommaire selon les deux aspects suivants :

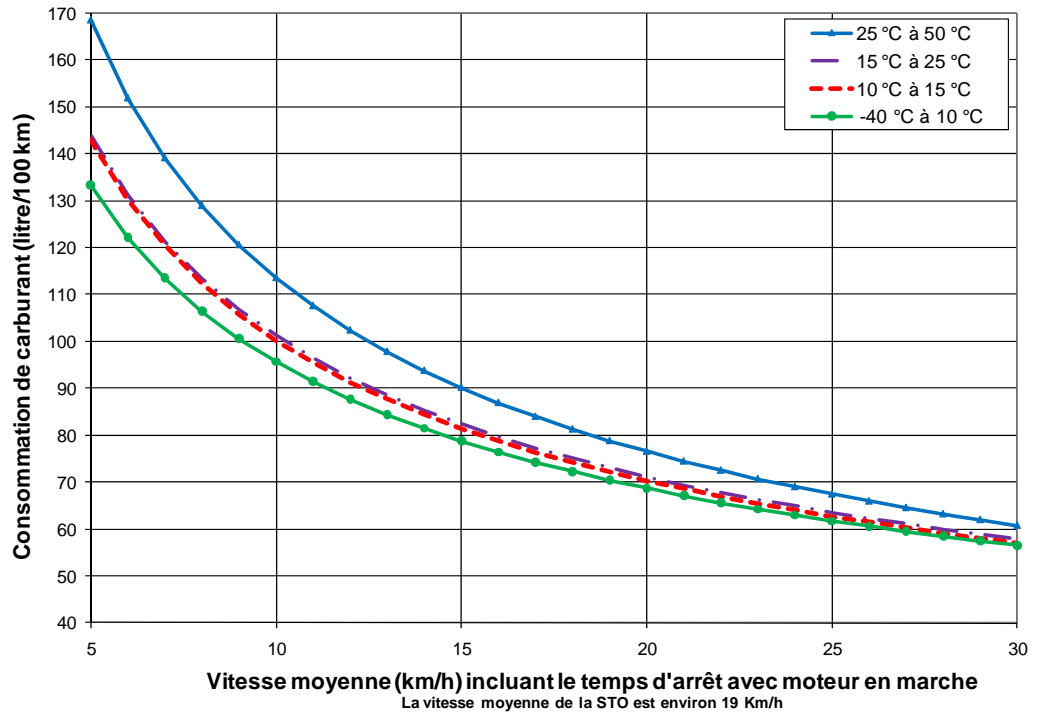
- La puissance moyenne produite par le moteur diesel augmente en fonction de la vitesse ;
- Le temps en arrêt avec le moteur en marche augmente lorsque la vitesse moyenne diminue.

Ces deux aspects font en sorte que l'impact de la puissance requise pour la climatisation est moins important sur la consommation pour une vitesse moyenne plus élevée. De plus, cet impact est plus important sur la consommation pour une vitesse moyenne plus basse.

**Figure D-21 Consommation en fonction de la vitesse moyenne et de la température extérieure autobus STO témoins 2006**



**Figure D-22 Consommation en fonction de la vitesse moyenne et de la température extérieure autobus STO témoins 2007**



## **Annexe E**

---

### **Choix du protocole de quantification**

## 1. Choix du protocole de quantification des GES

Le protocole de quantification choisi, le ISO 14064-1 (CAN/CSA-ISO 14064-1, 2006) est celui qui présente le plus d'affinités pour le secteur du transport en commun urbain.

Plusieurs méthodologies ont été étudiées avant que celle de l'ISO 14064-1 ne soit choisie, notamment, la documentation publiée par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat GIEC ou IPCC<sup>4</sup> ainsi que les protocoles de quantification reconnus par le gouvernement du Canada<sup>5</sup>. L'inventaire canadien qui est présenté sur le site internet d'Environnement Canada<sup>6</sup> comporte sept méthodologies dans le domaine industriel, mais aucune ne traite de manière spécifique du transport public au Canada. D'autres méthodes ont aussi été consultées : le protocole *GHG Protocol Corporate accounting and reporting standard* (WBCSD/WRI, 2004), les lignes directrices du *Global Reporting Initiative (GRI, 2002)* intitulées *Sustainability reporting guidelines*, datant de 2002, et les lignes directrices de la norme ISO 14064-1 (CAN/CSA-ISO 14064-1, 2006) traitant des *Spécifications et lignes directrices, au niveau des organismes, pour la quantification et la déclaration des émissions et des suppressions des GES*.

La norme ISO 14064-1 (CAN/CSA-ISO 14064-1, 2006) a été choisie pour faire l'inventaire des GES générés par les activités de la STM, parce que :

- Reconnaissance de la part du Conseil canadien des normes;
- Compatibilité avec d'autres standards reconnus internationalement tels que ceux développés par le *Global Report Initiative* (GRI, 2002) et le *World Business Council for Sustainable Development & World Resources Institute* (WBCSD/WRI, 2004);
- Disponibilité des pièces justificatives démontrant les consommations énergétiques des activités de la Société et qui permettent le calcul des émissions basé sur les facteurs d'émission.

Selon la norme CAN/CSA-ISO 14064-1, l'organisation qui souhaite comptabiliser ses GES doit d'abord choisir une année de référence historique pour ses émissions. Cette année de référence permet d'établir un programme de gestion des GES et les objectifs de réduction. Selon le *Greenhouse Gas Protocol* (WBCSD/WRI, 2004), les organisations doivent choisir une année antérieure, la plus reculée, pour laquelle des données fiables sont disponibles. Plusieurs organisations ont sélectionné l'année 1990 comme année de référence afin d'être uniformes avec le Protocole de Kyoto (WBCSD/WRI, 2004). Lorsque les informations suffisantes sur l'historique des émissions des GES ne sont pas disponibles, l'organisation peut utiliser la première année où un inventaire des GES a été effectué (CAN/CSA ISO 14064 - 1, 2006).

En ce qui concerne la STM, l'accessibilité aux données des années antérieures a été la raison qui a supporté le choix de l'année de référence. Ainsi, celle-ci a été établie comme étant l'année **2006**. Cette année est aussi considérée comme année de référence, à l'égard de la réduction des GES, dans le *Plan de protection de l'environnement 2007 – 2011* de la STM.

---

<sup>4</sup> Recommandations du GIEC en matière de bonnes pratiques et de gestion des incertitudes pour les inventaires nationaux

[http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/french/gpgaum\\_fr.html](http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/french/gpgaum_fr.html)

<sup>5</sup> Environnement Canada, Guide pour la quantification des GES, [http://www.ec.gc.ca/pdb/ghg/guidance\\_f.cfm](http://www.ec.gc.ca/pdb/ghg/guidance_f.cfm)

<sup>6</sup> Environnement Canada, Guide pour la quantification des GES, [http://www.ec.gc.ca/pdb/ghg/guidance\\_f.cfm](http://www.ec.gc.ca/pdb/ghg/guidance_f.cfm)

La norme ISO (CAN/CSA-ISO 14064-1, 2006) stipule de conserver aux dossiers tout document relatif aux données sources à la base de l'établissement et de la comptabilisation de cet inventaire en vue d'une vérification éventuelle. La STM s'engage à se conformer à cette exigence.

## 2. Identification du périmètre opérationnel

### 2.1 Liste des GES considérés dans l'inventaire

Les gaz à effet de serre comptabilisés par les activités de la STM sont ceux assujettis au Protocole de Kyoto : le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), le méthane (CH<sub>4</sub>), l'oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O), les hydrofluorocarbones (HFC), les hydrocarbures perfluorés (PFC) et les hydrofluoroéthers (HFE).

D'autres gaz, comme l'ozone et certains COV, entrent dans la définition des GES : gaz qui absorbe la lumière visible et la redistribue sous forme de radiation infrarouge (ISO 14064). La comptabilisation a été limitée aux six catégories de gaz cités ci-dessus aux fins de comparaison avec les autres sociétés de transport et les accords internationaux et pour des raisons pragmatiques de réalisation de l'inventaire.

### 2.2 Déclaration des GES

La STM fait une déclaration des émissions de ces gaz en unités d'équivalents de CO<sub>2</sub> (éqCO<sub>2</sub>). Ceux-ci sont calculés à partir du potentiel de réchauffement (PR) propre à chaque GES (voir annexe 1).

Le calcul se fait selon l'équation suivante, soit par la multiplication de la masse (m) de chaque GES par son potentiel de réchauffement (PR) :

$$\text{GES (éqCO)} = (m_{\text{CO}_2} \times \text{PR}_{\text{CO}_2}) + (m_{\text{CH}_4} \times \text{PR}_{\text{CH}_4}) + (m_{\text{N}_2\text{O}} \times \text{PR}_{\text{N}_2\text{O}}) + (m_{\text{PFC}} \times \text{PR}_{\text{PFC}}) + (m_{\text{HFC}} \times \text{PR}_{\text{HFC}}) + (m_{\text{HFE}} \times \text{PR}_{\text{HFE}})$$

**Taux d'émission de GES = 2,7 kg/litre pour le diesel des autobus de la STM**

### 2.3 Processus d'identification des sources d'émissions

Un premier inventaire des GES générés en 2006 par les activités de la STM a été réalisé par un consultant externe. Ce rapport a été utilisé comme document de référence pour l'identification des sources majeures d'émissions de GES. De plus, des protocoles reconnus au niveau mondial ont été consultés (CAN/CSA-ISO 14064-1, 2006 et WBCSD/WRI, 2004) afin de mettre en évidence d'autres sources potentielles. Des vérifications sur les banques de données relatives aux équipements, aux produits chimiques utilisés et aux services et activités réalisés ou donnés en mandat par la STM ont également été effectuées.

Ce processus d'identification des sources est repris chaque année afin de vérifier l'existence des sources déjà identifiées et l'apparition des nouvelles sources. Le bilan des réductions de GES des véhicules de la STM, pour les années 2006, 2007 et 2008 est présenté au tableau E-1.

**Tableau E-1 Réduction des émissions de GES par nos véhicules (t CO<sub>2</sub> éq)**

	2006	2007	2008
Conduite écologique	1 673	1 702	3 209
Utilisation du biodiesel		100	3 574
Bus hybrides			300
<b>Réduction attribuable à ces trois initiatives</b>	<b>1 673</b>	<b>1 802</b>	<b>7 083</b>

## **Annexe F**

---

**Impacts de la technologie hybride sur le coût de cycle de vie des autobus**

## 1. Définition

Le coût de cycle de vie d'un autobus inclut trois principales composantes :

- Les coûts reliés à l'acquisition;
- Les coûts reliés au carburant;
- Les coûts reliés à l'entretien.

Pour évaluer la différence entre le coût de cycle de vie des autobus hybrides et celui d'autobus standard comparables, il faut aussi considérer les coûts reliés à l'introduction d'autobus hybrides, qui peuvent inclure des coûts d'immobilisation (modifications aux installations, etc.) et des coûts d'exploitation (notamment formation).

Les coûts sont exprimés en dollars canadiens (\$can) à moins d'indication contraire. Taux de change : 1 \$US = 1.22 \$can.

## 2. Estimation des coûts de cycle de vie des autobus du PDTU STO/STM

La STM et la STO n'ont pas encore préparé une estimation complète du coût de cycle de vie comparatif Hybrides – Standard et les résultats d'une telle estimation devront être considérés avec beaucoup de réserves, pour, entre autres, les raisons qui suivent.

En même temps que l'on a introduit les hybrides à la STO et à la STM, en 2007 et 2008, les moteurs diesel des autobus ainsi que plusieurs autres technologies utilisées dans les autobus des deux exploitants ont été modifiés, de telle sorte qu'il est très risqué de se baser sur les coûts historiques pour estimer les coûts d'entretien à venir pour les flottes d'autobus standard.

Certains des changements technologiques effectués récemment (turbos, EGR, etc.) ont donné lieu à des difficultés initiales d'exploitation et d'entretien, de telle sorte qu'il est difficile d'en distinguer les impacts sur les coûts futurs des hybrides et des standard. Il faut aussi souligner que les composantes principales des autobus évolueront encore de façon importante au cours des prochaines années, notamment à cause des normes plus strictes d'émissions de gaz nocifs qui entreront en vigueur en 2010.

## 3. Coûts d'acquisition

Le coût d'acquisition d'un autobus est un sujet relatif, puisque pour un même autobus le coût peut varier en fonction de plusieurs facteurs tels que la quantité commandée, la garantie achetée, l'expérience entre le fournisseur et le client. Le coût de l'option hybride a beaucoup diminué depuis que cette option est disponible chez les fournisseurs d'autobus. Selon diverses sources, il faut prévoir une somme approximative de 200 000 \$.

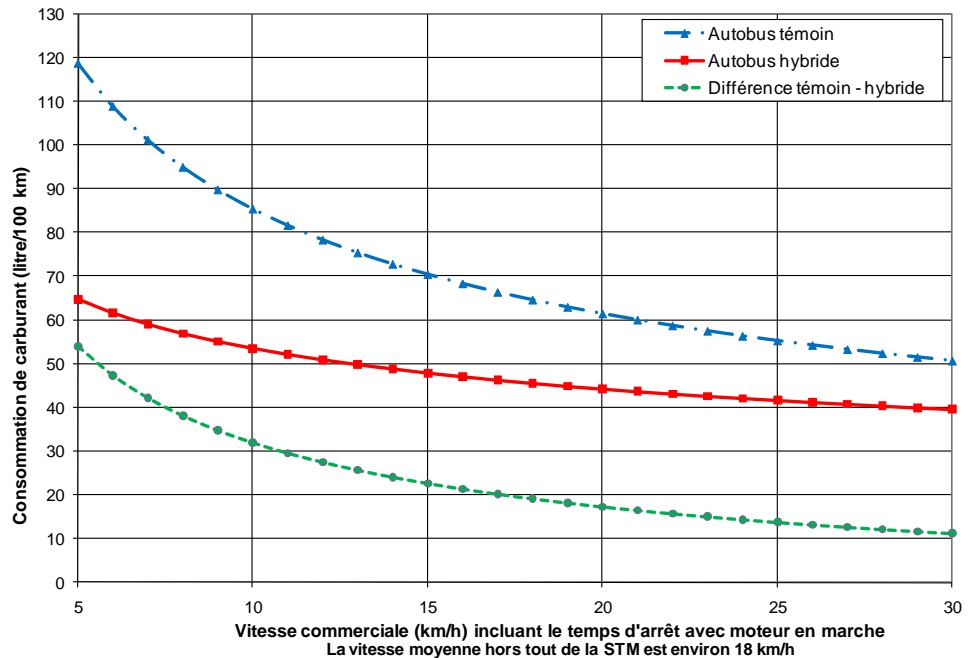
## 4. Coûts du carburant

Les résultats du PDTU, qui rejoignent ceux d'autres expériences, montrent des réductions de consommation de carburant d'environ 10 à 30 % avec les autobus hybrides, par rapport à des autobus standard comparables, selon les conditions d'utilisation. Puisque les économies de carburant que permet l'utilisation de la propulsion hybride varient selon la vitesse commerciale moyenne, il faut se référer au graphique de la figure F-1 pour connaître l'économie de carburant possible dans des conditions opérationnelles données.

Le coût du carburant diesel est une variable qui a évolué de façon non linéaire au cours des dernières années et la prévision de son évolution future est très hasardeuse.



**Figure F-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**



Aux fins de ce travail, il a paru raisonnable d'indexer le cout actuel du carburant selon deux hypothèses : 5 % et 10 % par année.

Ces hypothèses rejoignent les résultats de plusieurs modèles utilisés dans l'industrie.

## 5. Coûts d'entretien

Après un an d'utilisation des autobus hybrides et témoins (standard) à la STM (deux ans à la STO), les données sont limitées pour évaluer les différences futures de coûts d'entretien entre les deux types d'autobus.

Les indications ci-après sont tirées de l'expérience vécue dans le cadre du PDTU, mais aussi des prévisions de durée de vie faites par les manufacturiers des composantes et de l'expérience vécue par d'autres réseaux exploitant des autobus hybrides, notamment le King County Metro Transit à Seattle, dans l'état du Washington aux États-Unis, qui exploite un parc de plus de deux cent autobus articulés à propulsion hybride depuis plus de cinq ans; le système hybride utilisé sur ces autobus est fabriqué par le même fournisseur que celui des systèmes hybrides des autobus du PDTU, soit Allison Electric Drive. Le système hybride de Seattle est un EP-50, tandis que celui des autobus du PDTU est un EP-40.

Voici d'abord les principales composantes pour lesquelles il faut prévoir des différences de coûts d'entretien préventif et de remplacement entre les autobus hybrides et standard avec les coûts à prévoir par autobus.

Les coûts de remplacement incluent la main-d'œuvre requise.

Le coût total de cycle de vie d'un autobus dépasse les 2 millions de dollars. Pour l'estimation de la différence de coût entre les hybrides et les standard, on ne tiendra compte que des différences de plus de 1 000 \$ par autobus sur les seize ans de vie (soit 1/20 de 1 %).

### **5.1 Démarreur**

Remplacement : le démarreur d'un autobus standard coûte environ 900 \$ à remplacer, aux 300 000 km en moyenne, soit deux fois dans la vie utile d'un autobus. Comme il n'y a pas de démarreur sur un hybride, il s'agit d'une économie moyenne de 1 800 \$ sur le cycle de vie de seize ans.

### **5.2 Transmission**

Entretien préventif : le changement d'huile à transmission coûte environ 200 \$ de plus aux 180 000 km pour une transmission Allison par rapport à une transmission d'autobus standard. Il s'agit donc d'un coût additionnel peu significatif d'environ 600 \$ sur la vie utile de seize ans (725 000 km).

Remplacement : la durée moyenne de la transmission automatique à contrôle numérique d'un autobus standard est actuellement d'environ 650 000 km, ce qui implique un changement de transmission vers la treizième année du cycle de vie. Le coût de remplacement, par une transmission réusinée, est de 18 000 \$ en moyenne.

Pour les transmissions Allison, l'usure actuelle ne laisse pas entrevoir de besoin de remplacement systématique pendant les seize années d'utilisation. Toutefois, compte tenu de l'expérience encore limitée et des accidents éventuels, il paraît raisonnable de prévoir un remplacement par trois autobus, autour de la treizième année. Le coût d'une transmission neuve Allison est actuellement de 125 000 \$; il est raisonnable de penser qu'une réusinée pourrait coûter environ 60 % du prix d'une neuve, soit 75 000 \$ (ou 25 000 \$ de coût à prévoir par autobus).

Il faut souligner que la durée de vie des transmissions automatiques régulières des autobus standard est aussi en amélioration et il est probable que ces transmissions n'auront éventuellement plus à être remplacées.

### **5.3 Système d'emmagasinement d'énergie - Batteries 600 volts et refroidisseur**

Entretien planifié : il faut prévoir environ 530 \$ (dix heures et pièces) annuellement pour l'entretien courant du refroidisseur de batteries.

Remplacement : Allison prévoit une durée de sept à neuf ans pour les batteries NiMh équipant les autobus Nova Bus hybrides du PDTU. Les batteries de certains autobus hybrides de première génération utilisés ailleurs en Amérique du Nord commencent à arriver au terme de leur vie utile. Le prix cité par Allison pour un ensemble de batteries de remplacement est de 47 500 \$US (soit 57 950 \$can). Lorsque la STM et la STO devront remplacer des batteries, le prix effectif sera beaucoup moins élevé, car des cellules NiMh identiques à celles des batteries Panasonic qui équipent les autobus hybrides du PDTU seront disponibles séparément sur le marché. Compte tenu de l'expérience récente au King County Metro Transit de Seattle, il semble raisonnable de prévoir environ 21 000 \$can (17 000 \$US) pour le remplacement des batteries, en moyenne dans la neuvième année de service des autobus.

#### **5.4 Inverseur de courant 460/750V (DPIM) et refroidisseur**

Entretien planifié : le temps additionnel requis pour les inspections préventives n'est pas significatif aux fins de l'estimation du coût de cycle de vie (1/2 heure à 1 heure par an).

Remplacement : les premiers inverseurs fournis avec les autobus hybrides du PDTU, notamment avec les autobus de la STO, n'étaient pas totalement au point. Toutefois, les inverseurs reçus depuis sont de beaucoup améliorés et le fournisseur (Allison) prévoit une durée de vie de cinq à huit ans. Le coût d'une composante neuve est de 48 000 \$US, soit 58 560 \$can. La STM prévoit les remplacer par une pièce réusinée au coût de 35 000 \$ environ ( 60 % du prix d'un neuf).

Enfin les renseignements obtenus de King County Metro Transit dernièrement, indiquent que le taux prévisible de remplacement du DPIM serait maintenant très faible en raison de plusieurs améliorations. Il serait donc raisonnable de prévoir un taux de remplacement de 1 DPIM par 3 autobus, à la 13<sup>e</sup> année, à l'instar des prévisions de remplacement pour la transmission.

#### **5.5 Moteur**

On prévoit actuellement le remplacement du moteur d'un autobus standard une fois par cycle de vie, en moyenne dans la quatorzième année.

Avec les autobus hybrides, les indications actuelles sont à l'effet que le moteur s'utilisera moins vite, puisqu'il tourne moins vite et de façon plus uniforme. Il paraît raisonnable de ne plus prévoir de changement de moteur au cours de la vie utile, soit une économie de 15 000 \$ (coût approximatif d'un moteur Cummins ISL réusiné).

L'analyse d'huile nous indique que le moteur des autobus hybrides ont moins de carbone et de fines particules. Sans le confirmer cependant, ceci indique une diminution d'usure au niveau des pièces internes du moteur. Ce dernier aura probablement un cycle de vie plus long que celui d'un autobus standard.

#### **5.6 Entretien préventif (général)**

L'entretien préventif d'un autobus hybride coûte environ 1 000 \$ de plus par année que celui d'un autobus standard, compte tenu de la complexité accrue des composantes. Ce montant inclut les prévisions mentionnées plus haut pour les transmissions, le système d'entreposage d'énergie et l'inverseur de courant.

#### **5.7 Éléments pour lesquels il n'y a pas d'indication de différence significative de coût d'entretien**

Selon les indications actuelles, il n'y aurait pas à prévoir de différence de coût appréciable entre des autobus NovaBus APS 40 pieds hybrides et standard pour ce qui concerne les freins, la suspension, le chauffage d'appoint, les batteries et l'alternateur 24V.

Pour les freins, l'utilisation des ralentisseurs sur les autobus standard réduit l'usure de manière semblable à la récupération d'énergie par le système hybride.

Pour la suspension, il n'y a pas d'indication actuellement d'usure ou de bris différents avec les autobus hybrides, malgré le poids accru et réparti différemment.

## 5.8 Éléments pour lesquels il n'y a pas d'information suffisante pour une prévision

Les modèles différents d'appareils de climatisation installés sur les autobus standard et hybrides de la STO ne permettent pas de prévision de différence de coût de cycle de vie. À cause des problèmes enregistrés avec les turbocompresseurs et filtres à particules des moteurs 2007, il n'est pas possible non plus de prévoir avec précision les différences de coûts d'entretien pour ces composantes, entre les autobus hybrides et standard.

## 5.9 Prévision globale des coûts d'entretien

Selon les indications tirées de l'expérience de la STM et de la STO dans le cadre du PDTU, les autobus hybrides pourraient coûter environ 40 000 \$ de plus à entretenir que des autobus standard comparables, au cours de leur vie utile de seize ans.

**Tableau F-1 Prévision des coûts d'entretien**

Composante	Différence	Remarque
Démarrreur	- 1 800 \$	
Transmission	+ 7 000 \$	25 000 \$ hybride moins 18 000 \$ standard
Batteries 600V et refroidisseur	+ 21 000 \$	
Inverseur de courant	+ 12 000 \$	1 remplacement par 3 autobus
Moteur	- 15 000 \$	
Entretien préventif	+ 16 000 \$	1 000 \$ par an
<b>Net</b>	<b>+ 39 200 \$</b>	

Ces données doivent cependant être ajustées en fonction de l'inflation. Cette différence prévue de l'ordre de 40 000 \$ est à considérer en fonction des coûts totaux d'entretien d'un autobus, sur seize ans<sup>7</sup>. Selon, entre-autre, le type d'entretien effectué, les conditions opérationnelles dans lesquelles sont utilisés les autobus, le kilométrage parcouru et le coût de la main d'œuvre, les coûts totaux d'entretien durant la vie utile d'un autobus peuvent atteindre environ 1 000 000 \$. Le surcoût d'entretien des autobus hybrides pourrait ainsi ne représenter qu'une augmentation de 4 %.

En contrepartie, on peut penser que la valeur accrue des composantes de l'autobus hybride entraînera une valeur de disposition accrue pour l'autobus et ses composantes, à la fin du cycle d'utilisation par l'exploitant initial

## 6. Autres coûts reliés à l'introduction des autobus hybrides

### 6.1 Coûts reliés aux installations et équipements

En plus des conditions d'exploitation (vitesse, arrêts, température, etc.), les coûts de cycle de vie des autobus hybrides seront influencés par la situation de chaque exploitant en ce qui concerne ses installations et équipements.

---

<sup>7</sup> Nonobstant, certains éléments demeurent inconnus du fait que l'expérience terrain avec la technologie hybride soit trop récente. Ainsi, si l'efficacité des batteries du système de propulsion hybride diminue avec le temps, l'économie de carburant risque elle aussi de diminuer. D'autre part, lorsque les batteries hybrides sont remplies et que la récupération de l'énergie de décélération n'est plus possible, l'autobus est ralenti par ses systèmes mécaniques usuels, ce qui pourrait entraîner une usure accélérée de ses composantes tels que les freins. La longueur de la ligne d'huile pour la transmission hybride et de ses sous-composants est plus longue que sur un autobus standard; cette longueur pourrait générer des coûts d'entretien supplémentaires.

Les autobus hybrides ne nécessitent pas nécessairement de modifications aux locaux de l'exploitant, mais il faut tenir compte des contraintes suivantes, qui peuvent entraîner des coûts significatifs :

- Il faut vérifier si la hauteur des portes, des laveurs d'autobus et des espaces vérins peuvent accommoder la hauteur additionnelle des autobus hybrides (132 po sans climatisation vs 123 po pour les standard);
- La capacité des vérins doit être suffisante pour supporter le poids additionnel des autobus hybrides (8 % supplémentaire pour l'ensemble du véhicule, à vide, et 12 % de plus sur l'essieu arrière, pour le modèle en étude à la STM);
- Les appareils de lavage d'autobus peuvent ne pas être compatibles avec les équipements placés sur le toit des hybrides ou requérir des modifications significatives;
- Il faut prévoir de l'espace en magasin pour les pièces additionnelles à garder en stock pour les hybrides;
- Il faut aussi prévoir l'équipement requis pour les travaux d'entretien à effectuer sur le toit, de même que pour l'enlèvement et la repose des batteries et des autres équipements embarqués placés sur le toit, le cas échéant.

## **6.2 Coûts de formation**

Pour l'introduction des autobus hybrides, la STM a effectué les activités de formation suivantes :

- 3 heures de formation pour chacun des chauffeurs susceptibles de conduire un hybride;
- 40 heures de formation pour chacun des mécaniciens affectés à leur entretien.

## **6.3 Organisation et suivi**

Selon l'organisation du travail d'une société de transport et de l'envergure de la tâche inhérente à l'introduction des autobus hybrides au sein du parc d'autobus, il pourrait être nécessaire d'assigner du personnel, à temps plein, à cette tâche.

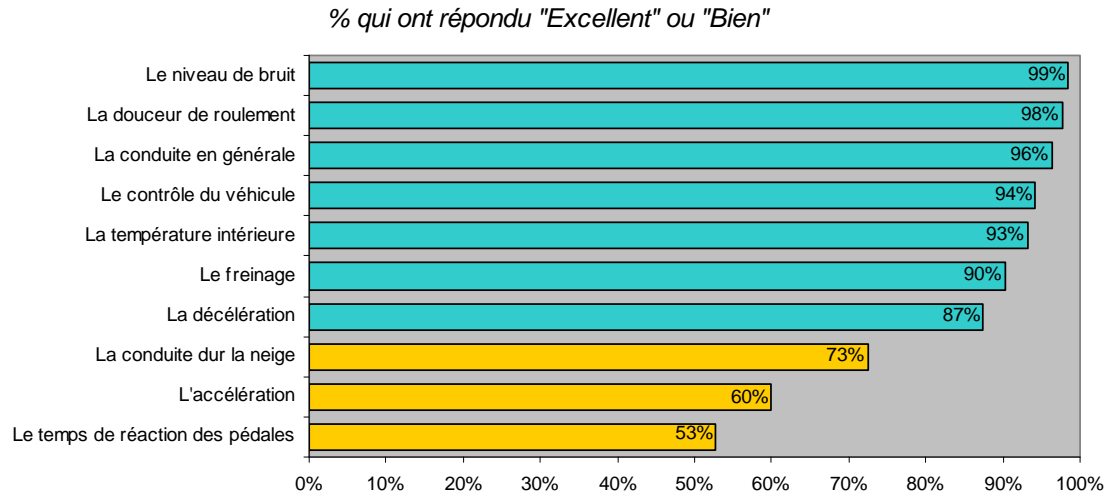
# **Annexe G**

---

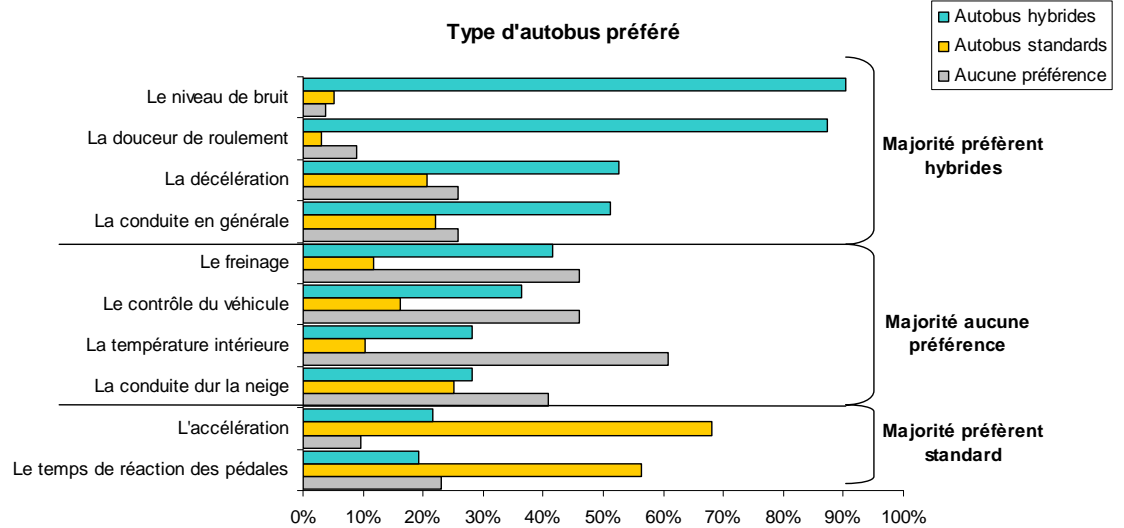
## **Résultats des sondages**

# 1. Les résultats de l'enquête auprès des chauffeurs de la STM

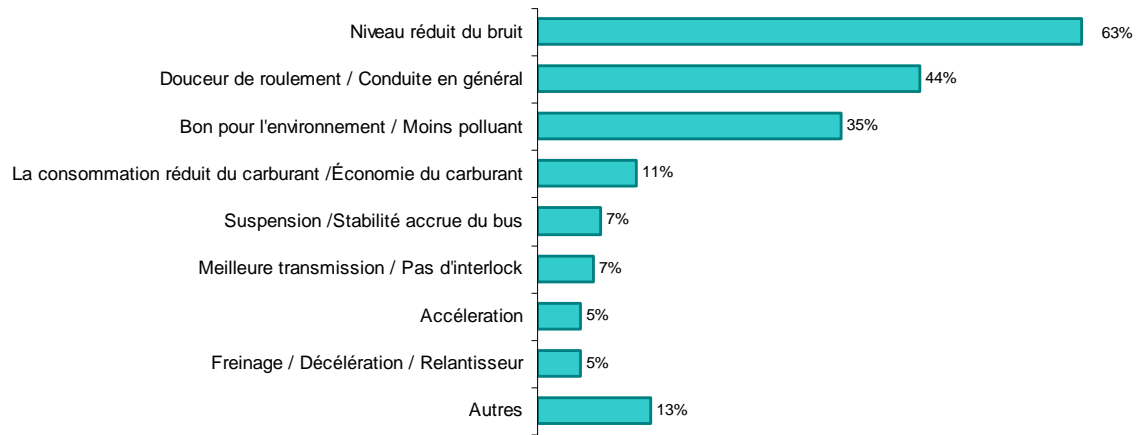
**Figure G-1** Appréciation chauffeurs de divers éléments des autobus hybrides



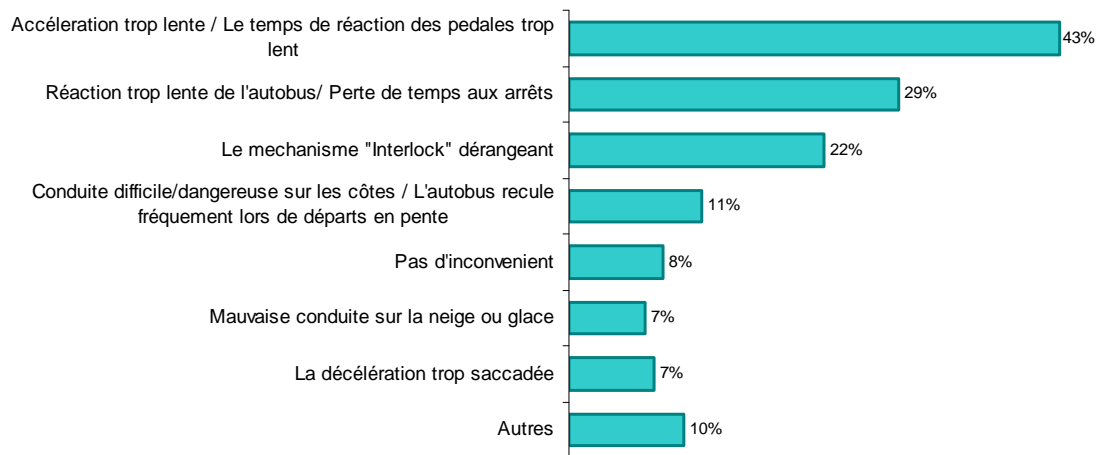
**Figure G-2** Comparaison des appréciations chauffeurs : autobus hybrides et standard



**Figure G-3 Avantages des autobus hybrides selon les chauffeurs**



**Figure G-4 Inconvénients des autobus hybrides selon les chauffeurs**



**Figure G-5 Autres commentaires des chauffeurs**

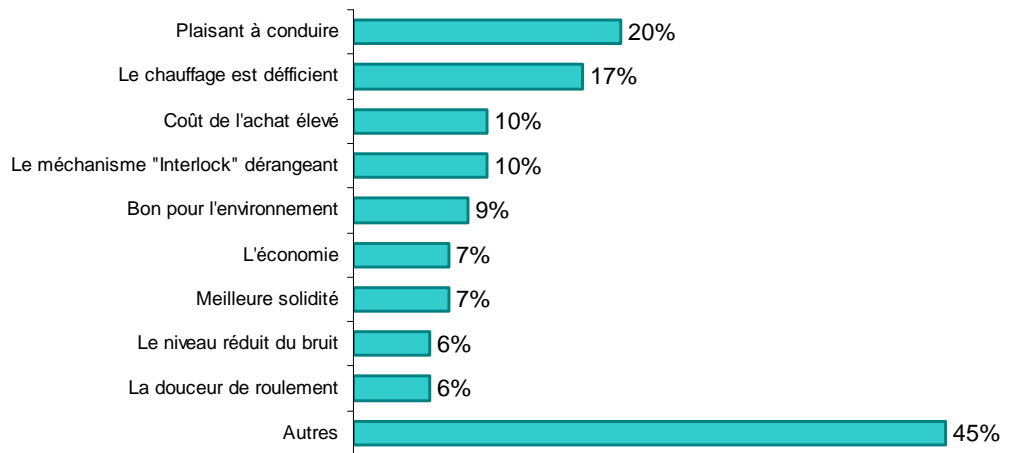
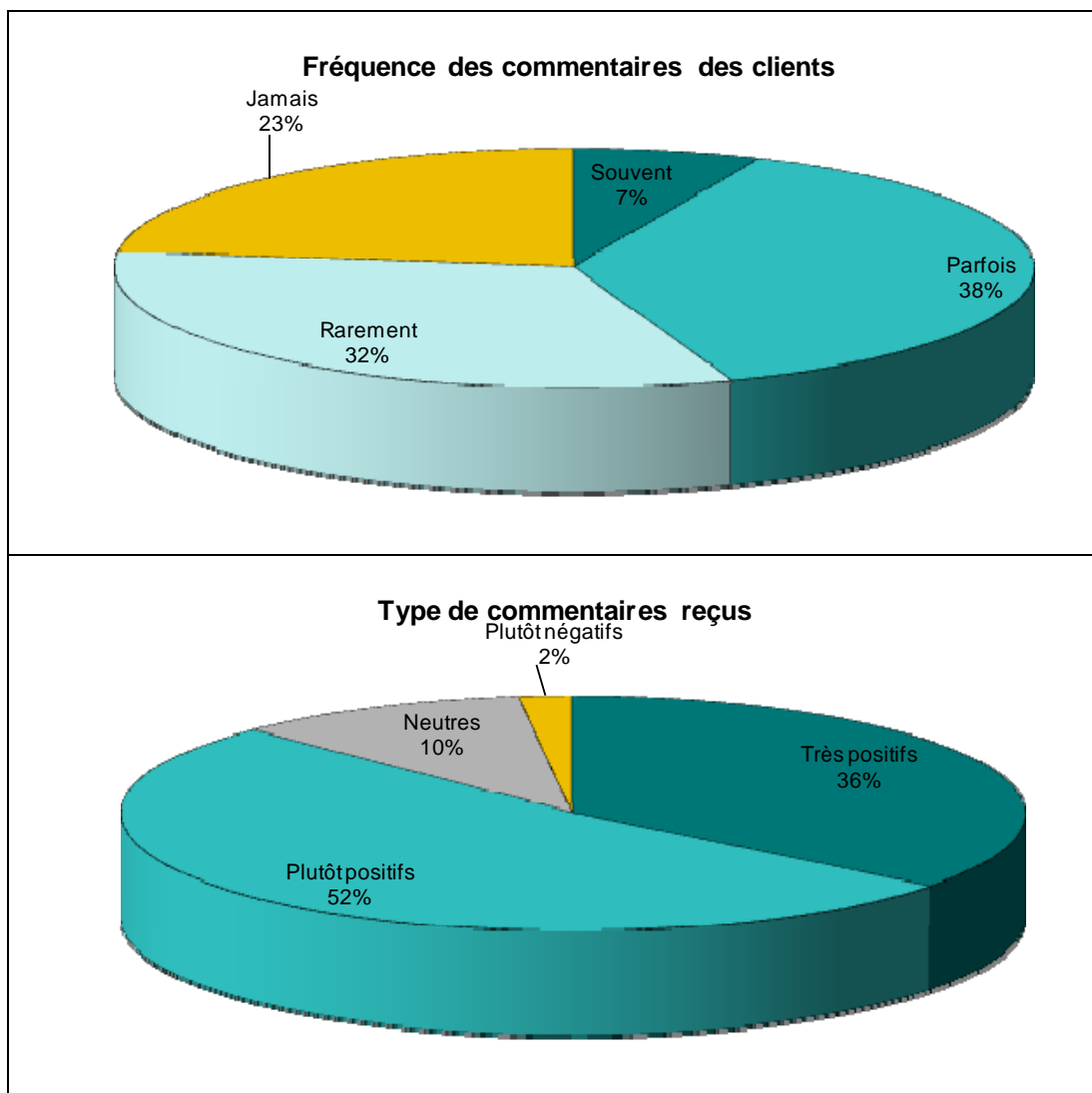




Figure G-6 Nature des commentaires clients reçus par les chauffeurs



## 2. Les résultats du sondage auprès de la clientèle de la STM

Q1. Veuillez cocher votre numéro de ligne d'autobus.

	Fréquence	Pourcentage
24	2	1%
61	4	3%
103	55	36%
162	18	12%
168	65	43%
999	8	5%
<b>Total</b>	<b>152</b>	<b>100%</b>

Q2. Avez-vous déjà entendu parlé des autobus hybrides?

	Fréquence	Pourcentage
Oui	96	63%
Non	56	37%
<b>Total</b>	<b>152</b>	<b>100%</b>

Q3. Saviez-vous que certains autobus de la STM étaient des hybrides (dieselélectrique)?

	Fréquence	Pourcentage
Oui	83	86%
Non	13	14%
<b>Total</b>	<b>96</b>	<b>100%</b>

Q4. Avez-vous déjà monté à bord d'un autobus hybride?

	Fréquence	Pourcentage
Tout à fait en accord	41	49%
Plutôt en accord	22	27%
Plutôt en désaccord	20	24%
<b>Total</b>	<b>83</b>	<b>100%</b>

Q5a. Veuillez donner votre niveau d'accord avec chacun des énoncés suivants. Les autobus hybrides contribuent à protéger l'environnement.

	Fréquence	Pourcentage
Tout à fait en accord	75	78%
Plutôt en accord	15	16%
Ne sais pas	6	6%
<b>Total</b>	<b>96</b>	<b>100%</b>

**Q5b. Veuillez donner votre niveau d'accord avec chacun des énoncés suivants. Les autobus hybrides sont plus silencieux que que les autobus standards.**

	Fréquence	Pourcentage
Tout à fait en accord	23	56%
Plutôt en accord	3	7%
Plutôt en désaccord	3	7%
Ne sais pas	12	29%
<b>Total</b>	<b>41</b>	<b>100%</b>

**Q5c. Veuillez donner votre niveau d'accord avec chacun des énoncés suivants. Les autobus hybrides roulent plus en douceur que les autobus standards.**

	Fréquence	Pourcentage
Tout à fait en accord	18	44%
Plutôt en accord	4	10%
Plutôt en désaccord	2	5%
Ne sais pas	17	41%
<b>Total</b>	<b>41</b>	<b>100%</b>

**Q5d. Veuillez donner votre niveau d'accord avec chacun des énoncés suivants. J'apprécie que la STM ait fait l'acquisition d'autobus hybrides.**

	Fréquence	Pourcentage
Tout à fait en accord	78	81%
Plutôt en accord	9	9%
Plutôt en désaccord	1	1%
Tout à fait en désaccord	2	2%
Ne sais pas	6	6%
<b>Total</b>	<b>96</b>	<b>100%</b>

**Q5e. Veuillez donner votre niveau d'accord avec chacun des énoncés suivants. Je souhaite qu'il y ait plus d'hybrides dans les parcs d'autobus de la STM.**

	Fréquence	Pourcentage
Tout à fait en accord	76	79%
Plutôt en accord	9	9%
Plutôt en désaccord	2	2%
Tout à fait en désaccord	3	3%
Ne sais pas	6	6%
<b>Total</b>	<b>96</b>	<b>100%</b>

**Q6. Avez-vous d'autres commentaires concernant les autobus hybrides?**

Commentaires	Fréquence
Plus d'autobus!	2
Faire attention au budget!	1
Plus d'investissements dans la technologie électrique	1
<b>Total</b>	<b>4</b>

## **Annexe H**

---

**Au-delà de la technologie hybride**

## 1. Introduction

La STM, dans le cadre du projet PDTU, a profité du fait que ses autobus étaient instrumentés pour vérifier les avantages environnementaux de deux technologies émergentes que la documentation signalait.

Ces deux technologies sont :

- La ventilation du compartiment moteur par un système électrique plutôt que par un système de ventilation hydraulique;
- La programmation «Topodyn» de la transmission ZF des autobus standard.

Le système de ventilation hydraulique d'un autobus standard et d'un autobus hybride a été remplacé par un système de ventilation électrique à bas voltage (24 V).

Le même autobus standard, qui a reçu la ventilation électrique, ainsi qu'un deuxième autobus standard, ont reçu la programmation Topodyn.

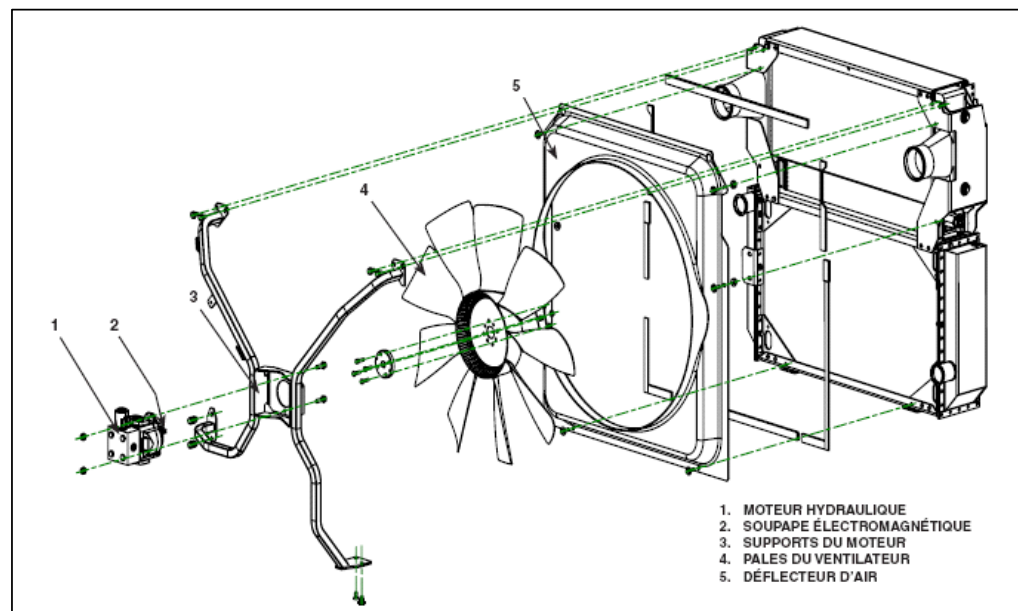
La ventilation du radiateur moteur par un système électrique aussi été installé sur un autobus hybride 2008 de la STM.

## 2. La mise en place des modifications

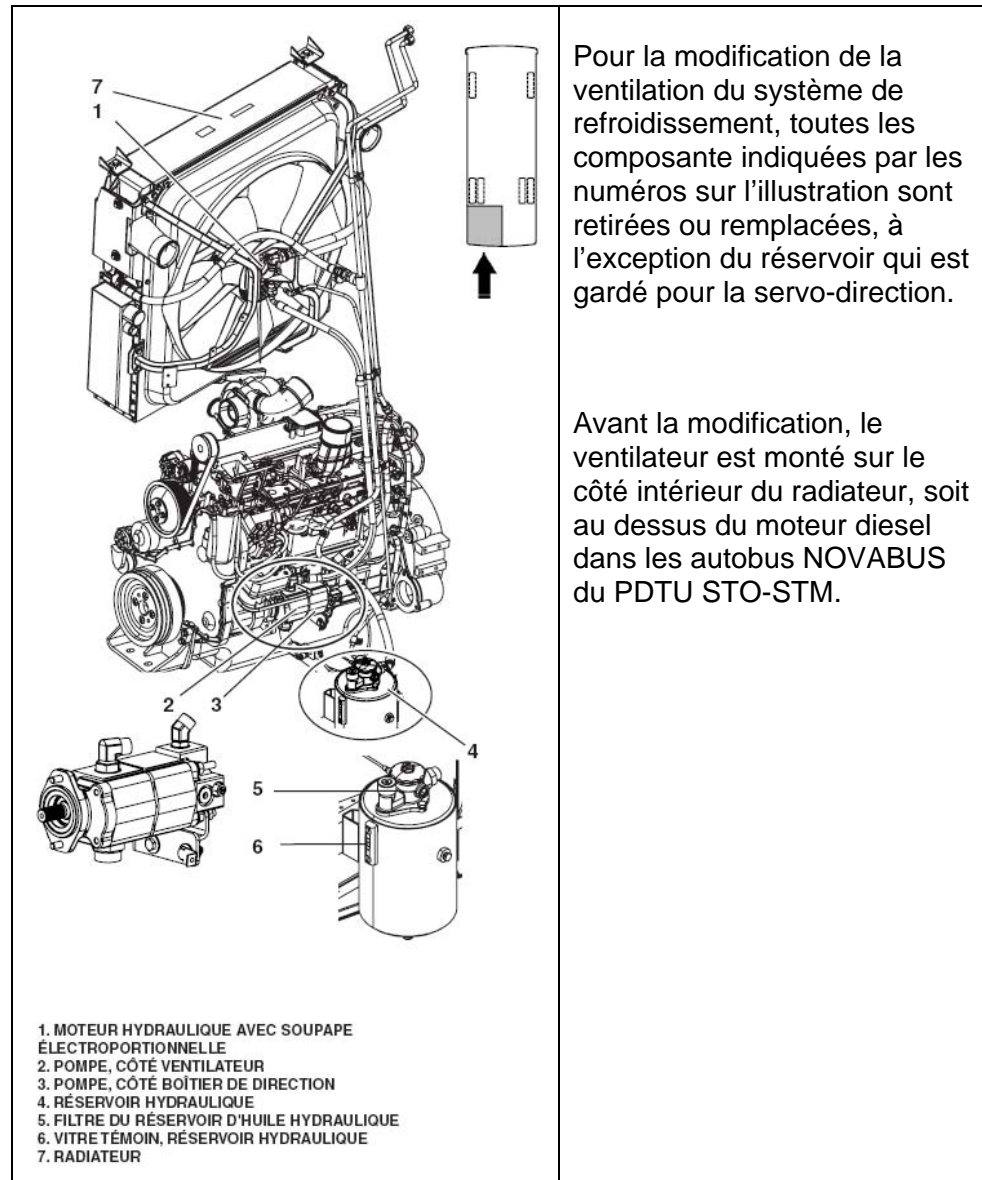
Le remplacement de la ventilation du radiateur moteur par un système électrique à ventilateur multiple à bas voltage consiste en les étapes suivantes :

- 1 Retirer les composants non requis du système hydraulique incluant la pompe hydraulique double, les boyaux et le ventilateur ;
- 2 Retirer les autres composants devant être remplacés, soit l'alternateur et le radiateur ;
- 3 Installer la nouvelle pompe hydraulique simple, le radiateur et sa ventilation, l'alternateur et ses nouveaux câbles de puissance ;
- 4 Dans le cas du véhicule hybride, mettre en place un système séparé pour le refroidisseur de transmission (non requis sur autobus témoins, car la transmission est refroidie par le circuit de liquide du moteur diesel)

**Figure H-1 Les composants du radiateur avant la modification de la ventilation**

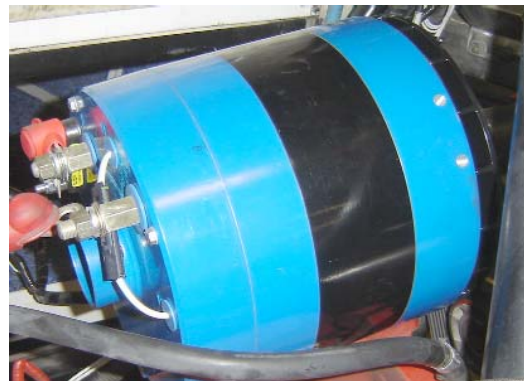


**Figure H-2 Les composantes hydrauliques avant la modification de la ventilation**



Une fois la modification en place, le nouveau groupe de huit petits ventilateurs électriques est monté sur le côté extérieur du radiateur, montré à la Figure H-3 ci-après avec sa grille extérieure ouverte.

**Figure H-3 Les composantes du système de ventilation électrique du radiateur suite à la modification**



Pour l'autobus hybride seulement, une nouvelle section prototype a été développée afin de loger le refroidisseur d'huile à transmission hybride. Ce refroidisseur a été monté sur le toit, en remplacement du refroidisseur d'origine qui était monté sur le côté extérieur du radiateur. Dans la section du toit, l'air est aspiré sur les côtés et repoussé vers le haut.

La modification du système de ventilation du radiateur moteur comporte aussi la mise en place d'un alternateur 24 volts à haut rendement, refroidi à air, en remplacement de l'alternateur d'origine, refroidi à l'huile moteur.

## **2.1 La mise en place de la programmation de transmission sur les autobus témoins**

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.

À cause de la complexité de la programmation, cette opération doit être faite par les experts de la compagnie ZF.

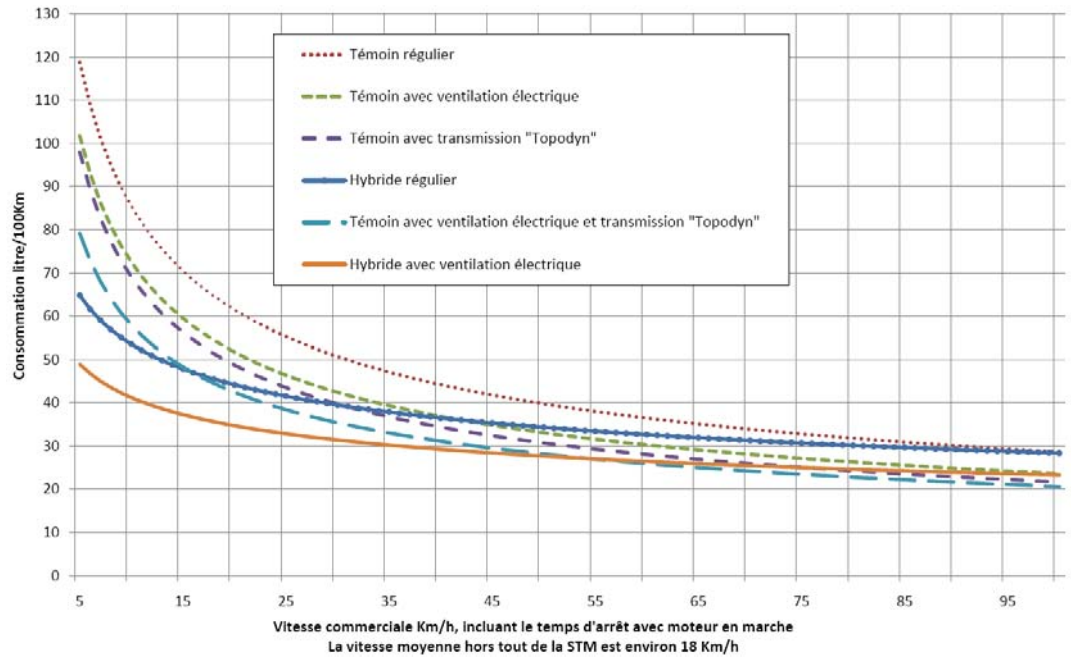
## **3. Les résultats des essais**

Les deux figures qui suivent (Figure H-4 et Figure H-5) montrent les résultats mesurés en service et analysés selon la méthode d'analyse des bonds à l'aide du logiciel Matlab. On peut donc comparer les résultats obtenus dans l'environnement d'utilisation de divers opérateurs en fonction de la vitesse moyenne. Quatre aspects généraux sont observables sur ces résultats :

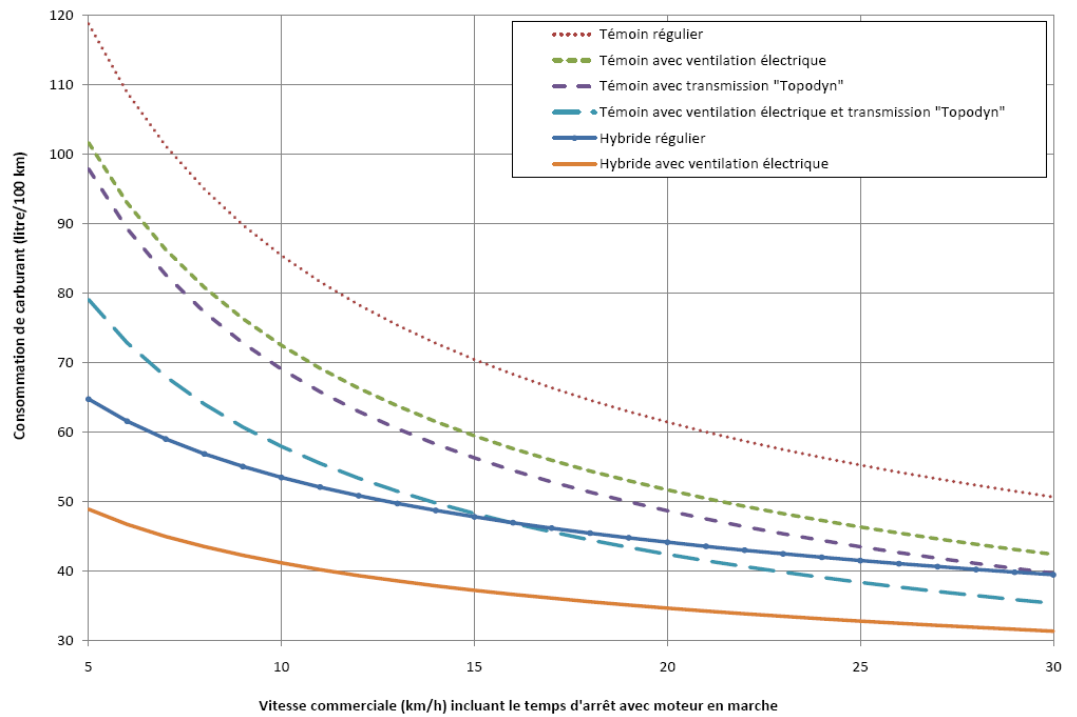
- La technologie de la ventilation électrique à bas voltage pour le radiateur moteur apporte une réduction de consommation, même à haute vitesse, en comparaison avec la ventilation hydraulique d'origine, même sur l'autobus hybride;
- La réduction de consommation combinée de la ventilation électrique et de la programmation Topodyn est plus importante à basse vitesse;
- La réduction de consommation est très importante pour le véhicule témoin qui combine les deux types de modifications mises à l'essai;
- L'autobus hybride modifié avec la ventilation électrique maintient l'avantage en réduction de consommation à basse vitesse sur l'autobus témoin qui combine les deux types de modification.



**Figure H-4 Comparaison des réductions de consommation de carburant selon les modifications mises à l'essai en service**



**Figure H-5 Comparaison des réductions de consommation de carburant selon les modifications mises à l'essai en service - zoom**



**NOTE : les graphique et tableaux de consommation dans cette section n'incluent pas la consommation en carburant du chauffage d'appoint.**

#### 4. Les résultats des essais

Tableau H-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

Comparatif	Témoins régulier	Témoins ventilation électrique seule	Topodyn seul	Hybride régulier	Témoins ventilation + Topodyn	Hybride avec ventilation électrique
Consommation moyenne (L/100 km) Pour une vitesse moyenne de 18 Km/hr	64.6	54.4	51.4	45.5	44.5	35.6
Réduction pour une vitesse de 18 km/hr vs témoins de base (litre)		10.2	13.3	19.1	20.1	29.0
Réduction pour une vitesse de 18 km/hr vs témoins de base (%)		16%	21%	30%	31%	45%
Réduction pour une vitesse de 18 km/hr vs EMP (litre)			3.1	8.9	9.9	18.8
Réduction pour une vitesse de 18 km/hr vs EMP (%)			6%	16%	18%	35%
Réduction pour une vitesse de 18 km/hr vs topodyn (litre)				5.9	6.9	15.8
Réduction pour une vitesse de 18 km/hr vs topodyn (%)				11%	13%	31%
Réduction pour une vitesse de 18 km/hr vs hybride (litre)					1.0	9.9
Réduction pour une vitesse de 18 km/hr vs hybride (%)					2%	22%
Réduction pour une vitesse de 18 km/hr vs témoins+EMP+topodyn (litre)						8.9
Réduction pour une vitesse de 18 km/hr vs témoins+EMP+topodyn (%)						20%

**Tableau H-2 Consommation de carburant (en litre/100 km) pour les divers scénarios et comparaison des réductions de consommation de carburant - Pour une vitesse moyenne de 13 km/h**

Comparatif	Témoins régulier	Témoins ventilation électrique	Topodyn seul	Hybride régulier	Témoins ventilation + Topodyn	Hybride avec ventilation
Consommation moyenne (L/100 km) Pour une vitesse moyenne de 13 Km/hr	75.4	63.8	60.5	49.8	51.5	38.6
Réduction pour une vitesse de 13 km/hr vs témoins de base (litre)		11.6	14.9	25.7	23.9	36.8
Réduction pour une vitesse de 13 km/hr vs témoins de base (%)		15%	20%	34%	32%	49%
Réduction pour une vitesse de 13 km/hr vs EMP (litre)			3.3	14.0	12.3	25.2
Réduction pour une vitesse de 13 km/hr vs EMP (%)			5%	22%	19%	39%
Réduction pour une vitesse de 13 km/hr vs topodyn (litre)				10.8	9.0	21.9
Réduction pour une vitesse de 13 km/hr vs topodyn (%)				18%	15%	36%
Réduction pour une vitesse de 13 km/hr vs hybride (litre)					-1.8	11.2
Réduction pour une vitesse de 13 km/hr vs hybride (%)					-4%	22%
Réduction pour une vitesse de 13 km/hr vs témoins+EMP+topodyn (litre)						12.9
Réduction pour une vitesse de 13 km/hr vs témoins+EMP+topodyn (%)						25%

**Tableau H-3 Consommation de carburant (en litre/100 km) pour les divers scénarios et comparaison des réductions de consommation de carburant - Pour une vitesse moyenne de 25 km/h**

Comparatif	Témoins régulier	Témoins ventilation électrique seule	Topodyn seul	Hybride régulier	Témoins ventilation + Topodyn	Hybride avec ventilation électrique
Consommation moyenne (L/100 km) Pour une vitesse moyenne de 25 Km/hr	55.3	46.4	43.5	41.5	38.4	32.8
Réduction pour une vitesse de 25 km/hr vs témoins de base (litre)		8.9	11.7	13.7	16.9	22.4
Réduction pour une vitesse de 25 km/hr vs témoins de base (%)		16%	21%	25%	31%	41%
Réduction pour une vitesse de 25 km/hr vs EMP (litre)			2.8	4.8	8.0	13.5
Réduction pour une vitesse de 25 km/hr vs EMP (%)			6%	10%	17%	29%
Réduction pour une vitesse de 25 km/hr vs topodyn (litre)				2.0	5.1	10.7
Réduction pour une vitesse de 25 km/hr vs topodyn (%)				5%	12%	25%
Réduction pour une vitesse de 25 km/hr vs hybride (litre)					3.1	8.7
Réduction pour une vitesse de 25 km/hr vs hybride (%)					8%	21%
Réduction pour une vitesse de 25 km/hr vs témoins+EMP+topodyn (litre)						5.6
Réduction pour une vitesse de 25 km/hr vs témoins+EMP+topodyn (%)						15%