

TP 13205F

**ESSAI DE VALIDATION DE LA DURÉE DE VIE
D'AUTOBUS URBAINS
DE CONSTRUCTION RENFORCÉE**

**Préparé pour le
Centre de développement des transports
Sécurité et sûreté
Transports Canada**

**par
ORTECH Corporation**

Mars 1998

Rapport ORTECH n° 98-1-05-03-01-10362

TP 13205F

**ESSAI DE VALIDATION DE LA DURÉE DE VIE
D'AUTOBUS URBAINS
DE CONSTRUCTION RENFORCÉE**

par

**Gordon F. Mutch, Ph.D., ing.
Program Director, Heavy Duty Vehicles
ORTECH Corporation**

Mars 1998

Les opinions et les vues exprimées dans ce rapport sont celles du contractant et ne reflètent pas nécessairement celles du Centre de développement des transports.

Le Centre de développement des transports ne se porte garant d'aucun produit, fabricant ou fournisseur de services. Les appellations commerciales citées dans ce rapport ont pour seul objet de rendre l'exposé plus clair.

Conformément à l'usage dans l'industrie, le présent rapport utilise les mesures impériales plutôt que les mesures métriques.

Also available in English under the title *Design life validation testing of heavy duty transit buses*, TP 13205E.



1. N° de la publication de Transports Canada TP 13205F		2. N° de l'étude 8928		3. N° de catalogue du destinataire	
4. Titre et sous-titre Essai de validation de la durée de vie d'autobus urbains de construction renforcée				5. Date de la publication Mars 1998	
				6. N° de document de l'organisme exécutant	
7. Auteur(s) Gordon F. Mutch				8. N° de dossier - Transports Canada ZCD1465-610-8	
9. Nom et adresse de l'organisme exécutant ORTECH Corporation 2395 Speakman Dr. Mississauga, Ontario L5K 1B3				10. N° de dossier - TPSGC XSD-5-01998	
				11. N° de contrat - TPSGC ou Transports Canada T8200-5-5557/001/XSD	
12. Nom et adresse de l'organisme parrain Centre de développement des transports (CDT) 800, boul. René-Lévesque Ouest Bureau 600 Montréal (Québec) H3B 1X9				13. Genre de publication et période visée Final	
				14. Agent de projet Claude Guérette	
15. Remarques additionnelles (programmes de financement, titres de publications connexes, etc.) Projet coparrainé par le Programme de R&D énergétiques (PRDE) et par la Stratégie nationale pour l'intégration des personnes handicapées					
16. Résumé <p>Ce rapport propose l'utilisation d'un simulateur de route pour qualifier de nouvelles structures d'autobus, cette technologie autorisant des essais plus complets, pendant le cycle de développement d'un produit, que les techniques actuelles d'essais sur piste et sur route. Grâce à une méthode élaborée au cours de la présente étude, il est possible de certifier un autobus pour une durée de vie probable de 500 000 milles dans les rues de New York, et ce dans un délai raisonnable. Tant les constructeurs que les exploitants d'autobus urbains de construction renforcée tireront profit de cette technologie, car elle affermira leurs attentes quant à la vie en service payant de leurs véhicules.</p>					
17. Mots clés Simulateur de route, autobus à plancher bas, qualification de conception d'autobus, essai accéléré			18. Diffusion Le Centre de développement des transports dispose d'un nombre limité d'exemplaires.		
19. Classification de sécurité (de cette publication) Non classifiée	20. Classification de sécurité (de cette page) Non classifiée	21. Déclassification (date) —	22. Nombre de pages xvi, 122	23. Prix Port et manutention	



1. Transport Canada Publication No. TP 13205F		2. Project No. 8928		3. Recipient's Catalogue No.	
4. Title and Subtitle Essai de validation de la durée de vie d'autobus urbains de construction renforcée				5. Publication Date March 1998	
				6. Performing Organization Document No.	
7. Author(s) Gordon F. Mutch				8. Transport Canada File No. ZCD1465-610-8	
9. Performing Organization Name and Address ORTECH Corporation 2395 Speakman Dr. Mississauga, Ontario L5K 1B3				10. PWGSC File No. XSD-5-01998	
				11. PWGSC or Transport Canada Contract No. T8200-5-5557/001/XSD	
12. Sponsoring Agency Name and Address Transportation Development Centre (TDC) 800 René Lévesque Blvd. West Suite 600 Montreal, Quebec H3B 1X9				13. Type of Publication and Period Covered Final	
				14. Project Officer Claude Guérette	
15. Supplementary Notes (Funding programs, titles of related publications, etc.) Co-sponsored by the Program of Energy Research and Development (PERD) and the National Strategy for the Integration of Person with Disabilities					
16. Abstract <p>This report proposes the use of road simulation technology for the structural qualification of new bus structures to enable more extensive testing in the product development cycle than is currently possible using conventional test track technology. A methodology was developed that allows for a New York equivalent 500,000 mile design life qualification within a practical time frame. Both manufacturers and operators of heavy duty transit buses will benefit from this technology because the expectations of revenue service life can be reasonably assured.</p>					
17. Key Words Road simulation, low floor buses, bus design qualification, accelerated testing			18. Distribution Statement Limited number of copies available from the Transportation Development Centre		
19. Security Classification (of this publication) Unclassified	20. Security Classification (of this page) Unclassified	21. Declassification (date) —	22. No. of Pages xvi, 122	23. Price Shipping/ Handling	

REMERCIEMENTS

ORTECH Corporation et Orion Bus Industries remercient Claude Guérette, Centre de développement des transports, Sécurité et sûreté, Transports Canada, pour son précieux appui tout au long du projet.

SOMMAIRE

En septembre 1995, un simulateur de route à couplage dynamique pneus-chaussée à six actionneurs pour l'essai de véhicules lourds était installé chez ORTECH. Cette installation visait principalement à faciliter l'essai de validation de la durée de vie (EVDV) d'autobus de construction renforcée, pour le compte de constructeurs et d'exploitants de ce type de véhicules.

Grâce à sa configuration «roulage direct», le simulateur peut accepter un large éventail de véhicules lourds, y compris des autobus articulés de 60 pieds de longueur. Les six actionneurs hydrauliques haute performance (deux de 25 000 lbf et quatre de 40 000 lbf) sont montés sur une table à rainure en T fixée à une masse sismique de 1 500 000 lb.

Le but premier du rapport est de présenter la méthode d'EVDV dérivée de cette technologie, telle que mise en oeuvre pour la première fois pour la qualification de l'autobus à plancher bas ORION VI (mû au gaz naturel) fourni à ORTECH à cette fin par Orion Bus Industries de Mississauga, Ontario.

Le lecteur ne doit pas voir dans ce rapport un compte rendu exhaustif de la qualification du véhicule ORION VI, cette information demeurant à l'usage exclusif du constructeur.

Il est toutefois possible d'affirmer, sur la foi des travaux exposés ici et de travaux ultérieurs, que l'autobus à plancher bas ORION VI répond à une durée de vie en service payant de 500 000 milles dans les conditions d'exploitation caractéristiques de New York, qui correspondent normalement à 1 000 000 milles dans les conditions d'exploitation types des grandes villes d'Amérique du Nord.

Le simulateur de route à six actionneurs pour véhicules lourds d'ORTECH est une des principales installations du Laboratoire de la dynamique des véhicules de la société, lequel comprend aussi un simulateur de route à couplage dynamique pneus-chaussée pour véhicules légers à quatre actionneurs, utilisé pour des essais d'endurance de structures

automobiles, et un simulateur polyvalent appelé MAST (pour *Multi-Axis Simulation Test*), pour la validation de la conception de composants et de sous-systèmes considérés isolément de l'ensemble du véhicule.

Le simulateur de route à quatre actionneurs est enfermé dans une chambre climatique dont il est possible de régler la température (de -40 °F à 176 °F), la charge solaire et l'humidité (jusqu'à 95 %) pour les essais d'endurance de base.

L'utilisation du simulateur de route à six actionneurs pour véhicules lourds par les constructeurs et les exploitants de véhicules lourds de toutes catégories, en particulier les constructeurs d'autobus et de camions de construction renforcée, devrait générer les avantages suivants :

- réduction du temps et des coûts associés au développement de nouveaux produits;
- accroissement de la qualité et de la fiabilité des produits;
- accroissement de la capacité concurrentielle sur les marchés internationaux;
- accroissement de la sûreté des produits;
- diminution du risque financier, pour les organismes de financement publics;
- réduction des coûts afférents au service couverts par la garantie pour les constructeurs;
- réduction des coûts de maintenance non couverts par la garantie du constructeur, pour les exploitants de parcs de véhicules;
- capacité de caractériser le potentiel de vie en service prolongée d'un véhicule;
- capacité de valider l'intégrité de modifications en rattrapage;
- capacité de qualifier une conception de véhicule dans un environnement opérationnel précis;
- capacité de mener des essais sans égard aux conditions météorologiques.

Les essais de simulation permettent de reproduire presque toutes les conditions réelles d'exploitation, aux fins de la validation d'un produit dans un environnement contrôlé --

ce qui est très différent de la méthode classique des essais accélérés d'endurance sur pistes. De plus, la simulation diminue le temps, le coût et les risques techniques associés aux méthodes d'essai conventionnelles.

Dans l'industrie automobile, la simulation en laboratoire a mené à des résultats aussi précis que ceux obtenus sur les pistes d'essai, mais en un quart du temps, et à des coûts moindres.

La technique de simulation pour l'essai de véhicules moteurs a été mise au point dans les années 70. Mais ce n'est qu'au début des années 80 qu'elle s'est généralisée dans l'industrie automobile, se révélant un atout inestimable pour faire passer de cinq à trois ans le cycle de conception des produits, et pour réagir à la hausse des exigences touchant la qualité.

Mais il aura fallu un certain temps avant que les constructeurs de véhicules lourds profitent eux aussi des avantages associés au recours à la simulation, retard qui peut être imputé aux caractéristiques du marché et au coût élevé des simulateurs.

ORTECH est au service de l'industrie des véhicules lourds, et en particulier des constructeurs d'autobus, depuis quinze ans, soit depuis la mise au point de sa méthode unique d'analyse et d'essai conceptuels (DAT, pour *Design Analysis and Test*), centrée sur l'ingénierie assistée par ordinateur (IAO), pour la qualification de véhicules sous l'angle de l'endurance structurale, dans le cadre d'un mandat qui consistait à déceler l'origine de défaillances touchant un parc d'autobus à Chicago, en 1984-1985.

Depuis ce temps, ORTECH a appliqué sa technique DAT à plus de 50 modèles d'autobus présentant diverses configurations (emmarchement standard, plancher bas, véhicule articulé), au cours de divers projets émanant de la plupart des grands constructeurs d'autobus nord-américains et de plus en plus de leurs homologues européens.

Le simulateur de route pour véhicules lourds représente un jalon marquant vers une meilleure qualité des produits, en permettant des essais mécaniques plus complets des nouveaux modèles de véhicules lourds -- avant qu'ils soient lancés sur le marché.

Les travaux ont eu lieu chez ORTECH Corporation à Mississauga, Ontario, Canada, du 1^{er} janvier au 31 mars 1996. On peut se procurer une vidéocassette présentant l'essai de validation de l'ORION VI ainsi que la démarche qui a présidé à l'essai, en faisant une demande à ORTECH.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
1.0 INTRODUCTION	1
2.0 OBJECTIFS	3
3.0 CONTEXTE	4
4.0 DÉMARCHE TECHNIQUE	12
4.1 Essais sur circuit réel	12
4.1.1 Instrumentation du véhicule	12
4.1.2 Conditions d'essai	13
4.1.3 Traitement des données	16
4.1.3.1 Calcul de la durée de vie en fatigue	16
4.1.3.2 Endommagement dû à l'accélération	19
4.1.4 Résultats des essais sur route	20
4.1.4.1 Endommagement dû à l'accélération	20
4.1.4.2 Durée de vie fondée sur les mesures de déformation	22
4.2 Établissement des fichiers de sollicitations	26
4.2.1 Règles concernant les essais accélérés	26
4.2.2 Composition du fichier de simulation	27
4.2.3 Examen des données	30
4.3 Itération des fichiers de sollicitations	32
4.3.1 Préparation du véhicule	32
4.3.2 Système de retenue du véhicule	34
4.3.3 Élaboration des fichiers de sollicitations	35
4.3.4 Validation des fichiers de sollicitations	36
4.4 Essai d'endurance	39
4.4.1 Protocole d'essai	39
4.4.2 Méthodes d'inspection	42
4.4.3 Chronologie de l'essai	43
5.0 CONCLUSIONS	46
RÉFÉRENCES	47
BIBLIOGRAPHIE	48
FIGURES	<i>(Non disponible en format électronique/ Not available in electronic format)</i>

Liste des figures

- Figure 1a Simulateur de route à couplage dynamique pneus-chaussée à 6 actionneurs pour véhicules lourds d'ORTECH (avant la mise en place des rampes de roulage)
- Figure 1b Simulateur de route à couplage dynamique pneus-chaussée à 6 actionneurs pour véhicules lourds d'ORTECH (une fois les rampes de roulage installées)
- Figure 2 Processus de qualification de la conception d'autobus urbains d'ORTECH
- Figure 3 Distribution des sollicitations et dommage cumulatif par rapport à l'amplitude des contraintes, pour un circuit d'autobus urbain type
- Figure 4a Piste d'essai et circuit d'autobus - Comparaison de la distribution des sollicitations
- Figure 4b Piste d'essai et circuit d'autobus - Comparaison du dommage cumulatif
- Figure 4c Paramètres de la piste d'essai - Facteurs d'accélération nominal et réel
- Figure 5 Niveaux de sévérité relatifs des circuits du réseau d'autobus new-yorkais, pour des autobus roulant 50 % du temps à vide et 50 % en charge
- Figure 6 Modèle aux éléments finis de l'autobus à plancher bas ORION VI de 40 pieds
- Figure 7a Emplacements des jauges extensométriques n^{os} 1, 22 et 24, dans la région de la porte avant
- Figure 7b Emplacements des jauges extensométriques n^{os} 2 et 3, dans la région du toit
- Figure 7c Emplacements des jauges extensométriques n^{os} 4, 5, 7 et 11, dans la région de la porte milieu
- Figure 7d Emplacements des jauges extensométriques n^{os} 6, 8, 9, 10 et 16, dans la région de la porte milieu
- Figure 7e Emplacement de la jauge extensométrique n^o 13, dans la région de la cage de roue arrière, côté trottoir
- Figure 7f Emplacements des jauges extensométriques n^{os} 14, 17 et 20, dans la région arrière de l'autobus
- Figure 7g Emplacements des jauges extensométriques n^{os} 15 et 25, dans la région de la porte arrière

- Figure 7h Emplacements des jauges extensométriques n^{os} 18 et 19 aux supports de jambes de force arrière
- Figure 7i Emplacements des jauges extensométriques n^{os} 21 et 23 aux jambes de suspension avant
- Figure 8 Autobus à plancher bas ORION VI de 40 pieds fourni à ORTECH
- Figure 9a Instrumentation embarquée de conditionnement et d'enregistrement des données
- Figure 9b Intérieur de l'autobus avec charge simulant des passagers
- Figure 10 Plan du circuit 35 Brooklyn (B35) du réseau new-yorkais
- Figure 11a Nids de poule sur le tronçon en pavés du circuit B35
- Figure 11b Vue du tronçon en pavés du circuit B35
- Figure 11c Passage à niveau du circuit B35 (vue de côté)
- Figure 11d Passage à niveau sur le circuit B35 (vue de face)
- Figure 12 Exemple de calcul de la durée de vie en fatigue d'un joint de catégorie G (1 écart-type)
- Figure 13 Exemple de calcul du facteur d'endommagement dû à l'accélération
- Figure 14a Facteurs d'endommagement dû à l'accélération - Essais sur route de l'autobus à vide et en charge - Circuit B35 (sans le passage à niveau)
- Figure 14b Facteurs d'endommagement dû à l'accélération - Essais sur route de l'autobus à vide et en charge - Tronçon en pavés franchi à 30 mi/h
- Figure 15a Facteur d'accélération fondé sur les facteurs d'endommagement dû à l'accélération -Autobus à vide
- Figure 15b Facteur d'accélération fondé sur les facteurs d'endommagement dû à l'accélération -
-
Autobus en charge
- Figure 16a Durées de vie de diverses catégories de joints (1 écart-type)
Essai sur route - Circuit B35 (y compris le passage à niveau) - Autobus à vide
Courbe d'endurance modifiée

- Figure 16b Durées de vie de diverses catégories de joints (1 écart-type)
Essai sur route - Circuit B35 (y compris le passage à niveau) - Autobus en charge
Courbe d'endurance modifiée
- Figure 16c Durées de vie de diverses catégories de joints (1 écart-type)
Essai sur route - Circuit B35 (y compris le passage à niveau) - Configuration
de charge combinée - Courbe d'endurance modifiée
- Figure 17a Durées de vie de diverses catégories de joints (1 écart-type)
Essai sur route - Circuit B35 (sans le passage à niveau) - Autobus à vide
Courbe d'endurance modifiée
- Figure 17b Durées de vie de diverses catégories de joints (1 écart-type)
Essai sur route - Circuit B35 (sans le passage à niveau) - Autobus en charge
Courbe d'endurance modifiée
- Figure 17c Durées de vie de diverses catégories de joints (1 écart-type)
Essai sur route - Circuit B35 (sans le passage à niveau) - Configuration de charge
combinée - Courbe d'endurance modifiée
- Figure 18a Durées de vie de diverses catégories de joints (1 écart-type)
Essai sur route - Tronçon en pavés franchi à 30 mi/h - Autobus à vide
Courbe d'endurance modifiée
- Figure 18b Durées de vie de diverses catégories de joints (1 écart-type)
Essai sur route - Tronçon en pavés franchi à 30 mi/h - Autobus en charge
Courbe d'endurance modifiée
- Figure 18c Durées de vie de diverses catégories de joints (1 écart-type)
Essai sur route - Tronçon en pavés franchi à 30 mi/h - Configuration de charge
combinée - Courbe d'endurance modifiée
- Figure 19a Facteur d'accélération d'après les durées de vie fondées sur les données
de déformation - Autobus à vide
- Figure 19b Facteur d'accélération d'après les durées de vie fondées sur les données
de déformation - Autobus en charge
- Figure 20 Diagramme d'évolution - Circuit de référence B35 - Autobus à vide
Accélération à la fusée d'essieu avant, côté trottoir *plus* déformation
à l'extensomètre n° 9

- Figure 21 Diagramme d'évolution - Tronçon en pavés franchi à 30 mi/h - Autobus à vide
Accélération à la fusée d'essieu avant, côté trottoir *plus* déformation
à l'extensomètre n° 9
- Figure 22a Comparaison des sollicitations - Tronçon en pavés franchi à 30 mi/h et circuit B35
Accélération à la fusée d'essieu avant, côté trottoir - Autobus à vide
- Figure 22b Comparaison des sollicitations - Tronçon en pavés franchi à 30 mi/h et circuit B35
Accélération à la fusée d'essieu arrière, côté trottoir - Autobus à vide
- Figure 22c Comparaison des sollicitations - Tronçon en pavés franchi à 30 mi/h et circuit B35
Extensomètre n° 9 - Autobus à vide
- Figure 22d Comparaison des sollicitations - Tronçon en pavés franchi à 30 mi/h et circuit B35
Extensomètre n° 24 - Autobus à vide
- Figure 23a Comparaison des franchissements de seuil - Tronçon en pavés franchi à 30 mi/h et
circuit B35 - Accélération à la fusée d'essieu avant, côté trottoir - Autobus à vide
- Figure 23b Comparaison des franchissements de seuil - Tronçon en pavés franchi à 30 mi/h et
circuit B35 - Accélération à la fusée d'essieu arrière, côté trottoir - Autobus à vide
- Figure 23c Comparaison des franchissements de seuil - Tronçon en pavés franchi à 30 mi/h et
circuit B35 - Extensomètre n° 9 - Autobus à vide
- Figure 23d Comparaison des franchissements de seuil - Tronçon en pavés franchi à 30 mi/h et
circuit B35 - Extensomètre n° 24 - Autobus à vide
- Figure 24a Comparaison des spectres de fréquences - Tronçon en pavés franchi à 30 mi/h et
circuit B35 - Accélération à la fusée d'essieu avant, côté trottoir - Autobus à vide
- Figure 24b Comparaison des spectres de fréquences - Tronçon en pavés franchi à 30 mi/h et
circuit B35 - Accélération à la fusée d'essieu arrière, côté trottoir - Autobus à vide
- Figure 24c Comparaison des spectres de fréquences - Tronçon en pavés franchi à 30 mi/h et
circuit B35 - Extensomètre n° 9 - Autobus à vide
- Figure 24d Comparaison des spectres de fréquences - Tronçon en pavés franchi à 30 mi/h et
circuit B35 - Extensomètre n° 24 - Autobus à vide
- Figure 25 L'autobus à plancher bas ORION VI de 40 pieds pendant l'essai sur le simulateur
de route pour véhicules de construction renforcée d'ORTECH
- Figure 26a Fichier de simulation, autobus à vide : chevauchement des réponses sur route
et en simulation - Accélération à la fusée d'essieu avant, côté trottoir

- Figure 26b Fichier de simulation, autobus à vide : chevauchement des réponses sur route et en simulation - Accélération à la fusée d'essieu avant, côté trottoir (détail)
- Figure 26c Fichier de simulation, autobus à vide : chevauchement des réponses sur route et en simulation - Accélération à la fusée d'essieu arrière, côté trottoir
- Figure 26d Fichier de simulation, autobus à vide : chevauchement des réponses sur route et en simulation - Accélération à la fusée d'essieu arrière, côté trottoir (détail)
- Figure 26e Durées de vie de diverses catégories de joints (1 écart-type)
Réponses en simulation sur tronçon en pavés - Autobus à vide
Endommagement par mille, par rapport au circuit de référence B35
- Figure 27a Fichier de simulation, autobus en charge : chevauchement des réponses sur route et en simulation - Accélération à la fusée d'essieu avant, côté trottoir
- Figure 27b Fichier de simulation, autobus en charge : chevauchement des réponses sur route et en simulation - Accélération à la fusée d'essieu avant, côté trottoir (détail)
- Figure 27c Fichier de simulation, autobus en charge : chevauchement des réponses sur route et en simulation - Accélération à la fusée d'essieu arrière, côté trottoir
- Figure 27d Fichier de simulation, autobus en charge : chevauchement des réponses sur route et en simulation - Accélération à la fusée d'essieu arrière, côté trottoir (détail)
- Figure 27e Durées de vie de diverses catégories de joints (1 écart-type)
Réponses en simulation sur tronçon en pavés - Autobus en charge
Endommagement par mille, par rapport au circuit de référence B35
- Figure 28a Compte rendu d'inspection n° 1 - Inspection de sécurité (*quotidienne ou au besoin*)
- Figure 28b Compte rendu d'inspection n° 2 - Avis de remplacement de pièces (*au besoin*)
- Figure 28c Compte rendu d'inspection n° 3 - Inspection de changement de quart
(*à tous les changements de quart*)
- Figure 28d Compte rendu d'inspection n° 4 - Inspection de l'intégrité structurale du véhicule
(*hebdomadaire*)

1.0 INTRODUCTION

En septembre 1995, un simulateur de route à couplage dynamique pneus-chaussée à six actionneurs pour l'essai de véhicules lourds était installé chez ORTECH, en vue principalement de faciliter l'essai de validation de la durée de vie (EVDV) d'autobus de construction renforcée, pour le compte des constructeurs et des exploitants de ce type de véhicules. La figure 1a montre le simulateur avant l'installation des rampes de roulage, et la figure 1b, une fois les rampes mises en place.

On trouvera à la figure 2 le schéma du processus de qualification de la conception d'un véhicule mis en oeuvre au moyen du simulateur de route pour poids lourds d'ORTECH. Ce processus, qui vaut pour toutes les catégories de véhicules, comporte les phases suivantes :

- PHASE A : Analyses et essais conceptuels (DAT, pour *Design Analysis and Test*) -- combinaison d'analyses et d'essais permettant d'établir une espérance de vie de 500 000 milles de la structure de l'autobus.
- PHASE B: Essai de validation de la durée de vie (EVDV) -- utilisation d'un simulateur de route pour un essai d'endurance accéléré de 500 000 milles de l'autobus, en laboratoire.

La PHASE A repose sur une technologie mise au point par ORTECH au milieu des années 80 pour remédier à une défaillance majeure qui affectait un parc d'autobus à Chicago. Ce n'est que *récemment* que le succès de ces travaux s'est véritablement avéré, alors que les autobus qui avaient subi de lourdes modifications en rattrapage sont finalement arrivés au terme de leur espérance de vie en service dans les conditions d'exploitation caractéristiques de la CTA, soit douze (12) ans.

La PHASE B correspond à la mise en oeuvre du tout nouveau simulateur de route EVDV, qui permet de soumettre les autobus à des essais beaucoup plus poussés que les techniques actuelles d'essais sur piste et sur route. La simulation permet en effet de mener en trois (3) *mois* seulement un essai de validation d'une durée de vie de 500 000 milles dans des conditions équivalentes à celles qui règnent à Chicago.

La PHASE B ne *remplace* pas la PHASE A. Celle-ci comporte en effet des étapes préalables essentielles à un essai de validation de 500 000 milles qui soit probant. Le présent rapport est avant tout axé sur le développement et la documentation des techniques relatives aux EVDV.

Ce rapport a été rédigé à partir des divers documents produits par ORTECH au cours des travaux de conception des autobus à plancher bas ORION VI. Les renseignements contenus dans ces documents, dont la liste chronologique complète est donnée dans la bibliographie en annexe au présent rapport, demeurent à l'usage exclusif de Orion Bus Industries.

2.0 OBJECTIFS

Ce projet avait pour objet ce qui suit :

- établir la crédibilité de la méthode du simulateur de route aux yeux des fabricants et des propriétaires d'autobus de construction renforcée;
- élaborer et perfectionner la méthodologie associée à l'utilisation du simulateur de route pour poids lourds;

et mettre en oeuvre la méthodologie, comme suit :

- instrumenter un *prototype* d'autobus à plancher bas ORION VI de 40 pieds de longueur (mû au gaz naturel) mis à la disposition d'ORTECH par Orion Bus Industries Ltd. et colliger les réponses du véhicule, à vide et en charge, lors d'expériences en vraie grandeur dans l'environnement opérationnel de New York;
- à partir des données obtenues, établir et valider des «fichiers de sollicitations» représentatifs des conditions d'exploitation caractéristiques de New York, pour le véhicule à vide et en charge, à entrer dans le simulateur de route pour véhicules lourds d'ORTECH;
- réaliser, sur le simulateur de route, un essai d'endurance de 500 000 milles dans des conditions simulant les rues de *New York*, en répartissant également les temps de fonctionnement à vide et en charge et en procédant à des inspections et des vérifications périodiques.

3.0 CONTEXTE

Il est généralement accepté, dans l'industrie nord-américaine des poids lourds, de limiter les garanties sur la structure des véhicules à un pourcentage relativement restreint de la durée de vie nominale du véhicule. C'est en partie pour cette raison, mais aussi à cause des contraintes imposées par les méthodes d'essai classiques, sur autodromes, que les essais d'endurance structurale dépassent rarement la période de garantie du véhicule.

Il n'est donc pas étonnant que les défaillances structurales soient relativement courantes dans l'industrie des véhicules lourds *en général* -- surtout lorsque des conditions d'exploitation particulièrement sévères ont vite fait de mettre au jour les faiblesses de conception.

Pour tenter de remédier à cette situation dans l'industrie des autobus, la United States Federal Transit Administration (FTA) mettait sur pied, en 1989, le programme d'essais de la Surface Transportation and Uniform Relocation Assistance Act (STURAA), administré par la Penn State Bus Research and Testing Facility (PSBRTF) située à State College, Pa.

Ce programme d'essais, obligatoire pour tous les nouveaux modèles de véhicules, vise à évaluer ceux-ci au regard de la maintenabilité, de la fiabilité, de la sûreté, des performances, de l'intégrité structurale, de la consommation de carburant et du bruit. L'essai d'endurance structurale est le volet le plus important du programme, et celui qui prend le plus de temps.

L'autodrome est situé à State College, Pa., et comporte des tronçons types pour essais d'endurance, soit une dépression de 4 po de profondeur et de 4 pi de diamètre, des bosses en quinconce de 6 po de hauteur, des dépressions de 1 po de profondeur de superficie

inéegale, des bosses de $\frac{3}{4}$ po de hauteur en biais de 18° par rapport à l'axe de roulement et un tronçon creusé d'ornières transversales, simulant une intersection. L'objectif consiste notamment à réaliser des essais d'endurance accélérés d'une durée représentant aussi peu que 25 % environ de la durée de vie nominale du véhicule.

Cela signifie, dans le cas d'un autobus urbain de construction renforcée dont l'espérance de vie est de 500 000 milles, un essai sur piste totalisant 12 500 milles, dans diverses configurations correspondant à sa masse à vide, à son poids nominal brut et à sa masse avec passagers assis. Moyennant un facteur d'accélération nominal de 10:1, l'essai de 12 500 milles est censé représenter 125 000 milles, ou 25 % d'une espérance de vie de 500 000 milles. L'essai prend normalement trois (3) mois, voire plus.

Mais l'expérience d'ORTECH amène à douter de la représentativité de la piste d'essai par rapport aux conditions réelles de conduite sur route, ainsi que de la validité du facteur d'accélération.

Il est raisonnable, pour une société de transports publics, de s'attendre à ce que la durée de vie de 500 000 milles des autobus urbains de construction renforcée qu'elle s'apprête à acheter vaille pour l'environnement opérationnel *particulier* auquel elle destine ses véhicules. De plus en plus de marchés d'acquisition comportent des conditions qui témoignent de cette attente. En voici un exemple :

«L'autobus est garanti pour 500 000 milles contre toute défaillance ou défaut de structure, sur n'importe quelle combinaison de circuits présentant un degré de sévérité moyen équivalent à celui de l'environnement opérationnel cible considéré globalement.»

Lorsque qu'aucun essai de validation de durée de vie n'est prévu par le constructeur, l'essai STURAA est la seule façon d'évaluer l'endurance structurale d'un autobus. Mais

comme le degré de sévérité des conditions d'exploitation cibles n'est généralement pas pris en compte, la valeur des résultats peut se trouver gravement compromise.

Par exemple, ORTECH a montré que le facteur d'accélération nominal de 10:1 associé à l'autodrome de State College est à peu près valide pour Toronto, qui peut être considéré comme représentatif de l'environnement opérationnel moyen, en Amérique du Nord. Mais les paramètres fixes associés tant à la piste qu'au kilométrage d'essai représentent un facteur d'accélération de seulement 4:1 environ, pour les conditions d'exploitation sévères de Chicago et de New York.

Ainsi, l'essai de 12 500 milles réalisé à State College ne représente, au mieux, qu'environ 50 000 milles, dans ces villes, soit près de 10 %, environ, de la durée de vie en service attendue.

ORTECH est donc d'avis que les essais de validation présentement effectués pour garantir l'intégrité structurale d'un autobus pendant toute sa durée de vie sont insuffisants, surtout lorsque ces véhicules sont destinés à des villes où les conditions d'exploitation sont relativement rigoureuses.

Mais les lacunes des techniques d'essai sur piste et le peu d'accessibilité des nouvelles technologies de simulation de route ont laissé l'industrie relativement démunie devant cette insuffisance. D'où les risques importants assumés tant par les constructeurs que par les exploitants -- surtout dans le cas de véhicules de conception nouvelle.

Une autre limite associée aux pistes d'essai est qu'elles ne sont d'aucune utilité pour déterminer l'influence de caractéristiques dynamiques indésirables d'un véhicule, p. ex., le couplage des modes propres à la suspension et à la structure flexible, si le protocole d'essai n'est pas soigneusement conçu. Donc, malgré un essai apparemment concluant

dans l'environnement artificiel de la piste d'essai, il est possible que survienne une défaillance précoce dans les conditions de conduite sur route.

Les limites citées ci-dessus découlent souvent du fait que les pistes d'essai s'efforcent généralement de reproduire des sollicitations «extrêmes», de nature quasi statique, plutôt que de recréer un échantillon représentatif des sollicitations de faible à moyenne amplitude, toujours présentes dans l'environnement opérationnel et premières responsables des ruptures par fatigue pendant la vie en service.

Ces sollicitations de faible amplitude résultent de l'excitation aléatoire, de faible intensité et plus ou moins constante de la structure, due aux irrégularités de la chaussée. Une excitation de résonance(s) structurale(s) se produira, par exemple, si les modes de la suspension et de l'ossature sont étroitement couplés.

Il est relativement rare que l'exposition à des sollicitations *extrêmes*, p. ex., des nids de poule, etc., entraîne une défaillance structurale. Le cas échéant, il est plus probable qu'une telle défaillance survienne sur un seul véhicule plutôt que sur l'ensemble du parc. Or, c'est ce type de défaillance généralisée qui est normalement le plus préoccupant.

L'importance des sollicitations de faible amplitude est illustrée à la figure 3, où presque 75 % de l'endommagement d'un point de mesure potentiellement fragile, en l'occurrence une traverse de porte d'autobus urbain (*autre* que l'ORION VI), a été attribué à des contraintes alternées de faible et de moyenne amplitude.

Dans ces circonstances, le fait de mener un essai d'endurance accéléré fondé sur des facteurs d'accélération *différents* pour les sollicitations de faible et de forte amplitude risque d'invalider le facteur d'accélération associé à la piste d'essai. Ce facteur d'accélération se trouve également invalidé si l'amplitude maximale des sollicitations

reproduites à la piste d'essai est supérieure à celle des sollicitations caractéristiques de l'environnement de conduite normal.

De plus, les défaillances exceptionnelles, uniquement dues au caractère artificiel de la piste d'essai, sont souvent considérées avec suspicion.

C'est ainsi que l'on modifie parfois un véhicule pour qu'il puisse survivre aux conditions de la piste d'essai plutôt qu'à celles de la conduite sur route, celles qui comptent!

Les figures 4a, 4b et 4c servent à illustrer les lacunes potentielles inhérentes à une piste d'essai, comme suit :

- La figure 4a permet de comparer l'accélération de la pesanteur (notée g) d'un essieu arrière sur un circuit de référence et sur une piste d'essai. Dans les deux cas, pour faciliter la comparaison de trajets de longueurs différentes, les cycles de contrainte ont été extrapolés sur toute la durée de vie cible du véhicule. On voit que : a) la piste d'essai comporte davantage de sollicitations que le circuit de référence; b) il n'est possible de dégager un rapport constant entre les réponses individuelles que pour une faible proportion des réponses.
- La figure 4b montre l'«endommagement» cumulatif de la structure, calculé à partir des réponses g de la figure 4a -- voir la section 4.1.3.2 pour la méthodologie. On peut voir que pour le circuit de référence, 80 % de l'endommagement est dû à des sollicitations équivalant à la moitié de l'amplitude maximale de 10 g , tandis que, dans le cas de la piste d'essai, seulement 30 % de l'endommagement est dû à ces sollicitations d'amplitude médiane, la majeure partie étant attribuée aux sollicitations de forte amplitude, mais non représentatives, recrées sur la piste d'essai.

- La figure 4c illustre graphiquement le facteur d'accélération *réel* associé à la piste d'essai, résultant de la division de la distribution des sollicitations dans le monde réel par la distribution des sollicitations sur la piste d'essai, d'après les données de la figure 4a. Aucune constante ne se dégage, le taux variant de 1:1 pour les sollicitations de faible amplitude à 100:1 pour les sollicitations de forte amplitude, ce qui est loin du facteur d'accélération «moyen» nominal, établi à environ 22:1.

Il importe de souligner que la piste PSBRTF n'est pas la seule à souffrir de lacunes techniques par rapport aux conditions de conduite sur route. ORTECH a été à même de constater des carences semblables à d'autres pistes qu'il lui a été donné d'évaluer.

Mais le défaut le plus grave des pistes d'essai est qu'il est impossible, à toutes fins utiles, de mener des essais d'une durée suffisante pour valider la durée de vie en service des autobus urbains de construction renforcée.

Dans le secteur de l'automobile, il est possible, par la simulation, de mener un essai de validation de durée de vie type de 150 000 milles en à peu près dix (10) jours -- ce qui représente un avantage certain par rapport aux trois (3) mois nécessaires pour arriver au même résultat sur piste.

Dans le secteur des véhicules lourds en général, comme les durées de vie en service sont plus longues, il n'est habituellement pas possible, en pratique, de mener des essais de validation de durée de vie sur piste.

Par exemple, si on tenait pour acquis un facteur d'accélération de 10:1, un essai de validation d'une durée de vie de 500 000 milles à la piste PSBRTF ou à celle du

Transportation Research Centre (TRC), en Ohio, qui a servi de modèle à la première, prendrait au moins un (1) an.

Maintenant, en posant un facteur d'accélération de 4:1, qui est le facteur réel d'accélération pour des essais représentatifs de l'environnement opérationnel plus sévère de New York et de Chicago, un essai de 500 000 milles prendrait plus de *deux* (2) ans!

Et dans aucun de ces deux cas, on ne prend en compte les conditions météorologiques défavorables, auxquelles le simulateur de route lui, est insensible.

Dans ces circonstances, le simulateur de route représente la *seule* façon, pour le secteur des véhicules de construction renforcée, de mener des essais de validation de durée de vie dans des délais raisonnables.

Les vastes travaux effectués à New York par ORTECH pour le compte de plusieurs clients, dont le New York City Transit Department of Buses (NYCT) de la MTA, ont permis d'établir que les conditions opérationnelles qui règnent à New York sont environ *deux fois* plus sévères que les conditions moyennes d'exploitation qui caractérisent les grandes villes nord-américaines. En d'autres mots, un autobus qualifié pour une durée de vie de 500 000 milles dans des conditions d'exploitation moyennes ne serait qualifié que pour 250 000 milles à New York.

Jusqu'à récemment, les constructeurs et les exploitants d'autobus urbains ne tenaient généralement pas compte de cette différence, et pour cette raison, les défaillances structurales ont surtout été associées aux grandes sociétés de transport américaines. Mais à l'inverse, on peut s'attendre d'un autobus qui est qualifié pour une durée de vie de 500 000 milles à New York puisse survivre à *1 000 000 de milles* de conduite dans des environnements opérationnels de sévérité moyenne, tel celui de Toronto, par exemple.

Lorsqu'on s'apprête à réaliser un essai de validation de durée de vie, il faut normalement commencer par un examen attentif des circuits auxquels sera affecté le véhicule, afin d'établir un modèle de simulation représentatif du degré de sévérité des conditions réelles d'exploitation.

Pour la présente recherche, intéressée à l'environnement new-yorkais, on a pu se dispenser de cette première étape, car cinquante (50) circuits avaient déjà été étudiés par ORTECH, lors de ses travaux pour le compte du NYCT-MTA [1]†. La figure 5 expose, tirés de ces travaux, les niveaux de sévérité relatifs des circuits étudiés, en supposant des véhicules roulant 50 % du temps à vide et 50 % en charge.

† Les chiffres entre crochets [] renvoient aux références

4.0 DÉMARCHE TECHNIQUE

4.1 Essais sur circuit réel

Objectif: Colliger les réponses d'un autobus instrumenté circulant sur un circuit représentatif des conditions d'exploitation cibles, dans des configurations de chargement données.

4.1.1 Instrumentation du véhicule

Pour la mesure des déformations, vingt-cinq (25) jauges extensométriques ont été installées à bord de l'ORION VI, sur des joints *potentiellement* fragiles, définis au terme d'une analyse par la méthode des éléments finis, ou soupçonnés tels à la lumière d'essais antérieurs effectués sur le véhicule.

La modélisation de l'ORION VI pour l'analyse par éléments finis a eu lieu à la phase A des travaux (Analyses et essais conceptuels). On peut voir à la figure 6 le modèle obtenu. Pour plus de clarté, seules les poutres et poutrelles sont montrées. Tous les éléments de l'enveloppe (fenêtres, panneaux de carrosserie, plancher) ont été supprimés. Les figures 7a à 7i montrent les joints où les contraintes calculées ont dépassé les contraintes admissibles, définies en fonction d'une durée de vie cible dans des conditions d'exploitation équivalentes à celles de New York, pour les charges de calcul standard.

Des accéléromètres ont été montés aux essieux avant et arrière, afin d'enregistrer l'accélération verticale pendant l'essai. Des capteurs de déplacement ont également été installés sur chacun des amortisseurs, pour enregistrer le mouvement relatif de la suspension et de la structure du véhicule.

Des accéléromètres ont aussi été installés à l'arrière de l'autobus, suivant les axes vertical et latéral, et à l'avant, suivant les axes vertical, latéral et longitudinal, afin de mesurer les réactions du véhicule pendant l'essai.

Tous les signaux-réponses ont été enregistrés sur un système portable de saisie de données de marque MEGADAC 6516S, modèle MII #A11286, après avoir traversé un filtre passe-bas de 100 Hz. Ils étaient échantillonnés à une cadence de 256 à la seconde.

Après les parcours d'essai dans les rues de New York, les données colligées et enregistrées ont été téléchargées vers un poste de travail de Silicon Graphics situé aux installations d'ORTECH à Mississauga, Ontario, où elles ont été traitées au moyen du module TEST du logiciel I-DEAS de la SDRC (Structural Dynamics Research Corporation).

4.1.2 Conditions d'essai

Un prototype de l'ORION VI (figure 8) a été mis à l'essai dans les deux configurations à vide et en charge -- la figure 9a montre le système embarqué de saisie des données.

Pour atteindre le poids nominal brut du véhicule, des sacs de sable, simulant des passagers debout et assis, ont été placés à bord, de façon à respecter la répartition requise de la charge entre les essieux -- la figure 9b montre le véhicule dans sa version lestée.

Compte tenu du poids de l'autobus, du lest, de l'équipement et de l'équipe d'essai, les masses se répartissaient comme suit :

Configuration	Essieu avant (lbf)	Essieu arrière (lbf)	Total (lbf)
À vide	9 700	20 300	29 980
En charge	14 520	27 220	41 720

La pression des pneus était de 107 lb/po² à l'avant et de 110 lb/po² à l'arrière. La pression de carburant était d'environ 2 200 et 2 500 lb/po², respectivement, au cours des essais à vide et en charge.

La plupart des essais ont eu lieu à Brooklyn, sur le circuit B35, qui comporte un tronçon en pavés et un passage à niveau particulièrement cahoteux. Le circuit B35 *abstraction faite* du passage à niveau s'est révélé représentatif d'un parcours de sévérité moyenne du réseau new-yorkais. La figure 10 présente un plan de l'itinéraire B35, d'une longueur de 6,3 milles.

On peut voir, aux figures 11a et 11b, le tronçon en pavés du circuit B35, y compris certaines dépressions «sévères», parcouru une première fois aux vitesses normales de service. Puis, le même tronçon a été parcouru à 10, 20 et 30 mi/h, aux fins expresses de la préparation des fichiers destinés au simulateur de route, conformément aux règles concernant les essais accélérés énoncées à la section 4.2.1.

Les figures 11c et 11d font voir le passage à niveau à multiples voies qui se situe normalement sur le trajet du circuit B35. La présence de ce passage à niveau fait en sorte d'accroître d'environ 25 % le degré de sévérité de l'ensemble du circuit B35, par rapport à la moyenne (voir la figure 5).

Outre les sollicitations associées au circuit de référence normal, une série de sollicitations *spéciales*, c.-à-d. qui ne font pas partie, en temps normal, du circuit de référence, ont été «mises en scène» sur un terrain du NYCT, à une des extrémités de la ligne B35 et dans les rues adjacentes :

- virage à droite avec freinage brusque;
- virage à gauche avec virage brusque;
- freinage d'urgence;
- montée sur le trottoir côté chauffeur;
- montée sur le trottoir côté trottoir;
- bosses de ralentissement à 10 et 20 mi/h.

Le conducteur avait pour consigne, selon les méthodes standard d'ORTECH, de ne s'arrêter qu'à *un arrêt d'autobus sur deux*. Autrement, il devait s'en tenir le plus fidèlement possible à ses habitudes de conduite en service réel.

Les essais ont d'abord consisté en plusieurs passages unidirectionnels de l'autobus à vide sur le circuit B35, destinés à démontrer la répétabilité des calculs de la durée de vie des joints instrumentés.

Des passages uniques de l'autobus dans sa configuration en charge, chacun faisant intervenir une des sollicitations spéciales énumérées ci-dessus, ont ensuite été réalisés sur le même circuit.

4.1.3 Traitement des données

Les détails du calcul a) de la durée de vie en fatigue fondée sur les mesures de déformation et b) des facteurs d'endommagement dû à l'accélération de la pesanteur sont présentés ci-après.

4.1.3.1 Calcul de la durée de vie en fatigue

Toutes les séries numérisées de mesures de déformation en fonction du temps écoulé recueillies au cours de l'essai sur route sont d'abord soumises à un programme de comptage des demi-cycles (*rainflow*) -- une méthode jugée supérieure aux autres méthodes de comptage des cycles utilisées dans des essais de fatigue. Si on se reporte à la figure 12, par exemple, la colonne 1 donne la distribution des déformations ainsi obtenues, convertie en une distribution des contraintes correspondantes (colonne 2).

Ces distributions sont ensuite entrées dans un programme de prévision de la durée de vie spécialement conçu pour les structures soudées.

Le nombre de cycles à rupture pour un niveau de contrainte donné et pour n'importe quel joint soudé est déterminé d'après une famille de courbes réunies dans la norme British Standard 5400 [2] et couvrant diverses catégories de joints, définies selon leur configuration et leur qualité de fabrication.

Comme, au début des travaux, la catégorie des joints n'était pas précisée, les chercheurs ont attribué *implicitement* aux joints la catégorie G, ce qui devait mener à des estimations prudentes, sans l'être trop, de la durée de vie de ceux-ci. De plus, pour rendre compte de la dispersion des résultats d'essai des joints, et exprimer la *probabilité* d'apparition de rupture, une courbe avec 1 écart-type par rapport à la moyenne est utilisée.

La courbe de la *moyenne* représente une probabilité de 50 % d'apparition de rupture. Quant à la courbe avec 1 écart-type par rapport à la moyenne, elle correspond à une probabilité de survie de 84,1 %. Ce qui s'approche du critère de défaillance de 20 %, souvent utilisé pour le déclenchement de mesures correctives à la grandeur d'un parc d'autobus.

La colonne 3 donne le nombre de cycles à rupture (N) correspondant à l'amplitude de contrainte indiquée à la colonne 2, dans lequel intervient le rapport établi par la courbe avec 1 écart-type par rapport à la moyenne, pour les joints de catégorie G.

La colonne 4 indique le nombre de cycles enregistrés à un niveau donné de contrainte (déformation), pour un circuit de référence relativement court, soit, en l'occurrence, les 6,3 milles du circuit B35 de Brooklyn.

La colonne 5 indique à son tour le nombre de cycles de contrainte prévus pendant toute la durée de vie en service (500 000 milles) de l'autobus (n), en supposant que l'autobus soit affecté toute sa vie au même circuit. Il convient de noter que les durées de vie calculées ne sont aucunement tributaires de la durée de vie cible de 500 000 milles.

Pour établir les pourcentages de fatigue n/N de la colonne 6, on a divisé le nombre de cycles de contrainte prévus pendant la durée de vie de l'autobus (colonne 5) par le nombre de cycles à rupture (colonne 3).

Les estimations de dommage par fatigue sont, de fait, encore plus prudentes que ne peuvent seules l'expliquer les hypothèses posant des joints de catégorie G et une courbe avec 1 écart-type par rapport à la moyenne.

C'est que les chiffres de la colonne 6 sont fondés sur des courbes S/N qui passent tout à fait outre à l'existence d'une limite d'endurance. Pour pallier cette «omission» tout en demeurant dans les limites de la prudence, la norme BS 5400 suggère de modifier la pente de la courbe S/N lorsque le nombre de cycles à rupture est supérieur à $1E7$. La pente de toute la *famille* de courbes (droites en coordonnées bilogarithmiques) est généralement de -3, même si, pour $n > 1E7$, celle-ci est extrapolée à -5. Les pourcentages de fatigue (dommage) découlant de la courbe modifiée sont présentés à la colonne 7.

Le dommage total subi par un joint instrumenté pendant la durée de vie nominale de 500 000 milles de l'autobus est représenté par la somme des pourcentages de fatigue indiqués aux colonnes 6 et 7. Selon la loi d'endommagement de Palmgren-Miner, qui pose que le dommage est cumulatif de manière linéaire et que la rupture se produit lorsque le dommage atteint la valeur 1, le véhicule arrive au bout de sa durée de vie cible lorsque la somme des fractions $n/N = 1$. Ainsi, on obtient l'espérance de vie en divisant la durée de vie cible, ici 500 000 milles, par le dommage total.

Les calculs de durée de vie montrés à la figure 12 supposent des joints soudés de catégorie G. Mais des calculs semblables peuvent être effectués pour toute la gamme des catégories de joints de la norme BS 5400, et il est dès lors possible d'établir une «matrice» des espérances de vie des joints, selon leur catégorie.

À noter en outre, à la figure 12, une ligne distincte qui permet d'ajouter, le cas échéant, un pourcentage de dommage *incrémental* dû à un ensemble représentatif de sollicitations spéciales, qui ne font pas partie du circuit normal et qu'il serait dangereux de faire intervenir lors d'un essai sur route, p. ex., le freinage d'urgence, les virages brusques à droite et à gauche. Habituellement, à moins que le pourcentage de dommage dû à ces sollicitations soit tenu pour significatif, on peut se permettre d'en faire abstraction.

4.1.3.2 Endommagement dû à l'accélération

On réserve généralement la notion d'«endommagement» à l'estimation de la durée de vie en fonction de mesures de déformation. Mais dans le présent rapport, cette notion a été élargie pour refléter la sévérité relative d'un circuit, en fonction de mesures d'*accélération de la pesanteur*.

Pour permettre de comparer la sévérité de circuits selon des durées de vie établies en fonction de mesures d'accélération (g), d'une part, et de mesures de déformation, d'autre part, Gurney [3] a proposé une méthode, analogue à celle adoptée pour le calcul de la durée de vie en 4.1.3.1, exposée ci-après.

Les séries de mesures d'accélération en fonction du temps écoulé sont d'abord soumises au même programme de comptage des demi-cycles que les mesures de déformation.

Dans ce cas, la distribution des données d'*accélération* (g) est convertie en une distribution des *contraintes* correspondantes, par l'entremise d'un facteur d'«étalonnage» approprié.

Ainsi, dans les colonnes 1 et 2 de la figure 13, on a supposé, pour la commodité de la chose, un «étalonnage» entièrement arbitraire de $10\,000\text{ lb/po}^2 = 1\text{ g}$. Après cette première étape, le processus est identique à celui exposé à la section précédente.

Il importe de réaliser qu'aux fins du calcul de la sévérité relative des différents circuits, le *nombre* d'étalonnage ne porte pas à conséquence, même s'il devait conduire à des valeurs de «contraintes» artificielles supérieures à l'amplitude maximale, et à des «pourcentages» de dommage de beaucoup supérieurs à l'unité, ce qui, pour les mesures de déformation, indiquerait une conception insatisfaisante.

Mais aux fins expresses de la comparaison des circuits par l'examen des pourcentages de dommage dû à l'accélération, il est inutile de recourir au raffinement qui consiste à modifier la pente de la courbe S/N de référence, comme dans les calculs de durée de vie - - puisque le nombre calculé de cycles à rupture est tributaire du facteur d'étalonnage choisi.

Le résultat final est un facteur d'«endommagement» relié à la sévérité du circuit, mais qui ne peut servir qu'à comparer la sévérité de différents circuits pour le véhicule essayé.

Il convient d'insister sur le fait que les facteurs d'endommagement dû à l'accélération ne peuvent être utilisés de façon *absolue*, p. ex., pour comparer l'espérance de vie relative de différents véhicules sur le même circuit. Mais la distribution des mesures d'accélération de la pesanteur, utilisée pour calculer les facteurs d'endommagement, peut fournir des renseignements précieux sur la conception du véhicule.

4.1.4 Résultats des essais sur route

Toutes les distributions des mesures d'accélération et de déformation établies à partir des données acquises au cours des essais sur route à New York figurent dans les rapports cités dans la bibliographie.

4.1.4.1 Endommagement dû à l'accélération

Les figures 14a et 14b résument les données d'accélération maximale obtenues sur chaque circuit essayé, ainsi que les facteurs d'endommagement dû à l'accélération correspondants, établis à partir des données saisies à bord des autobus roulant à vide et en charge, au moyen d'accéléromètres montés dans le véhicule et aux essieux.

À noter que dans ce cas, la grandeur relative des facteurs d'endommagement dérivés des données acquises à bord du véhicule et aux essieux est sans importance, car elle reflète simplement l'utilisation du même facteur d'échelle arbitraire dans le traitement des données -- voir 4.1.4.2.

La sévérité relative de chaque circuit étudié selon les facteurs d'endommagement dû à l'accélération est montrée aux figures 15a et 15b pour l'autobus roulant à vide et en charge, respectivement. Dans ces figures, la sévérité relative est exprimée en tant que «facteur d'accélération» entre les deux circuits. De plus, les facteurs d'accélération moyens sont calculés séparément pour les données d'accélération (g) relatives aux essieux (masse non suspendue) et au véhicule (masse suspendue).

Le facteur d'accélération moyen, indiquant la sévérité relative d'un mille du circuit B35 par rapport à un mille du tronçon en pavés du même circuit, est de 18,29 et de 29,40, eu égard aux données d'accélération verticale saisies aux *essieux* de l'autobus, à vide et en charge.

Les facteurs d'accélération correspondants, fondés sur les données d'accélération verticale saisies *dans l'autobus*, dans ses versions à vide et en charge, sont de 18,96 et 15,86, respectivement.

En somme, les facteurs d'endommagement fondés sur les données d'accélération saisies à bord du véhicule indiquent que le tronçon en pavés du circuit B35 (lorsque l'autobus roule à 30 mi/h) est environ 17 fois plus dommageable, mille pour mille, que l'ensemble du circuit B35.

Voilà pourquoi il est possible, pour des essais accélérés d'endurance d'autobus urbains, de recourir à un fichier de simulation reproduisant une chaussée entièrement constituée

de pavés, au lieu d'un fichier de simulation recréant l'ensemble du circuit B35, car, en se fiant au facteur d'accélération obtenu, quelque 30 000 milles de chaussée en pavés équivalent à 500 000 milles de circuit B35.

Il faut rappeler ici que le facteur d'accélération n'est *pas* une constante et qu'il varie d'un autobus à l'autre, en fonction des caractéristiques dynamiques du véhicule. D'où la nécessité de réévaluer le facteur d'accélération pour chaque nouveau véhicule essayé. La même remarque vaut d'ailleurs pour les essais accélérés sur piste : sans une telle donnée, il est difficile de se prononcer sur la valeur de l'essai. Le fait d'associer à une piste d'essai un facteur d'accélération *fixe*, p. ex., 10:1, applicable à tous les autobus, est une erreur.

4.1.4.2 Durée de vie fondée sur les mesures de déformation

Les figures 16 à 18 donnent la durée de vie établie à partir des mesures de déformation acquises sur le circuit B35, passage à niveau *compris* et *non compris*, et sur le tronçon en pavés franchi à une vitesse de 30 mi/h, pour les catégories de joints disponibles, pour l'autobus a) à vide, b) en charge et c) une configuration *combinée* (50 % à vide/50 % en charge) établie mathématiquement.

Le processus normal de qualification de la conception du véhicule exigerait normalement que chaque joint instrumenté dont la durée de vie tombe en-deçà de 500 000 milles (en tenant pour acquis, par prudence, qu'il s'agit d'un joint de catégorie G), soit l'objet d'un essai de joint et/ou qu'il soit corrigé *avant* l'essai sur le simulateur de route (voir la figure 2).

Les emplacements les plus sollicités, d'après le critère ci-dessus, c.-à-d. les joints *en principe* les plus fragiles, tenant pour acquis une affectation au circuit B35, avec et sans l'effet du passage à niveau, sont ombragés dans les figures 16c et 17c.

Les chercheurs n'ont pas repris l'exercice pour le tronçon en pavés du circuit B35 (figure 18c), car une donnée préalable essentielle manquait, soit le facteur d'accélération fondé sur les mesures de déformation du tronçon en pavés par rapport à l'ensemble du circuit B35. Mais moyennant un facteur d'accélération approximatif de 20:1, dérivé des facteurs d'endommagement dû à l'accélération, on pourrait s'attendre à un seuil de 25 000 milles.

Les figures 19a et 19b donnent les facteurs d'accélération découlant des mesures de déformation, déterminés d'après les durées de vie des joints de catégorie G des figures 16 à 18, pour les versions respectives de l'autobus à vide et en charge.

Dans ces tableaux, les facteurs d'accélération sont établis pour les joints qui subissent de fortes contraintes et dont l'espérance de vie est inférieure à 500 000 milles (s'il s'agit de joints de catégorie G), ainsi que pour tous les joints instrumentés.

À noter que, dans le présent cas, l'utilisation de la durée de vie des joints de catégorie G est totalement arbitraire : rien ne garantit que les joints appartiennent de fait à la catégorie G. On peut constater, en examinant la matrice des durées de vie selon la catégorie de joint se rapportant au circuit B35, qui est d'un niveau de sévérité moyen (voir la figure 17c), qu'il faut, pour aboutir à une espérance de vie de 500 000 milles en service, qu'un certain nombre de joints soient d'une catégorie supérieure à la catégorie G.

De fait, nombre des joints de la structure d'un autobus appartiennent à une catégorie supérieure à la catégorie G; mais la seule façon de s'assurer de la présence d'une catégorie «supérieure» de joints est de mener des essais de fatigue des joints.

Selon l'expérience d'ORTECH, les joints jusqu'à la catégorie E sont relativement courants en pratique, et lorsque des joints de catégorie supérieure s'imposent, les corrections sont aussitôt apportées.

Le TABLEAU I ci-après, confectionné à partir des données de la figure 17c, indique les exigences en matière de catégorie de joints soudés pour les onze (11) emplacements théoriquement les plus fragiles, compte tenu des contraintes dont ils sont le siège :

Extensomètre	Catégorie de joint
SG#1	F2
SG#3	F2
SG#4	F2
SG#7	E
SG#8	F
SG#9	>D
SG#10	F
SG#15	F
SG#16	F2
SG#21	E
SG#24	F2

TABLEAU I Catégories de joints nécessaires pour une durée de vie nominale de 500 000 milles dans les conditions d'exploitation de New York (données tirées de la figure 17c)

Six (6) emplacements au total nécessitent un joint d'une catégorie supérieure à la catégorie G (cases ombragées dans le tableau) pour que le véhicule puisse être qualifié dans les conditions d'exploitation de New York. Selon le processus normal de qualification, des joints adéquats seraient réalisés avant l'essai sur le simulateur de route.

Toutefois, dans le cadre des travaux présentés ici, axés sur la mise au point de la méthodologie d'essai (plutôt que sur l'essai comme tel), ORTECH et Orion Bus

Industries ont convenu qu'*aucune* mesure corrective ne serait prise avant l'essai de l'ORION VI, afin de pouvoir évaluer la crédibilité de l'ensemble de la méthode de qualification de conception exposée à la figure 2.

Certaines étapes clés du processus de conception demeurent normalement impossibles à évaluer avant que survienne une défaillance structurale en service payant. Ce sont :

- la capacité de la modélisation par éléments finis de repérer les endroits potentiellement fragiles, vu les niveaux élevés de contraintes;
- le degré de précision des durées de vie fondées sur les mesures de déformation acquises lors des essais sur route dans l'environnement de service prévu;
- la capacité du simulateur de route de reproduire fidèlement les conditions réelles d'exploitation.

Selon les figures 19a et 19b, les facteurs d'accélération fondés sur les *extensomètres*, qui sont indicateurs de la sévérité relative du tronçon en pavés du circuit B35 par rapport au circuit B35 dans son ensemble, s'établissent à 17,89 et 13,97 respectivement, pour l'autobus à vide et en charge. Ces données se comparent très favorablement avec les facteurs d'accélération fondés sur les données d'*accélération* verticale acquises à bord de l'autobus, soit de 18,96 et 15,86, respectivement, pour l'autobus à vide et en charge (figures 15a, 15b).

4.2 Établissement des fichiers de sollicitations

Objectif : Mettre en forme et résumer les données issues des essais sur route pour chaque configuration de charge, en s'efforçant de réduire au minimum la durée de l'essai d'endurance, tout en retenant le plus possible de facteurs d'endommagement.

4.2.1 Règles concernant les essais accélérés

Les essais accélérés, qu'ils soient menés sur piste ou en laboratoire, obéissent aux *mêmes* règles de validité. Voici un aperçu de ces règles :

Règle A : L'essai accéléré doit exposer le véhicule à une accélération uniforme des sollicitations de faible et de forte amplitude caractéristiques des conditions de conduite sur route; c'est dire qu'idéalement, le facteur d'accélération devrait être constant pour toute la gamme des sollicitations considérées.

Règle B : L'essai accéléré ne devrait soumettre le véhicule à aucune sollicitation d'une amplitude supérieure à celle des sollicitations existant dans les conditions opérationnelles.

Règle C : La fréquence des réponses devrait être la même lors d'un essai accéléré et d'un essai en conditions de service normal.

Les règles ci-dessus ont pour but de garantir qu'en cas de défaillance structurale au cours d'un essai accéléré, celle-ci est représentative du *mode de défaillance* susceptible de se produire en service réel, et non une conséquence artificielle des conditions d'essai accéléré -- que celui-ci soit mené sur piste ou sur un simulateur de route.

Le rapport *Endurance Testing of Heavy Duty Vehicles* [4] contient un exposé complet, assorti d'une bibliographie, de la conception et de l'utilisation de pistes d'essai et de simulateurs de route pour la réalisation d'essais accélérés.

4.2.2 Composition du fichier de simulation

Comme un examen antérieur des circuits d'exploitation de New York (figure 5) a permis d'établir que le circuit B35 est représentatif d'un circuit de sévérité moyenne, on peut se demander pourquoi ne pas utiliser *directement* le circuit B35 pour les essais accélérés -- ce qui serait, bien entendu, la solution idéale.

Les figures 20 et 21, qui donnent les séries respectives de toutes les mesures d'accélération à un essieu et de toutes les mesures de déformation d'un joint, acquises simultanément, pour le circuit B35 et pour le tronçon en pavés du même circuit, parcourus à une vitesse de 30 mi/h, éclaireront les propos ci-après.

La figure 20 établit que le circuit B35, d'une longueur de 6,3 milles, est parcouru en 2 434 secondes, au total, compte tenu des ralentissements dus aux arrêts pour faire monter et descendre des passagers, aux feux de circulation et à l'intensité du trafic -- ce qui représente une vitesse moyenne de quelque 10 mi/h. Si cette donnée était directement entrée dans le simulateur, sans modulation aucune, un essai d'endurance de 500 000 milles dans les rues de New York prendrait environ 2 000 jours, ou 5,5 ans -- même en gardant le simulateur en marche 24 heures sur 24, 7 jours sur 7.

À l'examen de la figure 20, on constate que l'élimination des périodes d'immobilisation *totale* correspondant aux arrêts pour faire monter ou descendre des passagers, à l'attente aux feux rouges, etc., pourrait réduire de moitié, environ, la durée de l'essai, portant celle-ci à 2,75 ans, durée qu'il n'est pas plus réaliste d'envisager.

Toute compression supplémentaire des réponses portées sur les diagrammes d'évolution dans le but d'accélérer le programme d'essai, p. ex., l'élimination des sollicitations de faible amplitude, tenues pour relativement peu dommageables, serait inopportune, étant donné qu'il a été démontré que jusqu'à 80 % de l'endommagement peut être attribué à des sollicitations d'une amplitude inférieure à 50 % de l'amplitude maximale, et qu'une proportion aussi élevée que 40 % est dû à des sollicitations d'une amplitude inférieure à 25 % de l'amplitude maximale.

Ainsi, pour pouvoir mener un EVDV de 500 000 milles à l'intérieur de limites temporelles raisonnables, p. ex., trois (3) mois, il faut *remplacer* les excitations essentiellement aléatoires associées au circuit B35 par une forme plus concentrée d'excitations, qui entraîneront un endommagement équivalent -- sous réserve des règles précédemment énoncées concernant l'amplitude et la distribution des sollicitations, la fréquence des réponses, etc. lors d'essais accélérés.

La faisabilité de cette démarche est illustrée par la figure 21 : il faut environ 30 secondes, au total, pour franchir 0,22 mille du tronçon en pavés du circuit B35, à 30 mi/h. À noter qu'on utilise une vitesse de 30 mi/h, car il a été démontré que l'endommagement augmente habituellement en fonction de la vitesse. C'est pourquoi, pour l'essai accéléré, l'autobus roule à la vitesse maximale permise sur le tronçon en pavés. Le fait que cette vitesse est de beaucoup supérieure à la vitesse moyenne d'environ 10 mi/h en service normal ne pose pas de problème -- là encore, pour autant que soient respectées les règles concernant les essais accélérés.

Si on ne tient pas compte des dommages causés par la portion en pavés du circuit B35, par rapport à l'ensemble du circuit, l'utilisation d'un fichier de simulation composé *exclusivement* des réponses du véhicule roulant sur pavés permettrait de mener un EVDV de 500 000 milles en quelque 789 jours ou 2,16 ans, ce qui n'est pas encore une durée

satisfaisante. Mais, comme il a déjà été établi, d'après les résultats des essais sur route, (figures 19a et 19b), les pavés du circuit B35 sont environ 14 à 18 fois plus dommageables, mille pour mille, que le reste du circuit B35, selon la configuration de l'autobus, ce qui donne un facteur d'accélération moyen de 16.

Par conséquent, un essai équivalant à 500 000 milles de conduite sur le circuit B35 peut être remplacé par un essai équivalant à 31 250 milles dans une installation simulant les pavés du circuit B35, ce qui signifie une durée de seulement 60 jours ou 8 semaines, en l'absence d'aucun temps d'indisponibilité significatif, ce qui est conforme à l'expérience d'ORTECH.

Une fenêtre d'essai de dix (10) semaines est habituellement prévue pour la conduite d'un essai de qualification de 500 000 milles dans les rues de New York, ce qui tient compte du temps nécessaire à l'entretien normal et aux inspections. Il convient de noter qu'un essai de 500 000 milles reproduisant les conditions de *Toronto* ne prendrait que quatre (4) semaines, si on utilisait un fichier de simulation représentant les conditions d'exploitation de sévérité moyenne de New York, car New York représente un environnement deux fois plus sévère que Toronto.

Il faut enfin noter que le facteur d'accélération qui régit la durée de l'essai varie d'un autobus à l'autre, en fonction des caractéristiques de la suspension et de l'ensemble des caractéristiques dynamiques du véhicule.

4.2.3 Examen des données

L'utilisation d'un fichier de conduite simulant une chaussée en pavés pour des essais accélérés en simulateur suppose un examen préalable des données d'essai sur route et la vérification de leur conformité aux règles concernant les essais accélérés déjà énoncées.

Les figures citées ci-après rendent compte d'un tel exercice appliqué aux données d'essai sur route de l'autobus roulant à vide.

- Les figures 22a à 22d montrent respectivement, pour le circuit B35 et le tronçon en pavés de ce circuit, la distribution des sollicitations mesurées par les accéléromètres des essieux avant et arrière, côté trottoir, et par les extensomètres n° 9 et n° 24. À noter que pour faciliter la comparaison des données et pour tenir compte des longueurs différentes des circuits, le nombre de sollicitations dans chaque cas a été extrapolé pour une durée de vie de 500 000 milles.

La conformité à la *règle A* est indiquée par la distribution à peu près uniforme des sollicitations, dans l'ensemble, exception faite des sollicitations d'amplitude très faible, p. ex. moins de 10 % de l'amplitude maximale, qui contribuent peu au dommage par fatigue, en raison de l'effet filtrant de la pente modifiée des courbes S/N conformes à la norme BS 5400 (voir 4.1.3.1). Dans chaque cas, la distance entre les courbes donne une idée du facteur d'accélération entre les réponses du véhicule sur le circuit B35 et celles sur le tronçon en pavés. Ce facteur s'établit ici à environ 20:1, pour l'autobus roulant à vide.

- Confectionnées à partir des mêmes données que celles utilisées pour les figures 22a à 22d, les figures 23a à 23d présentent des graphiques de «franchissements de seuil», qui font voir les données d'un point de vue légèrement différent. Ces graphiques servent surtout ici à mettre en relief les valeurs extrêmes, à la fois négatives et positives, des sollicitations associées au circuit B35 et au tronçon en pavés de ce circuit. Là encore, les deux ensembles de données ont été normalisés pour montrer le nombre de «franchissements de seuil» au mille.

La conformité à la *règle B* est établie si les valeurs maximales et minimales des sollicitations associées au tronçon en pavés du circuit B35 sont à peu près les mêmes que celles correspondant au circuit B35 dans son ensemble. Encore une fois, la distance entre les courbes normalisées est une indication du facteur d'accélération, même si, dans ce cas, la comparaison vaut seulement *ailleurs qu'au centre*, en raison des limitations du logiciel et de la capacité de stocker des contraintes alternées d'amplitude extrêmement faible pendant un long cycle d'exploitation. Un facteur d'accélération d'environ 20:1 est encore une fois observé.

On note une distribution quasi gaussienne de la majorité des sollicitations pour chaque paire de courbes, même si, dans deux cas, c.-à-d. aux figures 23c et 23d, les données concernant le tronçon en pavés du circuit B35 englobent également un certain nombre de sollicitations de forte amplitude qui ne sont pas représentatives du circuit B35 parcouru à des vitesses normales. De telles sollicitations ont par la suite été retirées des données acquises pour le tronçon en pavés du circuit B35, lors de la préparation du fichier de simulation.

- Les figures 24a à 24d montrent respectivement, pour le circuit B35 et le tronçon en pavés du circuit, le spectre de fréquences des données enregistrées par les accéléromètres aux essieux avant et arrière, côté trottoir, et par les extensomètres n° 9 et n° 24.

La conformité à la *règle C* est indiquée par la forte correspondance entre les spectres de données d'accélération et de déformation. À noter que dans le présent cas, la distance verticale entre les spectres de réponses n'indique *pas* directement le facteur d'accélération, en raison de certains facteurs, comme la longueur du circuit, les arrêts le long du circuit B35, etc.

Les mêmes méthodes d'analyse ont été appliquées aux données relatives à l'autobus en charge, avant les itérations des fichiers de sollicitations.

4.3 Itération des fichiers de sollicitations

Objectif: Procéder à des itérations des fichiers de sollicitations pour chaque configuration de charge, jusqu'à ce que les réponses du véhicule en simulateur coïncident avec les données acquises lors des essais sur route.

4.3.1 Préparation du véhicule

Avant d'entreprendre les itérations de fichiers de sollicitations, il est important de s'assurer que le montage et la configuration du véhicule correspondent *exactement* aux conditions dans lesquelles les données initiales ont été acquises sur route, c.-à-d., les mêmes conditions de charge (masse et distribution), pneus (type et pression), amortisseurs (type et état), hauteur de suspension, charge du réservoir, etc.

Si on ne porte pas toute l'attention voulue à ces facteurs, il peut s'avérer difficile, voire impossible, de recréer, sur le simulateur de route, les réponses données par le véhicule dans les conditions réelles d'exploitation.

Il convient de souligner ici que le fichier de sollicitations permet de recréer la *réponse* du véhicule mesurée sur route, en contrôlant la réponse d'accélération/déplacement aux roues de l'autobus. Il ne reproduit pas directement le *profil* de la route aux plateaux-supports des pneus -- auquel cas il serait relativement peu important de porter attention aux paramètres d'essai exposés ci-dessus.

Avec l'ORION VI installé sur le simulateur de route pour poids lourds (figure 25), la préparation du véhicule pour les itérations du fichier de sollicitations en configurations à

vide et en charge et pour l'essai d'endurance subséquent comprenait également ce qui suit :

- (a) *Instrumentation du véhicule* -- Un sous-ensemble de l'instrumentation installée pour l'essai sur route a été relié, via des appareils de traitement des signaux, à l'ordinateur associé au simulateur de route. Cette instrumentation comprenait quatre (4) accéléromètres montés aux essieux, suivant l'axe vertical, ainsi que les onze (11) extensomètres installés aux points de la structure correspondant aux contraintes les plus fortes.
- (b) *Refroidissement des amortisseurs* -- Pour s'assurer une durée de vie raisonnable des amortisseurs soumis à une excitation aléatoire constante et prolongée, il est essentiel de prévoir des moyens de refroidissement de ces amortisseurs. Cela a consisté à enrouler autour de chaque amortisseur un tuyau de cuivre de $\frac{1}{4}$ po de diamètre intérieur et d'y faire couler de l'eau (municipale), à une température de l'ordre de 7 à 10 °C, à un débit suffisant pour maintenir la température de l'amortisseur entre 75 et 90 °C.
- (c) *Alimentation en air* -- Comme le moteur de l'autobus n'est jamais mis en marche pendant l'essai d'endurance, un compresseur est utilisé pour maintenir une pression de 125 à 130 lb/po² dans le circuit pneumatique du véhicule et, partant, dans les coussins pneumatiques de suspension et les systèmes auxiliaires, p. ex., fermeture de sécurité des portes, etc.
- (d) *Alimentation électrique* -- Pour la même raison qu'en c) ci-dessus, la batterie d'accumulateurs est reliée à un chargeur externe qui garantit l'alimentation des systèmes auxiliaires de l'autobus.

- (e) *Allongement du tuyau d'échappement* -- Pour permettre une vérification hebdomadaire des fonctionnalités du véhicule pendant la simulation, le tuyau d'échappement est muni d'un prolongement qui évacue les gaz d'échappement vers l'atmosphère.

4.3.2 Système de retenue du véhicule

Un système *minimal* de retenue est utilisé pour amarrer le véhicule au simulateur de route, afin de recréer le mieux possible les conditions limites d'exploitation sur route.

Il faut toutefois prévoir des moyens de retenue efficaces dans les axes longitudinal et latéral, afin que les roues soient maintenues sur leurs plateaux-supports respectifs -- sans que le véhicule soit si solidement amarré qu'il ne puisse pas reproduire les réponses de l'autobus en service normal.

La retenue longitudinale est réalisée au moyen d'un «berceau» monté sur chacune des platines coiffant les actionneurs avant. Essentiellement, le berceau permet de caler une barre ronde en avant et en arrière des roues avant, afin de limiter les mouvements longitudinaux. Un jeu entre les barres de retenue et la surface du pneu permet au pneu de se déformer sous l'effet de l'excitation verticale du véhicule.

La retenue latérale est assurée par des «butées» réglables, posées contre le flanc de chaque pneu, sur chaque platine d'actionneur (figure 25). Là encore, un jeu permet aux pneus de fléchir.

Les surfaces de contact entre le pneu, la platine, les butées et les berceaux, sont bien graissées afin de minimiser le frottement.

Outre ces moyens de retenue en principe minimaux, il s'est avéré nécessaire d'appliquer les freins arrière (de stationnement) pour prévenir une tendance non représentative et potentiellement dangereuse du véhicule d'entrer peu à peu dans un balancement avant-arrière (tangage) accentué, au cours de l'essai d'endurance -- jusqu'à causer la défaillance précoce des joints étanches à l'huile des actionneurs hydrauliques. L'application, en principe non souhaitable, des freins de stationnement, pendant la durée de l'EVDV, n'a été incorporée aux paramètres de montage standard qu'après qu'il eut été vérifié que les estimations de durée de vie fondées sur les données de déformation n'étaient pas influencées, à toutes fins utiles, par l'application des freins.

4.3.3 Élaboration des fichiers de sollicitations

Une fois obtenues les séries voulues de mesures d'accélération et/ou de déplacement, il suffit de suivre une méthode bien établie pour arriver à un fichier de simulation qui, lorsque transmis par un ordinateur à une servocommande, entraîne la réponse d'accélération/déplacement souhaitée aux roues.

Premièrement, un signal aléatoire généré dans l'ordinateur de commande anime les actionneurs sur lesquels est posé l'autobus instrumenté et les signaux d'accélération/déplacement des roues sont enregistrés. Les réponses des roues et les signaux de commande aléatoires sont ensuite traités pour produire une matrice de réponse-fréquence (FRF) se rapportant à la réaction des roues aux signaux de commande des actionneurs.

L'établissement des FRF part de l'hypothèse d'un rapport linéaire entre l'excitation et la réponse. L'ensemble de FRF est ensuite traité pour servir aux calculs de transformation visant à déterminer le signal de commande aboutissant à la réponse souhaitée aux roues.

Si le comportement dynamique de l'autobus était linéaire, comme on le suppose, une (1) application de la transformation réponse-signal suffirait à générer le fichier de simulation voulu. Mais en réalité, des cas parfois importants de non-linéarité dans le système obligent à plusieurs itérations du processus, qui consistent à appliquer le signal de commande estimatif et à mesurer la réponse de la roue.

On mesure l'écart entre la réponse obtenue et la réponse souhaitée et on corrige le signal en fonction de l'erreur de réponse. Les signaux de commande sont corrigés l'un après l'autre et le processus itératif se poursuit avec un nouveau fichier de simulation, jusqu'à l'obtention du degré voulu de corrélation entre la réponse souhaitée et la réponse obtenue. Il est habituellement possible d'arriver à une moyenne quadratique des écarts en-deçà de 10 % de la réponse souhaitée après vingt à vingt-cinq itérations.

La dernière étape de validation du fichier de simulation consiste à acquérir les données de déformation aux emplacements étudiés lors de l'essai sur route et de calculer les durées de vie de façon que les données d'endommagement soient cohérentes avec les mesures obtenues sur route.

4.3.4 Validation des fichiers de sollicitations

On conclut généralement à l'acceptabilité du fichier de sollicitations lorsque les réponses d'accélération obtenues sur le circuit de référence et les réponses simulées des fusées d'essieux se chevauchent raisonnablement. Par exemple, pour l'autobus à vide, les figures 26a à 26d montrent le chevauchement des réponses des fusées d'essieux avant et arrière, côté trottoir, respectivement, pour le fichier de conduite sur chaussée en pavés. Les figures 27a à 27d montrent les données correspondantes relatives à l'autobus en pleine charge.

Dans chaque cas, on constate un chevauchement acceptable de la réponse souhaitée et de la réponse simulée pendant les 30 secondes que dure le fichier. Une vue en gros plan dans le voisinage d'une crête confirme l'impression générale.

Le calage des fichiers de simulation respectifs pour les configurations à vide et en charge de l'autobus a été effectué selon une méthode semblable à celle utilisée pour la comparaison des données obtenues exclusivement sur route (figures 19a, 19b). La seule différence est que le facteur d'accélération, ici, est fondé sur la réponse *simulée* sur chaussée en pavés. On se trouve ainsi à compenser toute imprécision dans l'établissement du fichier de sollicitations -- on aurait en effet pu se contenter d'utiliser le facteur d'accélération indiqué par la comparaison des données de conduite sur route.

Les figures 26e et 27e donnent les durées de vie fondées sur les mesures de déformation relevées aux extensomètres choisis, sur le circuit de référence B35, sur le tronçon en pavés du circuit B35 à 30 mi/h, et sur le tronçon en pavés *simulé* du circuit B35.

Dans le cas de l'autobus *à vide*, un facteur d'accélération moyen de 14,95 a été établi -- ce qui est passablement conforme à l'indication préliminaire de la figure 19a.

De façon semblable, la figure 27e donne 18,16:1 pour le facteur d'accélération associé à la simulation de l'autobus *en charge*. Mais ce facteur ne peut pas être comparé directement avec les données d'essai de l'autobus en charge regroupées à la figure 19b, car le fichier de simulation a été élaboré à partir d'un essai différent, réalisé après que des modifications eurent été apportées aux pressions des coussins pneumatiques de la suspension avant et que la hauteur de la suspension eut été réglée pour empêcher le plancher de heurter les bosses de ralentissement, comme cela s'était produit lors de l'essai antérieur de l'autobus dans la version «poids nominal brut».

Un facteur d'accélération d'environ 15:1 est normalement souhaitable, afin d'obtenir une durée d'essai acceptable. Faute d'atteindre d'emblée cet objectif, il est possible de modifier artificiellement le fichier de simulation sur pavés par une astuce simple qui consiste à amplifier les signaux d'accélération produits par les actionneurs afin d'exagérer la réponse du véhicule -- sous réserve que les règles relatives aux essais accélérés soient respectées. Mais dans le cas qui nous occupe ici, il n'a été nécessaire de recourir à aucune astuce, car les données d'essai sur route avaient abouti au facteur d'accélération souhaité.

Un facteur d'accélération *supérieur* à 15:1 ne pose pas de problème, à moins que les caractéristiques des données contredisent les règles sur les essais accélérés. Un facteur d'accélération tout à fait valide de 40:1 a été obtenu pour un autobus récemment mis à l'essai par ORTECH.

Comme un facteur d'accélération acceptable a été obtenu pour les deux fichiers de simulation de l'autobus à vide et en charge, sans qu'il ait été nécessaire d'intervenir artificiellement ni d'appliquer une sollicitation particulière, la comparaison des durées de vie sur le tronçon en pavés du circuit B35 *réel* et le même tronçon *simulé* révèle le degré de précision du fichier de simulation.

Dans chaque cas, pour des raisons d'efficacité on a réuni en un bloc dix (10) passages du fichier de simulation court représentant le tronçon en pavés. Chaque bloc représentait alors 32,89 milles calibration (autobus à vide) et 39,95 milles (autobus en charge), comme on peut le voir aux figures 26e et 27e, qui supposaient l'exécution de 7 601 et 6 258 blocs, respectivement, pour atteindre, pour chaque configuration, l'équivalent de 250 000 milles dans les conditions d'exploitation de New York.

4.4 Essai d'endurance

Objectif : Mener un essai d'endurance couvrant la durée de vie nominale du véhicule, au moyen de fichiers de simulation représentant chaque configuration mise à l'essai, dans des proportions de passages correspondant à l'utilisation prévue du véhicule.

4.4.1 Protocole d'essai

L'EVDV de 500 000 milles de l'ORION VI dans les conditions d'exploitation caractéristiques de New York a été exécuté conformément au protocole d'essai *standard* d'ORTECH -- 250 000 milles à vide (c.-à-d. en état de marche), suivis de 250 000 milles en charge (poids nominal brut), avec des itérations de fichiers réalisées immédiatement avant chaque essai.

Voici quelques-unes des considérations associées à la définition du protocole d'essai, lequel est constamment amélioré :

- (a) Comme un EVDV de 500 000 milles à New York équivaut à peu près à 1 000 000 de milles dans les conditions d'exploitation moyennes d'Amérique du Nord, dans l'éventualité où un essai n'aurait pas pour objectif immédiat de qualifier un véhicule pour l'environnement new-yorkais, celui-ci peut, si on le désire, être mené en quatre (4) étapes égales de 125 000 milles alternant entre les configurations à vide et en charge.

Ainsi, lorsque les délais sont serrés, il est possible de réduire de moitié, environ, la durée d'un essai équivalant à 250 000 milles (dans les conditions caractéristiques de New York), donc à 500 000 milles (dans les conditions moyennes de l'Amérique du Nord), et de poursuivre ensuite l'essai de qualification pour New York. L'inconvénient de cette option est qu'il faut mettre le véhicule en charge et le

décharger deux fois, ce qui veut dire enlever le véhicule du simulateur et le conduire à une bascule de pesage publique pour vérifier la répartition des charges.

Il convient de noter que même s'il n'est pas nécessaire de qualifier un véhicule pour une exploitation à New York, il est toutefois avantageux de recueillir des données de simulation représentant cet environnement, car, comme celui-ci est deux fois plus rigoureux que l'environnement d'exploitation moyen, un EVDV de 500 000 milles dans l'environnement plus clément peut être exécuté dans la moitié du temps, c.-à-d. en quatre à cinq semaines.

Dans le cas de l'ORION VI, en tenant compte du facteur de sévérité 2:1, les facteurs d'accélération associés à des fichiers de simulation *identiques* seraient rajustés à 29,90:1 et 36,32:1 pour les configurations à vide et en charge, respectivement -- comparativement aux facteurs de 14,95:1 et 18,16:1 applicables aux conditions d'exploitation caractéristiques de New York.

- (b) Une autre considération associée au protocole d'essai est la nécessité *absolue* de maintenir les organes de suspension en bon état pendant toute la durée de l'essai -- surtout les amortisseurs et les coussins pneumatiques.

Cette exigence découle du fait que les données de l'essai initial sur route utilisées pour établir le fichier de simulation sont le reflet direct de l'état de la suspension. Par conséquent, si on laissait les organes de suspension se détériorer pendant toute la durée de l'essai, ce qui correspondrait essentiellement à une méthode d'essai en *boucle ouverte*, on compromettrait les chances que soit recréée la réponse souhaitée (de référence).

Donc, le remplacement des organes de suspension dès que nécessaire pendant toute la durée de l'essai doit être motivé principalement par le facteur exposé ci-dessus -- plutôt que d'être en stricte conformité avec le calendrier de remplacement des pièces qui régit la maintenance des véhicules en service normal. Aussi, compte tenu du fait que le véhicule essayé est exposé à environ 10 000 milles *par jour* sur le simulateur de route, le fait de s'en tenir au calendrier de maintenance conduirait à des temps d'indisponibilité inacceptables.

Il convient enfin de noter que la détérioration des amortisseurs et des coussins pneumatiques ne reflète pas nécessairement la détérioration à laquelle on peut s'attendre ensuite en service réel, en raison, principalement, de l'absence des effets climatiques.

Dans le cas des bagues de raccordement des jambes de force, en raison à la fois de l'absence des facteurs environnementaux et des forces de freinage, l'usure n'est aucunement représentative de l'usure prévue en service réel.

- (c) L'essai d'endurance est normalement réalisé au moyen d'une configuration *achevée* du véhicule, c.-à-d. munie des panneaux intérieurs et extérieurs, puisque ces éléments contribuent à la rigidité du véhicule. Cette exigence comporte un inconvénient : des défaillances primaires peuvent se produire derrière les panneaux et échapper à la détection -- ou les défaillances primaires observables peuvent occasionner des défaillances secondaires cachées, si aucun correctif n'est apporté.

Il s'ensuit qu'il est fortement recommandé, au terme de l'essai, de démonter le véhicule afin de procéder à une inspection plus approfondie.

- (d) Finalement, l'essai se poursuit sept jours par semaine, vingt-quatre heures par jour, du début à la fin, sous réserve des arrêts nécessaires pour procéder aux travaux de maintenance, de réparation et d'inspection.

4.4.2 Méthodes d'inspection

Pendant toute la durée de l'EVDV de 500 000 milles, l'équipe d'essai demeure constamment à l'affût de signes de fatigue structurale et de tout autre symptôme, p. ex., grincements, bruits insolites, etc. pouvant indiquer la présence de problèmes imminents reliés à la structure ou à des organes auxiliaires, p. ex., dégradation des bagues de raccordement, montages flexibles, frottements, interférences, etc.

De plus, les signaux de déformation donnés par le groupe choisi d'extensomètres sont périodiquement enregistrés et traités, de façon à déceler toute discontinuité entre les réponses successives. De telles discontinuités, surtout lorsqu'une certaine tendance s'est établie, indiquent habituellement un déplacement de voie de contrainte dû à l'usure et/ou la détérioration de la structure.

Des inspections visuelles, quotidiennes et hebdomadaires, sont prévues pendant toute la durée de l'essai et les comptes rendus détaillés d'inspection sont réunis en un dossier, auquel sont également versées des photographies, le cas échéant.

Une brève inspection est effectuée au début de chaque quart de travail. Elle vise à garantir la sûreté de l'essai en cours, par une inspection rigoureuse de tous les organes de suspension.

Une fois par semaine est effectuée une vérification fonctionnelle des systèmes mécanique et électrique, accompagnée d'une inspection visuelle de la structure. Cette inspection consiste normalement en un examen visuel attentif, appuyé par des feux de forte

intensité, une loupe à facteur de grossissement de 5, etc. Un liquide d'imprégnation est utilisé, au besoin, pour faciliter la détection de ruptures par fatigue.

Pour des documents types a) de la liste de contrôle de l'inspection de sécurité du véhicule, b) de l'avis de pièces à remplacer, c) du compte rendu de changement de quart et d) de la liste de contrôle de l'inspection de l'intégrité structurale du véhicule, on se reportera au figures 28a à 28d, respectivement.

4.4.3 Chronologie de l'essai

Une chronologie de l'essai est tenue à partir des rapports d'inspection établis et sert à résumer les événements survenus pendant la durée de l'essai -- il convient par contre de signaler que la «distance parcourue» lorsque survient un événement ne peut être directement rapportée aux conditions réelles d'exploitation, puisqu'elle est tributaire du protocole d'essai, p. ex., 250 000 milles à vide suivis de 250 000 milles en charge. Toutefois, on peut raisonnablement conclure que les événements observés se produiraient à un moment donné pendant la vie en service du véhicule.

L'essai, y compris la période préparatoire de génération et de validation des fichiers de simulation, a débuté le 7 janvier 1996, avec l'autobus à vide, pour se terminer le 23 mars 1996 -- compte tenu du temps d'indisponibilité pour réparations.

Au cours de l'essai sur simulateur, des défaillances structurales sont survenues à dix (10) des onze (11) emplacements de fortes contraintes d'abord repérés par la méthode d'analyse par éléments finis, puis confirmés en tant qu'emplacements *potentiellement fragiles*, d'après les durées de vie fondées sur les mesures de déformation, dans les conditions réelles de service.

Encore plus important, aucune défaillance ne s'est produite aux autres points de la structure qui avaient été soumis à l'analyse par la méthode des éléments finis de l'ORION VI.

Plusieurs autres défaillances se sont de fait produites à des emplacements *non couverts* par le modèle aux éléments finis, lequel s'intéressait surtout à la partie supérieure de la structure -- ce qui indique la nécessité d'étendre éventuellement la portée normale du modèle, pour autant que cela soit fait selon les règles de l'art, de façon à englober des modèles locaux détaillés des points d'attache de la partie supérieure de l'autobus à la suspension, de même que des organes des essieux et de la suspension provenant d'autres fournisseurs que le constructeur OEM.

De nombreux événements, toutefois, p. ex., la rupture d'attaches, de bâtis moteurs, l'interférence de câbles, de tuyaux, etc. dans des conditions de charge dynamique dépassent la portée d'un modèle analytique quel qu'il soit. C'est cette catégorie de défaillances qui met particulièrement en relief les avantages à tirer d'un essai au moyen d'un simulateur de route.

5.0 CONCLUSIONS

L'autobus ORION VI (mû au gaz naturel) a été soumis à un essai de validation de durée de vie équivalant à 250 000 milles de conduite dans les rues de New York au moyen du simulateur de route pour véhicules de construction renforcée d'ORTECH.

L'autobus a par la suite été qualifié pour une durée de vie en service de 500 000 milles dans les conditions d'exploitation caractéristiques de New York, à la faveur d'essais de simulation supplémentaires au moyen d'une version en charge de l'autobus, ainsi que d'essais complémentaires sur route et d'essais de joints axés sur la qualification d'un seul joint, pour lequel une solution satisfaisante n'avait pas été trouvée au cours de l'essai en simulateur.

Finalement, on peut dire que le simulateur de route pour véhicules lourds d'ORTECH fonctionne presque sans arrêt depuis son installation à la fin de 1995. Quatre (4) essais de qualification pour l'environnement new-yorkais peuvent être menés dans une année.

Selon l'expérience d'ORTECH à ce jour, on peut prévoir que les essais poussés rendus possibles par le simulateur contribueront à la mise en service d'autobus dotés de structures plus durables.

RÉFÉRENCES

- [1]* *CMM-833: The Term of Useful Service for RTS Buses* (3 volumes)
ORTECH, rapport n° E33-93-41, 15 novembre 1993
- [2] *British Standard 5400: Steel, Concrete and Composite Bridges*,
Part 10, Code of Practice for Fatigue, 1980
- [3] *Fatigue of Welded Structures* -- 2nd edition by T.R. Gurney,
Cambridge University Press, ISBN 0 521 225582
- [4] *Endurance Testing of Heavy Duty Vehicles* -- by Ray W. Murphy, Freightliner Corp.,
SAE Paper 820001, The Twenty-Eighth L. Ray Buckendale Lecture, February 1982

* Ce rapport est la propriété *exclusive* de la New York City Transit-MTA.

BIBLIOGRAPHIE**

- [1] *Finite Element Modelling and Analysis of the ORION VI Low Floor Bus*
ORTECH, rapport n° 94-E35B002100, 4 juillet 1994
- [2] *Orion VI Road Operating Test (à Toronto)*
ORTECH, rapport n° 95-E33B004347- rapport final, 30 mars 1995
- [3] *Orion VI (NGV) Low Floor Bus: Experimental Modal Analysis*
ORTECH, rapport n° 95-E33B004878, 24 janvier 1996
- [4] *Orion VI (NGV): Road Operating Test in New York*
ORTECH, rapport n° 95-E33B004878-tâche 0100, 20 février 1996.
- [5] *Orion VI (NGV): Finite Element Modelling Update*
ORTECH, rapport n° 96-E33B004878-tâche 0302, 11 mars 1996
- [6] *Orion VI (NGV) Low Floor Bus: Front Suspension Characteristics*
ORTECH, rapport n° 96-E33B004830, 1^{er} mai 1996
- [7] *Orion VI (NGV) Low Floor Bus: Radius Rod Test at Altoona*
ORTECH, rapport n° 96-E33B005284, 12 février 1997
- [8] *A Response to "Review of Orion VI Structural Evaluation"*
ORTECH, rapport n° 96-E33B004830, 7 mars 1997
- [9] *Design Life Validation Testing of the Orion VI Low Floor Bus (2 Volumes)*
ORTECH, rapport n° 96-E33B004830 - rapport final, 31 mars 1998
- [10] *Design Life Validation Testing of the Orion VI Low Floor Bus
Supplementary Road Operating Test & Structural Design Qualification*
ORTECH, rapport n° 96-E33B004830 - rapport final (addenda), 14 avril 1997

** Ces rapports sont la propriété *exclusive* de Orion Bus Industries.