

TP 13423F

Programme de réduction  
du poids des autobus urbains :  
Phase I

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

Par  
Centre des Matériaux composites de Saint-Jérôme

Mars 1999

TP 13423F



Programme de réduction  
du poids des autobus urbains :  
Phase I

Par  
Centre des Matériaux composites de Saint-Jérôme

Mars 1999

## **AVERTISSEMENT ET AVIS**

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

Le Centre de développement des transports n'a pas l'habitude de citer des noms de produits ou de fabricants. S'il le fait ici, c'est simplement pour la bonne compréhension du texte.

À moins d'indication contraire dictée par le contexte, le masculin s'étend au féminin et vice versa.

## **ÉQUIPE DE RECHERCHE**

Raymond Gauvin, ing., Ph. D., directeur général

Sylvain Labonté, ing., M. Sc. A., gestionnaire de projets

Alain Gauthier, directeur commercial

Pierre Vallé, ing., M. Ing., coordonnateur de l'ingénierie

*An English summary is included before the Table of Contents.*



1. N° de la publication de Transports Canada <b>TP 13423F</b>		2. N° de l'étude <b>9497</b>		3. N° de catalogue du destinataire	
4. Titre et sous-titre <b>Programme de réduction du poids des autobus urbains : Phase 1</b>				5. Date de la publication <b>Mars 1999</b>	
				6. N° de document de l'organisme exécutant	
7. Auteur(s) <b>S. Labonté, Dr R. Gauvin et A. Gauthier</b>				8. N° de dossier - Transports Canada <b>ZCD2450-D-610-11</b>	
9. Nom et adresse de l'organisme exécutant <b>Centre de Matériaux Composites 216, rue de la Gare Saint-Jérôme, Québec J7Z 4Y3</b>				10. N° de dossier - TPSGC <b>XSD-8-00956</b>	
				11. N° de contrat - TPSGC ou Transports Canada <b>T8200-8-8550</b>	
12. Nom et adresse de l'organisme parrain <b>Centre de développement des transports (CDT) 800, boul. René-Lévesque Ouest Bureau 600 Montréal (Québec) H3B 1X9</b>				13. Genre de publication et période visée <b>Finale</b>	
				14. Agent de projet <b>Claude Guérette</b>	
15. Remarques additionnelles (programmes de financement, titres de publications connexes, etc.) <b>Projet coparrainé par le Programme de recherche et développement énergétiques (PRDE)</b>					
16. Résumé <p>Le poids des autobus urbains n'a cessé d'augmenter au cours des dernières années et certains véhicules remplis de passagers peuvent dépasser les normes de chargement par essieu. Plusieurs effets néfastes découlent de cette situation et se font ressentir, entre autres, au niveau de l'environnement et de la dégradation accélérée des chaussées. La réduction du poids des autobus urbains est donc devenue un objectif incontournable. À cet égard, les matériaux composites offrent un bon potentiel de réduction de poids et possèdent d'autres caractéristiques intéressantes pour des applications au niveau des autobus, comme une bonne résistance à la corrosion et une grande liberté au niveau des formes. Ce rapport explore différentes possibilités de réduction de poids des autobus urbains par l'utilisation des composites.</p> <p>Une recherche documentaire et une enquête auprès des fabricants ont permis de faire le point sur l'utilisation des matériaux composites dans les autobus. À la lumière des résultats obtenus, les composantes pouvant bénéficier de l'utilisation des composites ont été identifiées et le potentiel de réduction de poids a été évalué. Quatre concepts composites ont été développés autour d'un véhicule typique, mais fictif. Les trois premiers sont développés autour d'un véhicule à châssis d'acier, tandis que le dernier est développé autour d'un véhicule plus contemporain à grande fenestration et à structure tubulaire autoportante. Les analyses préliminaires démontrent qu'il serait possible de réduire le poids des autobus d'environ 15 p. cent par l'utilisation de composites non aérospatiaux (fibre de verre/résine, par exemple) sans augmentation notable au niveau des coûts de fabrication.</p>					
17. Mots clés <b>Autobus, urbain, matériaux composites, poids, corrosion</b>			18. Diffusion <b>Le Centre de développement des transports dispose d'un nombre limité d'exemplaires.</b>		
19. Classification de sécurité (de cette publication) <b>Non classifiée</b>	20. Classification de sécurité (de cette page) <b>Non classifiée</b>	21. Déclassification (date) <b>—</b>	22. Nombre de pages <b>xxii, 63, ann.</b>	23. Prix <b>Port et manutention</b>	



1. Transport Canada Publication No. <b>TP 13423F</b>		2. Project No. <b>9497</b>		3. Recipient's Catalogue No.	
4. Title and Subtitle <b>Programme de réduction du poids des autobus urbains : Phase 1</b>				5. Publication Date <b>March 1999</b>	
				6. Performing Organization Document No.	
7. Author(s) <b>S. Labonté, Dr. R. Gauvin, and A. Gauthier</b>				8. Transport Canada File No. <b>ZCD2450-D-610-11</b>	
9. Performing Organization Name and Address <b>Centre de Matériaux Composites 216, rue de la Gare St. Jérôme, Quebec J7Z 4Y3</b>				10. PWGSC File No. <b>XSD-8-00956</b>	
				11. PWGSC or Transport Canada Contract No. <b>T8200-8-8550</b>	
12. Sponsoring Agency Name and Address <b>Transportation Development Centre (TDC) 800 René Lévesque Blvd. West Suite 600 Montreal, Quebec H3B 1X9</b>				13. Type of Publication and Period Covered <b>Final</b>	
				14. Project Officer <b>Claude Guérette</b>	
15. Supplementary Notes (Funding programs, titles of related publications, etc.) <b>Co-sponsored by the Program of Energy Research and Development (PERD)</b>					
16. Abstract <p>The weight of urban buses has been increasing steadily over the past few years and some vehicles, when full of passengers, exceed axle load standards. This situation can have a number of adverse effects, particularly on the environment and on paved surfaces, which wear out more quickly. It has become imperative that urban bus weights be reduced. Composite materials offer good potential for weight reduction and have other attractive characteristics for applications on buses, such as good resistance to corrosion and a great deal of freedom in terms of shape. This report studies a variety of options for reducing the weight of urban buses by using composites.</p> <p>Composite material use in buses was evaluated through a literature search and a manufacturers' survey. Our research enabled us to identify which components could be made of composites and to evaluate the weight reduction potential. Four composite concepts were developed around a typical, but hypothetical, vehicle. The first three were developed around a steel chassis vehicle, while the fourth was developed around a more contemporary vehicle with large windows and a self-supporting tubular structure. Preliminary analyses show that it would be possible to reduce a bus's weight by approximately 15 percent using non-aerospace composites (e.g., fibreglass, resins) without significantly increasing manufacturing costs.</p>					
17. Key Words <b>Bus, urban, composite materials, weight, corrosion</b>			18. Distribution Statement <b>Limited number of copies available from the Transportation Development Centre</b>		
19. Security Classification (of this publication) <b>Unclassified</b>		20. Security Classification (of this page) <b>Unclassified</b>		21. Declassification (date) <b>—</b>	22. No. of Pages <b>xxii, 63, apps</b>
				23. Price <b>Shipping/ Handling</b>	

## REMERCIEMENTS

Le Centre des Matériaux Composites remercie tous ceux qui ont bien voulu collaborer à cette étude. En particulier, M. Claude Guérette du Centre de développement des transports qui nous a fourni plusieurs documents et les sociétés de transport de Montréal, de Toronto et d'Ottawa que nous avons visitées et qui nous ont fourni des données précieuses. Également, nous tenons à souligner la collaboration de M. J. Kucheran de National Refurbishing Inc. et les compagnies Orion Bus Industries et Mecanobus.



[page blanche]



## SOMMAIRE

### *Contexte et Objectifs*

Une étude publiée en 1995 par le Centre de développement des transports (CDT) a démontré que le poids des autobus urbains avait augmenté de 25 p. cent en 20 ans et que certains véhicules remplis de passagers dépassaient maintenant les normes de chargement par essieu. Cette étude évaluait bien les effets néfastes de ces autobus trop lourds, notamment en termes de coûts d'opération (carburant, pneus et freins) pour le transporteur, de coûts d'entretien des chaussées qui sont trop sollicitées et qui se détériorent, et de coûts environnementaux liés à la pollution accrue. Sur cette base, il devient clair qu'un objectif important dans le domaine du transport urbain par autobus est de trouver des alternatives, économiquement viables, pour fabriquer des autobus plus légers. À cet égard, les composites offrent un potentiel de réduction de poids des plus intéressants. La présente étude vise donc, d'une part, à faire le point sur l'utilisation actuelle ou prochaine des composites par les fabricants d'autobus neufs et refaits et, d'autre part, à proposer certains concepts qui en permettraient une utilisation plus grande et, par le fait même, l'atteinte d'une réduction de poids plus importante.

Une recherche documentaire et une enquête auprès des fabricants ont permis de confirmer que les composites sont déjà présents dans les autobus urbains commerciaux, mais qu'ils sont surtout utilisés de façon traditionnelle et principalement sur la base de leur bonne résistance à la corrosion et de la liberté qu'ils offrent au niveau des formes. Étonnamment, cette enquête a démontré que tant les utilisateurs que les fabricants attachaient relativement peu d'importance au poids des véhicules, mais que la corrosion les préoccupait beaucoup. La recherche documentaire a permis d'identifier certains projets où les composites furent utilisés de façon plus intensive, comme le Advanced Technology Transit Bus (ATTB) aux États-Unis et le Metroliner en Europe. Des réductions de poids significatives y ont été atteintes, à la fois par la réduction du poids de la structure et de l'habillage du véhicule et par la réduction du poids des composantes mécaniques (composantes plus petites). Bien que ces véhicules soient destinés à un marché plus restreint en raison de la fibre de carbone qui y est largement utilisée et qui en fait des véhicules dispendieux, ces projets ont permis de confirmer le potentiel de réduction du poids total de l'autobus de l'ordre de 30 p. cent.



### *Composante en matériaux composites*

L'identification des composantes pouvant bénéficier de l'utilisation des composites a permis de voir que le potentiel de réduction était, somme toute, limité puisque l'ensemble des composantes non mécaniques ne représente qu'environ 30 p. cent de la masse totale d'un autobus urbain. L'importance des surfaces vitrées pose également un problème particulier dans le cas des autobus urbains. Des suggestions pour incorporer les composites dans des composantes individuelles sont également apportées dans ce rapport. Six composantes sont particulièrement intéressantes pour une version composite : les portes, le toit, les escaliers, les faces avant et arrière et le plancher. À la lumière de ces résultats et en considérant les conclusions obtenues de l'enquête auprès des utilisateurs et des fabricants, il est apparu évident que la réduction de poids seule ne peut pas être une justification suffisante pour amener une plus grande utilisation des composites dans les autobus urbains en particulier au niveau des composantes. D'autres avantages, comme la résistance à la corrosion et la grande liberté au niveau des formes, doivent alors être mis de l'avant lors de la sélection des matériaux pour favoriser les composites.

### *Concepts d'autobus en composites*

Quatre concepts composites très préliminaires ont été développés autour d'un véhicule de référence typique, mais fictif, afin d'éviter de travailler avec un véhicule particulier tout en se donnant une base de comparaison fiable. Les trois premiers concepts sont développés autour d'un véhicule avec châssis d'acier, tandis que le dernier est développé autour d'un autobus plus contemporain à grande fenestration et à structure tubulaire autoportante. Les concepts avec châssis ne permettent pas la configuration à plancher surbaissé, contrairement aux concepts à structure tubulaire autoportante et monocoque. Les concepts y sont présentés à l'aide de dessins conceptuels et les matériaux, les procédés de fabrication et les modes d'assemblage sont décrits. Pour chaque concept proposé, la masse de l'autobus qui en découle est comparée à celle du véhicule de référence correspondant. Une analyse économique sommaire permet de mesurer l'impact sur le coût de fabrication pour chacun des concepts. Les résultats sont présentés aux tableaux 1 et 2.

**Tableau 1** : Résumé des concepts composites «avec châssis» proposés

Concept	Caractéristiques principales	Variation masse (pourcentage)	Variation coût production (pourcentage)	Niveau de risque
Référence acier	châssis d'acier (plate-forme) + ossature d'acier + revêtement tôle d'acier	10 500 kg	152 400 \$	s/o
1-A, 1-B	châssis d'acier (plate-forme) + ossature d'acier, inoxydable + revêtement panneaux composites	- 1,9 %	+ 1,3 %	faible
1-C	châssis d'acier (plate-forme) + ossature en profilés composites pultrudés + revêtement panneaux composites	+23,2 %	+ 5,8 %	moyen
2-A	châssis d'acier (plate-forme) + caisse structurale composée de panneaux sandwichs en composites	- 14,4 %	+ 0,3 %	moyen
2-B	châssis d'acier (plate-forme) + caisse structurale structure sandwich monocoque	- 14,4 %	- 0,3 %	moyen
3	châssis d'acier (plate-forme) + caisse structurale composée de profilés composites pultrudés	- 8,3 %	- 0,7 %	élevé

**Tableau 2 :** Résumé des concepts composites «sans châssis» proposés

Concept	Caractéristiques principales	Variation masse (pourcentage)	Variation coût production (pourcentage)	Niveau de risque
Référence (concept de base)	structure autoportante acier (ou acier inoxydable) + revêtement peaux composites	10 490 kg	161 150 \$	faible
4	caisse monocoque autoportante composites + berceaux métalliques pour intégration des éléments mécaniques	- 14,3 %	+ 33,8 %	moyen

Une analyse de sensibilité a été réalisée afin d'apprécier l'effet de la précision des temps de fabrication considérés sur le coût total. Il appert que ce dernier soit peu sensible aux évaluations de temps de fabrication. Les analyses démontrent qu'il serait possible de réduire le poids d'un autobus urbain avec châssis de près de 15 p. cent sans trop augmenter le coût de fabrication, tout en gardant le risque à un niveau acceptable et en utilisant des composites à base de fibre de verre qui sont beaucoup moins dispendieux que ceux à base de carbone qui, comme dans les projets ATTB et Metroliner, permettent une réduction de poids plus grande mais à un coût beaucoup plus élevé. Un allègement du même ordre de grandeur est aussi envisageable pour un autobus sans châssis à grande fenestration, mais l'utilisation des composites a alors un impact plus important sur le coût de production.

Un autre procédé de fabrication, comme l'infusion de résine, combiné à des travaux d'optimisation permettraient de diminuer à la fois le coût de fabrication et la masse, et ainsi de rendre cette solution plus attrayante. Le concept 4 est le seul, parmi tous les concepts proposés, qui **exploite au maximum les trois avantages jugés critiques pour l'utilisation des composites dans les autobus urbains : légèreté, résistance à la corrosion inégalée et liberté, presque absolue, au niveau des formes**. Pour ces raisons, cette solution nous semble prometteuse et devrait être examinée davantage lors de travaux ultérieurs.

Il ressort clairement de cette étude que la seule façon de réduire significativement le poids des autobus urbains est d'intégrer les composites à **tous les niveaux possibles**, y compris au niveau de la structure. Autrement, le remplacement *composante par composante*, même s'il peut aider à résoudre certains problèmes

de corrosion où d'aspect visuel, ne conduira qu'à des réductions de poids négligeables.



[page blanche]

## SUMMARY

### *Background and Objectives*

A study published by the Transportation Development Centre (TDC) in 1995 showed that the weight of urban buses had increased by 25 p. cent over 20 years and that some vehicles, when carrying a full complement of passengers, exceeded permitted axle weights. The study clearly documented the adverse effects of overweight buses, particularly in terms of operating costs for carriers (fuel, tires, and brakes), the costs of maintaining the overtaxed and degraded roads used, and the environmental costs of the resultant extra pollution. Accordingly, it has become clear that a key objective in the field of urban bus transportation must be to find economically viable ways to build lighter buses. As it happens, composite materials are potentially very useful for reducing weight. This study therefore first looks at the current and planned uses of composites by manufacturers of new and reconditioned buses; it then puts forward a number of models that would favour the use of composites and hence lead to greater weight savings.

A literature search and a survey of manufacturers confirmed that composites are already used in commercial urban buses, though largely in traditional ways and chiefly on the strength of their corrosion resistance and versatility of form. Surprisingly, the survey showed that neither users nor manufacturers attached much importance to vehicle weight, though both were greatly concerned about corrosion. The literature search identified various research projects in which composites were used more heavily, such as the Advanced Technology Transit Bus (ATTB) project in the United States and the Metroliner in Europe, where significant weight reductions have been achieved in both the structure and shell of the vehicle and its (smaller) mechanical components. Though such vehicles appeal to a narrower market because the carbon fibre extensively used makes them expensive to buy, these projects have demonstrated that potential overall bus weight reductions of about 30 p. cent can be achieved.

### *Components made of composites*

When the components where composites could be used were identified, it was realized that the overall potential for weight saving was limited because non-mechanical components account for no more than about 30 p. cent of the total mass of an urban bus. Window area also poses special problems in urban buses. The report includes suggestions for incorporating composites into individual components, six of which are of particular interest for a composite version: doors, roof, steps, front and rear ends, and floor. Given these results, and taking into consideration the findings of the survey of users and manufacturers, it has become clear that weight



reduction alone is not enough to justify greater use of composites in urban buses, especially in components. Other advantages, like corrosion resistance and versatility of form, need to be highlighted to promote composites when materials are selected.

#### *Models for a bus using composites*

Four highly preliminary composite models were developed around a typical, though theoretical, reference vehicle to provide a reliable basis for comparison without having to work on a specific vehicle. The first three models were developed around a steel-chassis vehicle and the fourth around a more modern design with large windows and a self-supporting tubular frame. The chassis models did not allow for a low-slung floor, unlike the self-supporting tubular frame and monocoque models. The models are illustrated by conceptual drawings, and the materials, manufacturing processes, and assembly methods are described. For each proposed model, the mass of the resultant vehicle is compared with that of the corresponding reference vehicle. A cursory economic analysis quantifies the impact on production costs for each model. The results are shown in tables 1 and 2.



**Table 1:** Overview of proposed “chassis” composite models

Model	Main characteristics	Mass variance (percentage)	Production cost variance (percentage)	Risk level
Steel reference	steel chassis (platform) + steel frame + sheet steel skin	10 500 kg	\$152 400	N/A
1-A, 1-B	steel chassis (platform) + stainless steel frame + composite panel skin	-1,9%	+1,3%	low
1-C	steel chassis (platform) + pultruded composite frame + composite panel skin	+23,2%	+5,8%	moderate
2-A	steel chassis (platform) + box frame of composite sandwich panels	-14,4%	+0,3%	moderate
2-B	steel chassis (platform) + box frame of sandwich monocoque structure	-14,4%	-0,3%	moderate
3	steel chassis (platform) + box frame made of pultruded composite sections	-8,3%	-0,7%	high

**Table 2:** Overview of proposed “non-chassis” models

Model	Main characteristics	Mass variance (percentage)	Production cost variance (percentage)	Risk level
Reference (basic model)	self-supporting steel (or stainless steel) structure + composite skin	10 490 kg	\$161 150	low
4	self-supporting composite monocoque body + metal fittings to hold mechanical components	-14,3%	+33,8%	moderate

A sensitivity analysis was done to measure the effect of calculated production times on overall cost. Apparently, cost is not very sensitive to estimated production times. The analyses show that the weight of an urban bus with a chassis can be reduced by close to 15 p. cent without significantly raising manufacturing costs while keeping risk levels acceptably low, using fibreglass- based composites, which are much cheaper than carbon-based materials; the latter, as shown by the ATTB and Metroliner projects, achieve greater weight savings, but at a much higher cost. A similar weight reduction is also envisioned for a non-chassis, large windows bus, but composites have a greater impact on the fabrication cost.

Alternative production processes, such as resin injection, combined with optimization, would help cut both production costs and weight, thus giving this solution even greater appeal. Model 4 is the only one of those proposed that exploits to the fullest extent the **three advantages deemed critical for the use of composites in urban buses, namely lightness, unrivalled corrosion resistance, and almost limitless versatility of form.** For these reasons, we find this solution promising, and subsequent studies should examine it further.

What this study clearly shows is that the only way to achieve significant weight reductions in urban buses is to integrate composites **wherever possible**, including the structural framework. Otherwise, proceeding *component by component*, though it may help resolve some problems of corrosion or appearance, will generate only negligible weight reductions.

## TABLE DES MATIÈRES

1.	INTRODUCTION .....	1
1.1	EXPOSÉ DU PROBLÈME .....	1
1.2	MANDAT .....	2
2.	ENQUÊTE .....	3
2.1	INTRODUCTION.....	3
2.2	RÉFECTION DES AUTOBUS.....	4
2.3	TECHNOLOGIES COURANTES .....	5
2.4	TECHNOLOGIES EN DÉVELOPPEMENT .....	6
	2.4.1 Au Canada .....	6
	2.4.2 Aux États-Unis .....	7
	2.4.3 En Europe .....	10
2.5	UTILISATION DE L'ALUMINIUM .....	11
2.6	UTILISATION DE L'ACIER .....	12
3.	IDENTIFICATION DES COMPOSANTES .....	13
3.1	FACES AVANT ET ARRIÈRE .....	13
3.2	PAROIS LATÉRALES .....	14
3.3	STRUCTURE.....	15
3.4	PLANCHER.....	15
3.5	PORTES.....	15
3.6	ESCALIERS .....	16
3.7	SIÈGES.....	16
3.8	ENSEMBLE DES COMPOSANTES NON MÉCANIQUES.....	16
4.	CONCEPTS PRÉLIMINAIRES POUR L'UTILISATION DES COMPOSITES	19
4.1	AUTOBUS AVEC CHÂSSIS .....	21
	4.1.1 Autobus de référence.....	21
	4.1.2 Concept 1 : Habillage d'une ossature portante en acier par des panneaux composites – autobus sur châssis d'acier .....	23

4.1.3	Concept 2 : Caisse en panneaux sandwichs structuraux .....	30
4.1.4	Concept 3 : Assemblage de panneaux pultrudés .....	39
4.2	AUTOBUS SANS CHÂSSIS .....	44
4.2.1	Autobus de référence/concept de base actuel .....	44
4.2.2	Concept 4 : Caisse monocoque autoportante .....	45
4.3	RÉSUMÉ DES CONCEPTS COMPOSITES PRÉLIMINAIRES .....	50
4.4	COMPOSANTES INDIVIDUELLES.....	53
4.4.1	Portes .....	55
4.4.2	Toit .....	55
4.4.3	Escaliers .....	56
4.4.4	Bout avant et bout arrière .....	56
4.4.5	Plancher .....	57
5.	CONCLUSION ET IDENTIFICATION DES PARTENAIRES .....	59
5.1	CONCLUSION.....	59
5.2	IDENTIFICATION DES PARTENAIRES .....	62

#### Bibliographie

- Annexe A : Données sur l'autobus Metroliner
- Annexe B : Concept proposé par une firme anglaise en 1980
- Annexe C : Autobus de référence avec châssis
- Annexe D : Concepts 1-A, 1-B et 1-C
- Annexe E : Concepts 2-A, 2-B et 2-C
- Annexe F : Concept 3
- Annexe G : Autobus de référence sans châssis et grande fenestration –  
Concept de base actuel
- Annexe H : Concept 4

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 1</b> : Utilisation des composites dans les autobus urbains de fabrication canadienne - sièges exclus .....	6
<b>Tableau 2</b> : Avantages et désavantages du concept 1-A .....	24
<b>Tableau 3</b> : Comparaison des concepts «châssis d'acier avec carrosserie à ossature portante» à l'autobus de référence .....	30
<b>Tableau 4</b> : Avantages et désavantages du concept 2-A .....	32
<b>Tableau 5</b> : Comparaison des concepts «panneaux sandwichs structuraux» à l'autobus de référence .....	39
<b>Tableau 6</b> : Avantages et désavantages du concept 3 .....	42
<b>Tableau 7</b> : Comparaison du concept 3 à l'autobus de référence .....	43
<b>Tableau 8</b> : Comparaison du concept 4 aux autobus de référence «sans châssis», grande fenestration.....	50
<b>Tableau 9</b> : Résumé des concepts composites «avec châssis» proposés .....	51
<b>Tableau 10</b> :Résumé des concepts composites «sans châssis» proposés .....	52
<b>Tableau C-1</b> : Ventilation des masses – autobus de référence avec châssis	Annexe C
<b>Tableau C-2</b> : Évaluation des coûts de fabrication – autobus de référence avec châssis	Annexe C
<b>Tableau D-1</b> : Ventilation des masses – concepts 1-A et 1-B	Annexe D
<b>Tableau D-2</b> : Ventilation des masses – concept 1-C	Annexe D
<b>Tableau D-3</b> : Évaluation des coûts de fabrication – concepts 1	Annexe D
<b>Tableau E-1</b> : Ventilation des masses – concepts 2	Annexe E
<b>Tableau E-2</b> : Évaluation des coûts de fabrication – concepts 2	Annexe E

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau F-1</b> : Ventilation des masses – concept 3	Annexe F
<b>Tableau F-2</b> : Évaluation des coûts de fabrication – concept 3	Annexe F
<b>Tableau G-1</b> : Ventilation des masses – autobus de référence sans châssis	Annexe G
<b>Tableau G-2</b> : Évaluation des coûts de fabrication – autobus de référence sans châssis	Annexe G
<b>Tableau H-1</b> : Ventilation des masses – concept 4	Annexe H
<b>Tableau H-2</b> : Évaluation des coûts de fabrication – concept 4	Annexe H

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1</b> : Autobus ATTB [3] .....	8
<b>Figure 2</b> : Autobus <i>Plaxton Pointer 2</i> [7] .....	11
<b>Figure 3</b> : Concept d'autobus avec châssis d'acier.....	22
<b>Figure 4</b> : Autobus concept 2-A .....	31
<b>Figure 5</b> : Autobus concept 2-B .....	35
<b>Figure 6</b> : Autobus concept 2-C .....	37
<b>Figure 7</b> : Autobus concept 4.....	46
<b>Figure 8</b> : Comparaison des concepts .....	54

2452-DD-001	Autobus de référence avec châssis (5 pages)	Annexe C
2452-DD-003	Concept 1 (5 pages)	Annexe D
2452-DD-004	Concept 2-A (4 pages)	Annexe E
2452-DD-005	Concept 2-B (4 pages)	Annexe E
2452-DD-006	Concept 2-C (4 pages)	Annexe E
2452-DD-002	Concept 3 (5 pages)	Annexe F
2452-DD-008	Autobus de référence sans châssis (1 page)	Annexe G
2452-DD-007	Concept 4 (6 pages)	Annexe H

[page blanche]



# 1. INTRODUCTION

## 1.1 EXPOSÉ DU PROBLÈME

Depuis quelques années, les autorités s'intéressent de plus en plus au poids des autobus urbains. Même si des matériaux plus légers sont utilisés pour les autobus interurbains, ils le sont moins pour les autobus urbains. Le Centre de développement des transports (CDT) de Transports Canada a publié une importante étude sur le poids des autobus urbains en novembre 1995 [1]. On y rapporte que de 1972 à 1992, le poids des autobus urbains a augmenté de 25 p. cent pour atteindre un poids moyen de 11 000 kg. Cette forte augmentation est principalement due à l'augmentation du poids des éléments du groupe de propulsion, soit le moteur et la transmission de même que des composantes de la suspension. Ces fortes augmentations n'ont pas été compensées par une réduction du poids de la structure des autobus. La situation a atteint un point critique puisque, selon le rapport, dans plusieurs cas, lorsque l'autobus est rempli de passagers, le poids du véhicule chargé ne respecte pas les normes de chargement par essieu de plusieurs juridictions. Leur utilisation est donc illégale.

La sensibilisation des gens aux effets néfastes d'autobus trop lourds sur les coûts d'exploitation, les coûts environnementaux et les coûts d'entretien des chaussées s'est grandement accrue au cours des dernières années. Les accords de Kyoto sur l'environnement viennent augmenter cette sensibilisation.

Dans l'étude citée précédemment, on mentionne qu'une réduction de 10 p. cent du poids d'un autobus correspond à une économie de 0,04 \$ par kilomètre parcouru. Environ 40 p. cent de cette économie provient de la réduction du coût d'opération, 30 p. cent provient de l'économie associée à la réduction de la pollution atmosphérique et le dernier 30 p. cent d'économie de la réduction des dommages aux routes. En 1999, ces économies sont sans doute encore plus importantes.

L'objectif ultime dans ce domaine est de trouver des alternatives économiquement viables pour construire des autobus urbains plus légers en utilisant les matériaux composites. Dans ce contexte de réduction de poids, il est aussi important d'examiner ce qui peut être fait pour les autobus existants à l'occasion de leur réfection après quelques années d'utilisation.

La reprise de la conception d'un autobus pour y introduire des composites est un travail majeur qui passe par l'analyse et la validation de concepts qui respectent les



exigences des clients, le choix des matériaux et des technologies de fabrication, l'analyse des coûts et des performances du véhicule. **Le présent projet est une étude préliminaire qui est la première étape d'un tel programme de transformation.**

## 1.2 MANDAT

Selon la proposition qui a été acceptée, les objectifs de la présente étude sont :

- Faire une enquête sur l'utilisation actuelle des composites dans les autobus urbains et essayer d'obtenir des informations sur les projets de développement en cours.
- Identifier les pièces qui pourraient avantageusement être fabriquées en composites.
- Proposer des concepts préliminaires pour une plus grande utilisation des composites.

Ces objectifs s'appliquent aux deux volets de l'étude, soit les autobus urbains neufs et les autobus urbains refaits en partie.

Les tâches qui apparaissent dans la proposition sont :

**Tâche 1 :** Gestion du projet et coordination

**Tâche 2 :** Relevé de l'utilisation actuelle des composites dans les autobus urbains neufs et ceux refaits.

**Tâche 3 :** Identification des composantes offrant le meilleur potentiel pour l'introduction des composites.

**Tâche 4 :** Élaboration de concepts préliminaires pour l'utilisation des composites.

**Tâche 5 :** Identification de partenaires prêts à financer des travaux dans ce domaine.

## 2. ENQUÊTE

### 2.1 INTRODUCTION

Cette enquête a surtout été faite par le biais de conversations téléphoniques, d'échanges de correspondance de même que par des visites chez de grands utilisateurs canadiens et de quelques renseignements provenant de fabricants. Dans la plupart des cas, les renseignements ont été transmis par des personnes qui ne voulaient pas être citées dans ce rapport.

Les grands utilisateurs comme la Société de transport de la communauté urbaine de Montréal, la Toronto Transit Commission et la Ottawa Transit Commission ont répondu à toutes nos questions et nous ont laissé volontiers visiter leurs installations. Il en fut de même pour plusieurs entreprises qui font la réfection des vieux autobus. **Des renseignements précieux ont ainsi été obtenus. Le plus étonnant et le plus important dans le contexte de cette étude est que les grands utilisateurs attachent très peu d'importance au poids des véhicules. La résistance à la corrosion par contre les préoccupe beaucoup.** Un document récemment publié [2] par un regroupement de 13 sociétés de transport du Canada et des États-Unis qui achètent, annuellement, au moins 60 p. cent de tous les autobus urbains vendus dans ces deux pays abonde d'ailleurs dans le même sens. En effet, dans ce dernier document, on mentionne bien sûr que le poids des autobus doit être réduit, **mais on y constate surtout que les grands utilisateurs sont plutôt préoccupés par des considérations de coûts, de longévité et d'entretien des véhicules** (résistance à la corrosion de la structure, garantie que doit offrir le fabricant, plancher libre d'obstacles pour faciliter le nettoyage), **d'accessibilité des autobus** (largeur des portes, des allées), **de capacité des autobus** (nombre de places assises, de places totales), **et de confort** (niveau de bruit, ventilation et chauffage, dimension des fenêtres). **La résistance à la corrosion, puisqu'elle affecte directement la longévité des véhicules, est donc l'élément qui peut contribuer le plus à accroître l'utilisation des composites et, par conséquent, amener une réduction plus importante du poids.**

Les fabricants d'autobus sont très avares de renseignements et on ne peut rien en tirer, même sur les matériaux et les concepts qu'ils utilisent présentement. Pour ce qui est des projets en développement, il a été tout à fait impossible d'obtenir de l'information malgré de nombreux efforts. Ce comportement des fabricants est le même partout, que ce soit au Canada, aux États-Unis ou en Europe. **Lorsque des**



**renseignements techniques nous étaient fournis, ils l'étaient sous le sceau de la confidentialité.**

## **2.2 RÉFECTION DES AUTOBUS**

Au cours des quinze dernières années, la fabrication des autobus urbains était basée sur une conception de structure métallique habillée avec des tôles d'acier ou d'aluminium soudées ou rivetées à l'ossature. La vie utile de ce type de construction est prévue pour 10 à 12 ans. La corrosion est le principal problème et dans bien des cas, il faut effectuer des réparations majeures après cinq ou six ans de service.

Suite aux visites effectuées aux différents centres d'entretien d'autobus urbains, particulièrement ceux où s'effectue la reconstruction de véhicules de même que ceux des entreprises qui offrent ce service, il est clairement apparu que la principale cause d'avaries aux structures des autobus est la corrosion. Cette corrosion s'attaque à toute la base de la caisse et s'arrête, en général, au niveau des fenêtres. Le toit et le haut de la caisse sont rarement affectés.

La reconstruction consiste à démanteler le véhicule et à récupérer les éléments de la structure qui ne sont pas corrodés. La partie basse de la structure et des panneaux sont souvent presque totalement remplacés. Dans bien des cas, seules les membrures du plancher et le toit sont réutilisés. Les faces avant et arrière sont entièrement reconstruites. Les portes, cadrages de portes, marches d'accès sont généralement remplacés.

La reconstruction pourrait utiliser plus de composites, particulièrement pour les faces avant et arrière, les portes et les panneaux latéraux. Quant aux escaliers, ils sont déjà en composites dans plusieurs modèles. Malgré les avantages associés aux composites qui prolongeraient la durée de vie des véhicules, les installations des ateliers de réparations et l'expertise des employés limitent encore considérablement une plus grande utilisation des composites dans la réfection des autobus urbains.

Les méthodes traditionnelles de remise à neuf, soit l'utilisation des matériaux d'origine comme l'acier ou l'aluminium et dans certains cas les composites, ont permis de réaliser des économies de 25 à 30 p. cent par la reconstruction en comparaison de l'achat d'autobus neufs.

**En conclusion**, on peut dire que pour la réfection des autobus, il y a deux écoles de pensées. La première consiste à rebâtir les véhicules en respectant le design original et en utilisant les mêmes matériaux. D'autres croient au remplacement de

pièces ou de modules entiers par des composites et ils le font. Les petites sociétés de réfection sont les plus susceptibles d'adopter les composites. Un bel exemple est celui des portes et des faces avant et arrière qu'il est avantageux de faire en composites en courte série. Les principales motivations pour l'utilisation des composites sont la résistance à la corrosion et la facilité de reproduire en composites les formes complexes des faces avant et arrière pour lesquelles il n'y a plus de pièces disponibles. **La réduction de poids est bienvenue, mais cet élément entre peu dans la prise de décision.**

### 2.3 TECHNOLOGIES COURANTES

La plupart des fabricants nord américains utilisent dans leurs nouvelles générations d'autobus urbains une certaine quantité de matériaux composites dans la construction des autobus. Dans la plupart des cas, les technologies d'utilisation des composites consistent à remplacer la tôle d'habillage par des panneaux en composites qui sont collés sur une structure métallique. Dans ce type de construction, le toit est généralement en composite, mais le plancher est généralement en contreplaqué de type marin spécialement traité pour résister à la pourriture sous l'effet de l'humidité.

Les trois fabricants canadiens tels que New Flyer Industries, Nova Bus et Orion Bus Industries utilisent les composites selon ce concept dans leurs modèles récents. Les portes et autres éléments comme les pare-chocs sont métalliques. Les sièges sont souvent hybrides, c'est-à-dire une structure tubulaire métallique, le siège et le dossier étant en composites. Nous n'avons pas relevé de sièges entièrement en composites. Le tableau 1 présente un résumé de l'utilisation des composites dans les autobus urbains des trois grands fabricants canadiens. Les sièges ne sont pas considérés dans ces composantes, car ils sont de toute façon en composite, leur nombre varie d'un autobus à l'autre et il s'agit d'une application où d'autres considérations que le poids expliquent l'utilisation des composites. Les sièges composites (coquilles seulement) représentent une masse totale d'environ 150 kg.

Dans certains concepts d'autobus, comme le plus récent à plancher bas de Nova Bus, la fenestration occupe une surface très importante de la caisse. De ce fait, le potentiel de réduction de poids en utilisant des composites est réduit. Par contre, l'utilisation des composites pour les bas de caisse en fait un véhicule beaucoup plus résistant à la corrosion.



**Tableau 1 :** Utilisation des composites dans les autobus urbains de fabrication canadienne - sièges exclus

Fabricant	Principales composantes	Masse totale (kg)	Masse relative des composites par rapport à l'ensemble de l'autobus (%)
Nova Bus	face avant, face arrière, panneaux latéraux, feuilles de toit, cage de roues, poste de conduite	340 à 450 kg	3,2 %
Orion Bus Industries	face avant, face arrière, cage de roues	135 à 180 kg	1,2 %
New Flyer Industries	face avant, panneau arrière, toit, cage des roues avant, panneaux d'accès (couvercles) divers	125 à 175 kg	1,2 %

Donc oui, les composites sont présents dans les autobus urbains, mais leur utilisation est encore marginale.

## 2.4 TECHNOLOGIES EN DÉVELOPPEMENT

Dans ce rapport, l'expression *technologies en développement* est utilisée dans le sens qu'elles ne sont pas encore complètement éprouvées et surtout qu'elles ne sont pas encore utilisées sur une grande échelle même si, dans certains cas, elles ont été proposées il y a quelques années. Elles sont parfois assez révolutionnaires et elles peuvent représenter des modifications majeures aux techniques actuelles de montage des véhicules

### 2.4.1 Au Canada

À ce jour, nous n'avons pas été en mesure de savoir s'il y avait des projets un peu plus ambitieux pour la construction d'autobus utilisant des technologies différentes

de celles décrites précédemment. L'autobus à plancher bas de Nova Bus est un exemple typique de panneaux en composites sur une structure métallique. Néanmoins, voulant répondre aux demandes du marché, il est probable que les fabricants canadiens soient à l'affût de nouveaux développements.

#### **2.4.2 Aux États-Unis**

Le parc d'autobus urbains en Amérique du nord, soit environ 55 000 véhicules, et particulièrement son vieillissement, sa moyenne d'âge est d'environ 10 ans, exige de la part des fabricants, opérateurs et utilisateurs une sérieuse réflexion sur les véhicules du futur. Plusieurs études et analyses sont ou furent effectuées par différents organismes gouvernementaux et privés sur le type d'autobus répondant aux besoins futurs des opérateurs de transport en commun et de flottes d'autobus urbains.

Parmi ces projets, le plus important et le plus médiatisé est sans doute le projet qui a reçu l'appui du bureau fédéral américain du transport et qui a été réalisé par la société Northrup-Grumman en collaboration avec un comité conjoint d'opérateurs et des principales commissions de transport urbain soit le «Rapid Transit Review Board» (RTRB). Le projet a été mis sur pied en septembre 1992. Ce projet a été nommé «Advanced Technology Transit Bus» (ATTB). Un budget initial de 57 millions de dollars US fut mis à la disposition du groupe pour la recherche et la mise au point d'un autobus urbain répondant aux caractéristiques suivantes [3] :

- i) réduction de poids de l'ordre de 3 600 kg à 4 500 kg (par rapport aux autobus urbains de 12 m);
- ii) économie de carburant;
- iii) réduction de l'usure des pièces;
- iv) économie sur l'entretien;
- v) remplacement rapide des pièces;
- vi) réduction de 30 p. cent à 50 p. cent sur le temps des réparations;
- vii) augmentation de la durabilité;
- viii) accès facile pour les usagers;
- ix) diminution de la corrosion.

D'autres objectifs tels que la réduction des émissions, le véhicule à plancher surbaissé, et l'utilisation par des passagers ayant une autonomie limitée furent également pris en considération dans la conception du nouvel autobus.

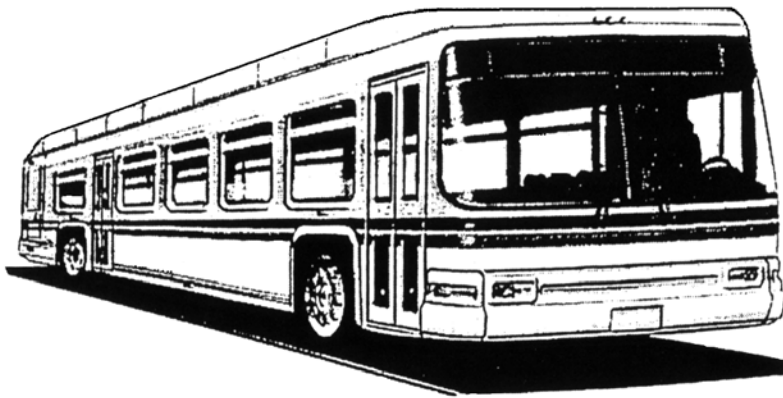
La conception qui a été retenue est assez révolutionnaire pour un autobus urbain. Le concept structural est similaire à celui utilisé dans un projet européen, le Metroliner, qui est antérieur au projet américain et que nous présentons plus loin. Par contre, la technique de fabrication est différente pour ces deux projets.



Pour les deux projets, le concept utilisé est celui d'une coque structurale autoportante qui élimine l'ossature et le châssis. La coque est une construction sandwich résistante mécaniquement. Elle améliore aussi l'atténuation du bruit.

L'analogie s'arrête là. La technique de fabrication et les matériaux utilisés sont différents. Le projet américain utilise un procédé d'infusion sous vide de la résine appelé SCRIMP pour «Seemann Composites Resin Infusion Molding Process». Ce procédé est breveté. Il est particulièrement adapté pour les grandes pièces et il a été développé pour la construction de bateaux.

À ce jour, les premiers résultats de la mise en service des prototypes ne semblent pas donner les résultats escomptés. **Les matériaux composites ne sont pas en cause.** Les difficultés notées proviennent des nouveaux éléments que l'on a voulu introduire dans une flotte d'autobus urbains tels que la propulsion hybride, une nouvelle transmission, une suspension et d'autres mécanismes de même qu'un carburant d'avant-garde. Il appert que l'ensemble de l'industrie des fabricants d'autobus urbains, pour des raisons que l'on ignore, n'a pas été invitée à participer à ce projet. Ils auraient souhaité une participation plus active et y apporter leur concours sous une forme quelconque. Ce projet s'est terminé en janvier 1999 avec la mise en service du sixième prototype. L'autobus ATTB est présenté à la figure 1.



**Figure 1 :** Autobus ATTB [3]

Il y a six prototypes d'autobus du type «tout composite» assemblés à ce jour. Officiellement référé comme «Advanced Technology Transit Bus - ATTB project», il est le premier autobus du genre entièrement contrôlé par ordinateur. Les prototypes furent construits par la compagnie américaine Northrup-Grumman, réputée dans la construction aéronautique.



Quelques prototypes sont actuellement en usage dans la région de Los Angeles. Le ATTB offre plusieurs avantages distincts en comparaison avec l'autobus traditionnel, notamment :

\* **Diminution de poids** - Le poids total en charge (sans passager) du ATTB a été réduit à 9 525 kg, soit une réduction de 30 p. cent par rapport au poids d'un autobus traditionnel. Ce résultat permet une économie de carburant, d'usure de freins, des pneus et d'une réduction de la détérioration des chaussées. Il a aussi une vie utile estimée supérieure. En comparaison à l'âge moyen de 12 ans et 800 000 km, l'estimation de la vie utile du ATTB est de 25 ans et de 1 600 000 km.

\* **Plancher surbaissé** - Il permet une accessibilité plus facile en n'ayant qu'à effectuer un seul pas et sans marche. Le plancher ayant une hauteur de 38 cm, il est plus facile pour les passagers d'accéder à l'intérieur de l'autobus. Une rampe d'accès est prévue pour les personnes se déplaçant en chaise roulante.

\* **Sans émission polluante** - L'autobus ATTB est propulsé par un système hybride moteur/générateur utilisant le gaz naturel comprimé sans émission polluante. Une pile à combustion pourrait être incorporée dans le futur, si celle-ci offre une performance appropriée.

\* **Usage facile** - Il est muni d'un plancher plat du devant vers l'arrière, sans aucune marche ou élévation, en plus des grandes portes d'accès. De ce fait, il est un autobus plus sécuritaire, avec des accès faciles et plus rapides pour les passagers. De plus, on dit que la conduite est plus sécuritaire. Une amélioration a été apportée aux indicateurs visuels pour les passagers ainsi que la localisation de cartes «intelligentes» pour son entretien.

\* **Absorption d'impact** - Un autre avantage d'une carrosserie tout composite sur le ATTB est la sécurité. L'exigence des normes de sécurité ne permet que de légers dommages sur l'habillage d'autobus urbains. Lors d'essais d'impact à une vitesse de 40 km/h d'un véhicule de 1 800 kg sur le côté de l'autobus, il n'y a eu aucun dommage à la structure ou à l'habillage extérieur à part quelques marques de peinture de la voiture d'essais. Ceci est quand même assez exceptionnel et très supérieur à une construction métallique classique.

Des fabricants américains tels que North American Bus Industries (NABI) sont à introduire une nouvelle génération d'autobus urbains ayant une structure tout composite, monocoque, et utilisant le procédé de fabrication par infusion SCRIMP (par ex. les modèles 30C-LF ou 40C-LF). Le fabricant NABI affirme que l'utilisation des composites a conduit à un véhicule environ 30 p. cent plus léger que son équivalent en acier [4]. Nous n'avons pas obtenu d'informations précises quant aux



détails de fabrication de la structure de ces autobus, mais le composite est fait de résine vinylester renforcé de fibre de verre. De façon générale, la majorité des fabricants américains utilisent les composites à des degrés divers, soit pour des raisons d'esthétique, de géométrie ou de résistance à la corrosion. Très peu d'entre eux considèrent le poids de la structure des autobus comme un atout de vente de leurs véhicules.

### 2.4.3 En Europe

En Europe, il semble y avoir une plus grande utilisation de l'aluminium pour les autobus urbains, non seulement pour le châssis, mais aussi pour la tôle d'habillage comme le fait Säfte de la Suède et Hess de la Suisse. Du côté composites, il semble que Mercedes a fait récemment une étude sur un autobus entièrement en composites. Cependant, la compagnie a finalement décidé de faire sa prochaine génération d'autobus en aluminium, ce qui est aussi très bon pour réduire le poids. Du côté italien, IVECO ne semble pas avoir de projet de développement d'autobus en composites ni en aluminium. Pour Volvo, nous n'avons pas été en mesure d'obtenir des renseignements fiables sur leurs projets de développement en Europe. Par contre, leur implication locale dans Nova Bus et Prevost Car, qui tous les deux utilisent largement les composites, nous incite à croire que l'utilisation des composites fait partie de la stratégie de l'entreprise.

À l'échelle européenne, le projet d'un autobus tout composite le plus connu est celui de l'autobus appelé «Metroliner» de la compagnie Neoplan-Auwärter de Stuttgart en Allemagne [5]. Comme le projet ATTB aux États-Unis, la coque est structurale et autoportante, éliminant l'ossature et le châssis. La coque est une structure sandwich avec un cœur en nid d'abeilles. Ce type de construction que l'on retrouve en aéronautique est extrêmement légère et aussi très résistante. Elle peut être réalisée par différents procédés tels que l'infusion ou l'utilisation de préimprégnés.

La réduction de poids de ce concept est extrêmement important. Le document de l'annexe A nous indique un poids de 1 100 kg pour la structure du Metroliner par rapport à un poids de 2 200 kg de l'ancien modèle.

Finalement, nous avons estimé intéressant de ressortir un concept qui avait été proposé par une firme anglaise en 1980 et qui est donné à l'annexe B [6]. Ce concept modulaire nous semble intéressant et il pourrait sans doute être repris en utilisant les matériaux composites. Par contre, c'est un concept qui nécessite un châssis assez rigide. **Il faut noter que l'objectif de ce concept est une construction modulaire et non une réduction de poids.**

## 2.5 UTILISATION DE L'ALUMINIUM

Une commission canadienne de transport public, BC Transit, a procédé récemment à l'acquisition de 50 autobus urbains de 9 m dont la carrosserie est fabriquée en aluminium sur un châssis d'acier d'une entreprise de la Grande-Bretagne. Le besoin d'un autobus de 9 m est la principale raison de cet achat. Le fait que la carrosserie soit en aluminium offre l'avantage de résister à la corrosion et de limiter le poids du véhicule. L'entreprise anglaise *Dennis Specialist Vehicles* est le maître d'œuvre pour fournir ces autobus. L'ossature est fabriquée en aluminium extrudé et l'habillage en tôle d'aluminium rivetée à l'ossature. Cette caisse est assemblée sur un châssis en acier. La figure 2 présente la carrosserie de l'autobus Pointer 2 de la compagnie *Plaxton Coach & Bus*. Cette carrosserie sera montée sur les véhicules Dennis Dart fournis par la compagnie *Dennis Specialist Vehicles* pour la BC Transit.



**Figure 2 :** Autobus *Plaxton Pointer 2* [7]

En Amérique du Nord, l'aluminium est à peu près disparu dans la fabrication des autobus urbains neufs. Les autobus du type «Classic» de General Motors mis en service en 1983 utilisaient un revêtement en tôle d'aluminium anodisé riveté à des membrures formant ainsi une coquille pour les murs extérieurs.

## 2.6 UTILISATION DE L'ACIER

Encore aujourd'hui, l'acier joue un grand rôle dans les structures maîtresses et l'ossature des autobus urbains. La ville de New York, par exemple, exige dans la fabrication de ses autobus, que l'acier inoxydable soit utilisé pour deux raisons : la première étant la **résistance à la corrosion** et la seconde pour **limiter le vandalisme** sur ses véhicules. L'acier inoxydable est en effet plus dur que l'aluminium et donc moins sujet aux éraflures et rayures (coups de couteau, par exemple). Mais surtout, de par sa grande résistance à la corrosion, des solvants très agressifs peuvent être employés lorsque vient le temps de nettoyer les surfaces des véhicules couvertes de graffitis. Également, différents fabricants nord-américains utilisent sur une grande échelle l'acier inoxydable pour à peu près les mêmes raisons. Ce type de fabrication a une incidence majeure sur le poids des véhicules, car l'acier est plus lourd que l'aluminium ou les composites.

### **3. IDENTIFICATION DES COMPOSANTES**

De l'enquête auprès des fabricants et des réseaux d'exploitation, il ressort que, outre la réduction de poids possible, qui est certes considérée comme un atout, mais dont on se préoccupe peu dans les faits, les composites pourraient être intégrés de façon plus importante aux autobus urbains en misant sur d'autres caractéristiques, telles la résistance à la corrosion et la liberté au niveau du design. Plusieurs composantes présentent alors un bon potentiel d'intégration des matériaux composites lorsque l'on ne limite plus l'analyse à la seule réduction de poids. Ces composantes sont énumérées ci-dessous.

Les ratios de masses utilisés dans ce chapitre pour appuyer l'argumentation sont basés sur un autobus de référence qui est décrit à la section 4.1.1. et dont la masse est ventilée à l'annexe C. Ces ratios changent peu lorsque l'on se base sur un autobus plus contemporain comme celui décrit à la section 4.2.1. L'utilisation de masses toutes issues d'un même autobus de référence, y compris la masse totale du véhicule, est ici retenue afin de respecter les ordres de grandeur. Ces masses seront justifiées au chapitre 4.

#### **3.1 FACES AVANT ET ARRIÈRE**

Les faces avant et arrière d'un autobus urbain conventionnel de 2,6 m (102 pouces) de largeur, si l'on considère uniquement la partie carrosserie (structure et glaces exclues), pèsent environ :

- face avant : 50 à 60 kg
- face arrière : 65 à 70 kg

Par rapport à un autobus urbain de 11 000 kg, ces composantes ne représentent qu'une fraction négligeable de la masse totale, soit autour de 0,5 p. cent chacune. Le potentiel de réduction de poids est très limité dans ce cas et il devient dès lors évident que d'autres avantages doivent primer pour déloger les matériaux traditionnels tels l'acier et l'aluminium. La résistance à la corrosion, la liberté des formes et, pour les autobus un peu plus vieux que l'on désire reconstruire et dont les matrices d'emboutissage (pièces d'origines) ne seraient plus disponibles, ainsi que les faibles coûts d'outillages, sont des éléments qui devraient être considérés dans l'analyse des alternatives. La réduction possible des temps d'assemblage reliée à des faces composites intégrant plusieurs fonctions pourrait également être considérée dans des analyses plus détaillées.



### 3.2 PAROIS LATÉRALES

En excluant les glaces, qui représentent une surface de plus en plus grande pour les véhicules de dernière génération, et la structure, les parois latérales d'un autobus conventionnel de 12 m (40 pieds) de long pèsent de 400 à 500 kg. Ceci représente environ 4 p. cent du poids total d'un autobus de 11 000 kg. Encore ici, la légèreté des composites ne constitue pas en soi un argument de vente incontestable. La plus grande liberté au niveau des formes n'a pas non plus beaucoup d'intérêt puisque ces panneaux sont relativement plats. La grande résistance à la corrosion des composites peut cependant être un argument important, surtout si l'on considère les résultats de l'enquête auprès des compagnies œuvrant dans le domaine de la reconstruction qui nous apprenaient que les autobus sont souvent entièrement refaits jusqu'à la hauteur des fenêtres en raison de l'état de dégradation avancé des parois. La bonne résistance aux impacts des composites pourrait aussi être considérée dans les analyses.

Il est important d'attirer ici l'attention du lecteur sur la surface relative des fenêtres par rapport à la paroi latérale, qui est très importante pour les autobus urbains. En effet, les fenêtres des plus récents modèles représentent facilement plus de 35 p. cent de la surface totale pour le côté rue et 25 p. cent pour le côté trottoir. Les tendances observées au cours des dernières années sont plutôt à la hausse qu'à la baisse, comme en fait foi le modèle LFS de Nova Bus (autour de 48 p. cent et 37 p. cent pour les côtés rue et trottoir, respectivement). Ces grandes surfaces vitrées laissent moins de place à des allègements et ce, pour deux raisons principales. D'une part, le verre est dense et donc lourd, et tout allègement de ce côté exigerait une diminution de l'épaisseur du verre, ce qui pourrait être périlleux sur un plan commercial étant donné les conditions de services et les espérances de longévité<sup>1</sup>. D'autre part, la configuration habituelle des fenêtres conduit à des piliers assez minces qui posent des problèmes au niveau structural. Cette situation oblige souvent les concepteurs à recourir à des matériaux de haute résistance et rigidité, en valeur absolue, alors que les composites, si l'on exclut les matériaux de niveau aérospatial, sont intéressants surtout si l'on considère les propriétés spécifiques (par ex. rapport résistance et module sur densité). Cette situation est d'autant plus problématique pour le côté trottoir où, à la surface des fenêtres, s'ajoute les deux portes. De ce côté en effet, les fenêtres et les portes représentent environ 45 p. cent de la surface totale (près de 60 p. cent de la surface dans le cas du LFS de Nova Bus).

---

<sup>1</sup> Le verre pourrait être remplacé par des matériaux plus légers, mais les produits actuellement offerts sur le marché peuvent présenter d'autres problèmes, entre autres en ce qui a trait à la résistance à l'abrasion.

### 3.3 STRUCTURE

Après discussion avec les fabricants et recoupement de l'information obtenue de diverses sources, dont certaines revues spécialisées, il appert que les éléments structuraux de toutes sortes, simplement appelés *structure* dans cette étude, représentent environ 15 p. cent de la masse totale d'un autobus. Une diminution importante du poids de la structure, soit par une substitution de matériaux plus légers ou par l'adoption de nouveaux concepts qui permettent d'éliminer celle-ci, peut se traduire par une diminution plus significative de la masse du véhicule. Si l'on ajoute à cette diminution de poids un aspect résistance à la corrosion, nous voyons que les composites peuvent s'avérer un très bon choix.

### 3.4 PLANCHER

Le plancher est souvent fabriqué de contreplaqué marin recouvert d'un couvre-sol caoutchouteux. Cette solution a l'avantage d'être peu dispendieuse et simple et offre des performances de résistance et de longévité somme toute intéressantes. Le contreplaqué est cependant un matériau dense et sujet à l'absorption d'eau; sa masse a donc tendance à augmenter avec le temps pour se stabiliser lorsque l'équilibre est atteint. Un plancher conventionnel, en contreplaqué de 20 mm (3/4 po) d'épaisseur, pèse environ 250 kg, si l'on considère un autobus de 12 m de long et de 2,6 m de large. Il représente ainsi environ 2,3 p. cent de la masse totale du véhicule. Une réduction, même significative, de la masse du plancher n'aurait donc que peu d'effet sur l'ensemble du véhicule. L'allègement du plancher par l'utilisation de composites devrait cependant être considéré quand même étant donné que la géométrie est simple (panneaux plats) et que la technologie, surtout du côté des panneaux sandwichs, est mature et présente très peu ou pas de risques. Les composites auraient les avantages additionnels d'absorber moins d'eau (donc masse plus stable dans le temps) et avec la possibilité d'améliorer les niveaux d'isolation thermique et acoustique de la caisse.

### 3.5 PORTES

Les portes sont évaluées à 120 kg chacune, en excluant la quincaillerie. Au total, les portes représentent environ 2 p. cent de la masse de l'autobus. Les portes sont elles-mêmes pourvues de grandes ouvertures vitrées qui, en suivant le raisonnement présenté plus haut, laisse peu de place à un éventuel allègement. L'intérêt ici serait plutôt du côté de la résistance à la corrosion et, pour la reconstruction, de la relative facilité à fabriquer des portes avec des outillages bon marché si les pièces d'origine n'étaient plus disponibles.



### **3.6 ESCALIERS**

Les escaliers ne représentent qu'une fraction négligeable du poids total d'un autobus urbain. Ces composantes sont cependant extrêmement sujettes à la corrosion, surtout sous notre climat nordique où le sel de déverglaçage est utilisé en abondance dans les villes en période hivernale. L'intérêt des composites se trouve donc du côté de la résistance à la corrosion. Certains fabricants l'ont d'ailleurs compris, car des escaliers en composites sont déjà en service sur certains modèles.

### **3.7 SIÈGES**

Les sièges sont, pour la plupart des autobus urbains vendus actuellement, déjà en grande partie en composites. Pour cette application particulière, les avantages reliés à l'utilisation des composites sont les suivants :

- liberté au niveau des formes (ergonomie);
- facilité de mouler les sièges en série;
- possibilité d'intégrer la couleur à même la matière;
- facilité de nettoyage;
- légèreté.

Les sièges pèsent de 450 à 500 kg, ce qui représente moins de 5 p. cent de la masse totale d'un autobus. Les sièges sont habituellement faits d'une coquille composite déposée sur une structure tubulaire en acier. Cette structure permet d'attacher simplement et efficacement les sièges à la structure de l'autobus tout en laissant suffisamment d'espace entre eux et le plancher pour permettre un nettoyage facile de l'autobus à la fin de la journée. Même en considérant tous les tubes d'acier utilisés dans un autobus pour attacher les sièges, leur masse totale serait encore très faible et les remplacer par des composites n'apporterait donc qu'un allègement très marginal. L'utilisation des composites au niveau des sièges nous semble donc, à priori, bien maîtrisée et maximisée par les fabricants d'autobus.

### **3.8 ENSEMBLE DES COMPOSANTES NON MÉCANIQUES**

Les composantes non mécaniques énumérées ci-dessus susceptibles de bénéficier de l'utilisation des composites représentent une masse totale approximative de 3 200 à 3 400 kg, soit 30 p. cent d'un autobus total. Il est donc important de remarquer que, peu importe l'efficacité des solutions composites apportées, l'impact



sur le poids total d'un autobus sera toujours assez faible puisque le potentiel de réduction est, au départ, faible<sup>2</sup>. Ainsi, en considérant une réduction de masse de l'ensemble de ces composantes de 50 p. cent, ce qui est déjà très optimiste si l'on désire se limiter, pour des raisons évidentes de coûts, à l'utilisation de composites non aérospatiaux, il n'en résulterait qu'une réduction effective de 15 p. cent de la masse de l'autobus. De ce fait, il est clair que d'autres avantages, comme la résistance à la corrosion, doivent être combinés à la légèreté des composites pour inciter les fabricants à les utiliser. Ce même raisonnement nous amène également à conclure qu'une **réduction notable de la masse ne peut être atteinte que dans le cas où les composites sont utilisés au maximum et à tous les niveaux**. Les concepts présentés dans la partie 4 sont développés en suivant ce raisonnement.

---

<sup>2</sup> On ne tient pas ici compte de la réduction possible du poids des composantes mécaniques (essieux, système de freinage, etc.) résultant de la diminution de poids de l'autobus.



[page blanche]

#### 4. CONCEPTS PRÉLIMINAIRES POUR L'UTILISATION DES COMPOSITES

Les composites peuvent se révéler des matériaux très avantageux pour la fabrication d'autobus urbains, entre autres de par la grande liberté qu'ils laissent au niveau du design (aspect esthétique), de leur résistance à la corrosion, de leur légèreté et des possibilités de réduction des temps d'assemblage suite à l'intégration de plusieurs fonctions dans une même pièce.

Quatre concepts composites sont ici développés pour fins de comparaison des masses et des coûts de fabrication. Les concepts sont développés autour d'un autobus urbain typique, mais fictif. Cette approche est nécessaire pour, d'une part, éviter de travailler avec un modèle d'un seul fabricant et, d'autre part, pour ramener tous les concepts à une même base de comparaison pour que l'on puisse en évaluer correctement la valeur et l'intérêt.

En effet, les masses des autobus de référence sont évaluées en additionnant celles des matériaux et des composantes principales. Les masses des matériaux sont évaluées en considérant les surfaces, les épaisseurs et les densités de chacun d'entre eux. Des masses typiques sont allouées aux composantes principales en se basant sur des informations publiées ou transmises verbalement par des personnes contactées lors de l'enquête sur l'utilisation des composites par les fabricants d'autobus. D'autres éléments, comme la boulonnerie/visserie, la quincaillerie (loquets, charnières, etc, le filage électrique, le chauffage et la ventilation, etc., ne sont cependant que grossièrement pris en compte, ou même parfois ignorés, dans les analyses, ce qui conduit à des véhicules ayant des masses globalement sous-estimées de 15 p. cent environ par rapport à la réalité (10 500 kg versus 12 500 kg respectivement pour les autobus de référence et pour un autobus urbain actuel). Mais au-delà de cette légèreté apparente, l'approche retenue nous ramène à un autobus ayant une masse totale du bon ordre de grandeur par rapport à la réalité et permet une évolution facile vers de nouveaux concepts puisque les surfaces des différents éléments et les poids des composantes mécaniques principales sont connues avec précision. Et comme ces surfaces et ces poids ne changent pas d'un concept à l'autre, les comparaisons se font toujours sur une base commune.

Deux pistes possibles sont explorées : une première où l'on définit un autobus de référence avec châssis d'acier et une deuxième où l'autobus de référence est plutôt de structure tubulaire (sans châssis) et avec une fenestration importante. **Ces deux pistes nous permettent d'explorer toutes les principales options de réduction de poids des autobus par l'utilisation des composites.** Les concepts sont



représentatifs des principales options possibles. Les solutions composites sont développées et évaluées par comparaison des propriétés spécifiques des composites envisagés par rapport à l'acier. Tous les concepts présentés dans ce rapport ainsi que les analyses qui en découlent sont préliminaires et devraient être confirmés par des travaux d'ingénierie plus approfondis. Par choix et pour des raisons de coûts inhérents aux matériaux mêmes, cette étude ne considère que des matériaux non aérospatiaux.

Les coûts sont évalués en fonction de matériaux génériques et avec les prix du marché en vigueur au moment de cette étude. Les coûts ne sont donc donnés qu'à titre comparatif et ils pourraient varier en fonction des matériaux particuliers choisis lors des études plus approfondies.

Les coûts de fabrication sont évalués en fonction d'un salaire horaire *travailleurs* typique de 16,50 \$/h. Un facteur d'efficacité moyenne de 65 p. cent sur 8 h est appliqué aux heures évaluées pour tenir compte des pauses et des temps morts aux postes de travail. La main-d'œuvre indirecte est évaluée sur la base d'un ratio cadre/travailleur de 1 : 2,5, typique pour ce genre d'industrie. Enfin, des bénéfices marginaux de 25 p. cent sont appliqués aux salaires et le coût de fabrication inclut des frais généraux de 20 p. cent et une marge brute de 30 p. cent, données typiques, encore une fois, pour ce genre d'industrie. Comme première approximation, et pour simplifier les analyses, il est considéré que cette même structure de prix s'applique au mouleur de pièces composites. Le transport des pièces entre le mouleur et le fabricant d'autobus est négligé dans les analyses. Comme il est très difficile d'évaluer le coût des outillages à ce stade préliminaire, et ce tant pour le travail des métaux que pour la mise en forme des composites, ils ont également été négligés dans les analyses.

Les coûts matériaux reposent sur des quantités réalistes et comparables pour tous les concepts (autobus de référence) et sont donc peu sujet à amener des erreurs qui pourraient affecter les conclusions de l'analyse économique. Les temps de fabrication des pièces composites chez le mouleur et d'assemblage de ces dernières (et de certaines autres composantes) chez le fabricant d'autobus sont cependant plus difficiles à évaluer compte tenu de la nature préliminaire des concepts développés dans cette étude. Pour cette raison, des analyses de sensibilité ont été réalisées afin d'apprécier l'effet de la précision des évaluations des temps de fabrication sur le coût total d'un autobus. Comme nous le verrons, une variation de 25 p. cent des temps évalués se traduit par une variation du coût total de fabrication d'un autobus de moins de 1,5 p. cent. L'approche retenue pour cette étude permet donc de tirer des conclusions justes, si l'on considère les ordres de grandeur et non pas uniquement les valeurs absolues.

L'analyse économique se limite à comparer les coûts de fabrication. En effet, chiffrer le bénéfice apporté par une résistance accrue à la corrosion sur l'entretien d'un autobus durant sa vie totale ou mesurer l'impact sur les ventes (et donc les profits du fabricant) de formes plus fluides ou avant-gardistes s'avère être un exercice qui dépasse le cadre de la présente étude. Un tel exercice pourrait cependant être réalisé par des firmes plus spécialisées au terme de travaux d'ingénierie plus approfondis où toutes les données de poids, de design et de coût de fabrication seraient connues avec une plus grande précision.

## **4.1 AUTOBUS AVEC CHÂSSIS**

### **4.1.1 Autobus de référence**

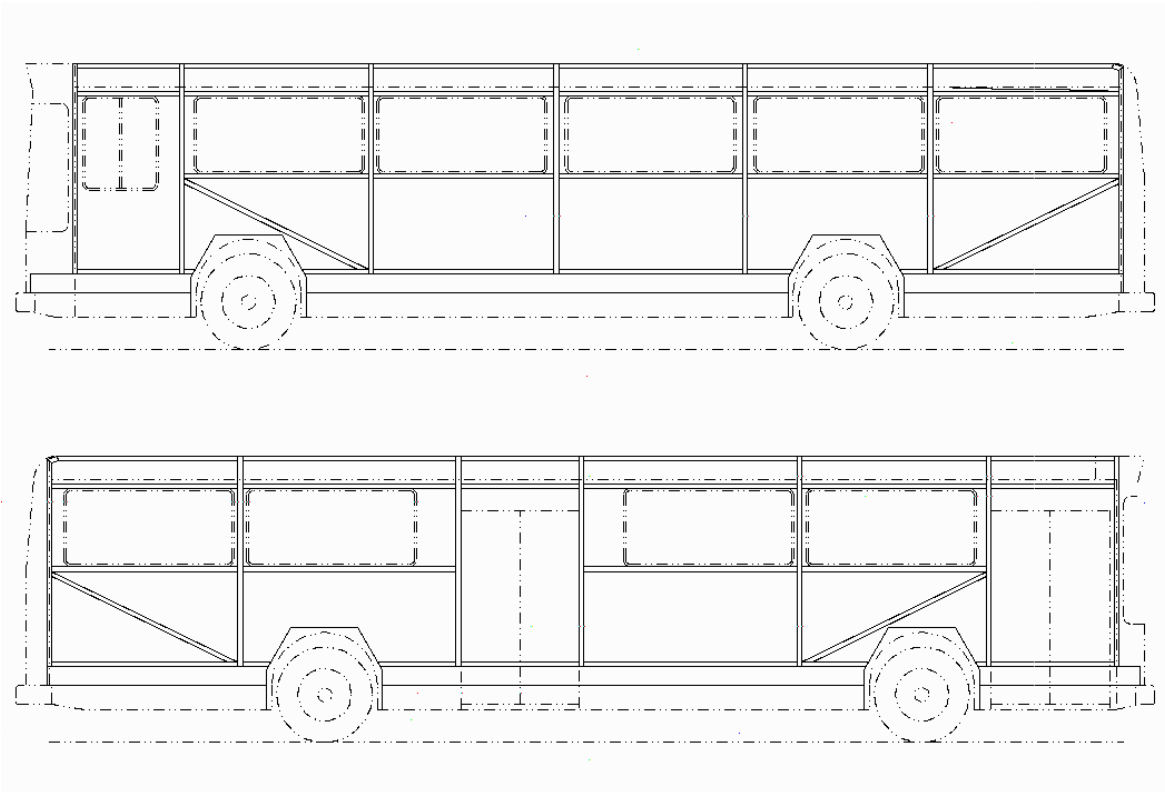
Afin de mieux comparer les différents concepts et pour éviter les pièges des particularités de construction de chaque fabricant, nous avons choisi de définir un autobus fictif, mais représentatif d'une approche de fabrication encore largement suivie dans le domaine de la fabrication des véhicules, entre autres utilitaires (autobus scolaires, camions de livraison, etc.) : une carrosserie montée sur un châssis (figure 3). Même si ce genre de véhicule ne correspond plus maintenant à ce que les grands fabricants d'autobus urbains font, il n'en demeure pas moins, comme nous le verrons ci-dessous, que cette approche peut tout de même être intéressante au regard des objectifs de réduction de poids poursuivis par cette étude. Elle permet également de dégager les tendances de chaque solution proposée au niveau des coûts de fabrication.

Dans cette construction le châssis d'acier (plate-forme de départ) est surmonté d'une ossature d'acier à laquelle on ajoute un revêtement en tôle d'acier rivetée. Le plancher est en contreplaqué  $\frac{3}{4}$  po (19 mm) placé directement sur le châssis et recouvert d'un couvre-sol. L'habillage intérieur est classique : bancs, mains courantes, poste de conduite, etc., et les éléments mécaniques sont standards : moteur diesel, essieux simples, roues simples à l'avant, doubles à l'arrière. Les caractéristiques générales de cet autobus de référence sont les suivantes :

- longueur : 12,2 m (40 pi)
- largeur : 2,6 m (102 po)
- empattement : 6,5 m (256 po)
- voie avant : 2,2 m (86 po)
- voie arrière : 1,9 m (76  $\frac{1}{2}$  po)



- garde au sol : 355 mm (14 po)
- hauteur hors tout : 3,1 m (121 ½ po)
- portes : 1,3 m (50 po) × 2,1 m (84 po)
- fenêtres : 840 mm (33 po) × 1,8 m (72 po)



**Figure 3 :** Concept d'autobus avec châssis d'acier

Sur cette base et en recoupant les informations publiées et/ou transmises verbalement par les personnes contactées dans le cadre de la présente étude quant à la ventilation des masses des composantes majeures et des coûts typiques, l'autobus de référence pèse, en état de marche, mais sans passager, 10 500 kg (23 100 lb) et son coût de fabrication est évalué à 152 400 \$. Une analyse simplifiée, en utilisant un ratio main-d'œuvre totale : matériaux de 15 p. cent : 85 p. cent, typique pour ce genre d'industrie, nous donne un coût de fabrication comparable de 150 000 \$ environ, ce qui vient appuyer la valeur de l'approche d'évaluation retenue. La ventilation des masses et des coûts est présentée à l'annexe C.

Les éléments de coût suivants sont considérés :

- tôle d'acier : 0,85 \$/kg
- acier de charpente : 0,75 \$/kg
- revêtement intérieur : 3,25 \$/kg
- isolation : 9,17 \$/kg
- contreplaqué marin ¾ po : 3,61 \$/kg

Les éléments apparaissant en italiques (fenêtres, habillage intérieur et mécanique) dans l'analyse des coûts de l'annexe C sont approximatifs, mais les ordres de grandeur sont adéquats pour un autobus du même type que notre référence.

#### **4.1.2 Concept 1 : Habillage d'une ossature portante en acier par des panneaux composites – autobus sur châssis d'acier**

Ce premier concept est le plus direct et le plus facilement mis en œuvre sans grande modification des installations de production. De plus, le fabricant d'autobus n'a pas besoin de connaître les composites car les panneaux sont achetés d'un mouleur déjà établi et livrés à l'usine prêts pour l'assemblage. Ici, le revêtement extérieur (tôle d'acier) est remplacé par un revêtement en composite. Ce concept rejoint l'approche déjà utilisée par le fabricant Prévost Car pour son autobus interurbain et Nova Bus pour son autobus à plancher bas. Les panneaux ne sont pas structuraux. Un châssis d'acier standard est ici utilisé comme plate-forme de départ. Ce concept est aussi directement applicable à un autobus sans châssis et structure tubulaire autoportante comme le LFS de Nova Bus. Il sera d'ailleurs repris un peu plus loin dans ce rapport pour les autobus sans châssis.

Les peaux composites peuvent être collées sur la structure ou fixées à l'aide d'attaches mécaniques. Dans ce dernier cas, des inserts métalliques filetés seraient intégrés au composite lors du moulage (goujons) pour éviter d'avoir des attaches visibles. Un feutre ou une garniture de caoutchouc placé entre la peau et la structure éviterait les grincements de l'assemblage. Un scellant serait utilisé au niveau des joints entre les panneaux pour assurer l'étanchéité parfaite de la caisse.

##### **4.1.2.1 Concept 1-A : Ossature d'acier**

###### **4.1.2.1.1 Avantages/Désavantages**

Les avantages et désavantages présentés au tableau 2 sont identifiés pour ce concept :



**Tableau 2 :** Avantages et désavantages du concept 1-A

AVANTAGES	DÉSAVANTAGES
rapidité de mise en œuvre	méthode d'assemblage des panneaux composites différente du revêtement d'acier : collage
peu ou pas de modification à la chaîne de montage	légèrement plus coûteux à l'achat que la solution tout acier de référence
résistance à la corrosion améliorée : élimination du revêtement métallique	
esthétique amélioré : pas de rivet visible, possibilité de formes fluides	
traînée aérodynamique réduite : pas de rivets en surface, formes fluides	
résistance aux impacts localisés (bosses)	
remplacement facile des panneaux	
réparation facile des panneaux	
réduction de poids	
panneaux livrés à l'usine prêts pour l'assemblage et le fabricant d'autobus n'a pas à connaître la technologie des composites	

Notes :

1. La résistance à la corrosion du véhicule est améliorée à cause de la résistance du panneau composite lui-même, mais aussi parce que la structure métallique sous-jacente jouit d'une meilleure protection en raison d'une meilleure étanchéité du revêtement extérieur (nombre réduit de joints, peu ou pas de rivets, etc Cet



élément peut à lui seul justifier un coût d'acquisition plus élevé parce qu'il augmente sensiblement la longévité du véhicule.

2. L'assemblage des panneaux ne pose pas de problèmes insurmontables, mais demeure sensible à la qualité de la main-d'œuvre et aux méthodes de préparation des surfaces pour le collage.
3. La liberté au niveau des formes que permettent les composites est particulièrement intéressante pour les faces avant et arrière.
4. La traînée aérodynamique réduite est un avantage certes intéressant, mais peu significatif pour un autobus urbain en raison des vitesses de circulation assez faibles. Cette caractéristique devient surtout avantageuse pour les autobus interurbains.

#### **4.1.2.1.2 Matériaux possibles**

La fibre de verre E, soit le grade standard, est généralement utilisée pour ce genre d'application étant donné son rapport coût/performance et sa grande diffusion dans l'industrie. La fibre de renfort peut se retrouver sous différentes formes en fonction des procédés retenus pour la fabrication : mats à fils coupés, mats à filaments continus, mats cousus, tissus bidirectionnels, tissus multidirectionnels, mèche de filaments continus. De la même façon, une résine thermodurcissable polyester serait probablement utilisée en raison de son bon rapport coût/performance et de sa facilité d'utilisation. Les résines polyesters sont cependant quelque peu fragiles et une résine présentant un allongement à la rupture un peu plus élevé serait peut-être souhaitable pour certaines pièces particulièrement exposées aux impacts comme celles de la face avant et du bas de caisse. Dans ce cas, une résine de la famille des vinylesters serait plus appropriée. Des charges ignifugeantes (hydroxyde d'aluminium, par exemple) peuvent être ajoutées aux résines pour améliorer leur résistance au feu. Des formulations de résines spéciales peuvent également être envisagées en regard de cette problématique. Afin d'améliorer le fini de surface et la résistance aux éléments auxquels sont exposés les panneaux composites dans ce genre d'application (soleil, eau, sel, produits pétroliers divers), un gelcoat polyester ou une peinture polyuréthane devrait recouvrir les pièces.

#### **4.1.2.1.3 Procédés possibles**

Plusieurs procédés sont possibles et sont d'ailleurs déjà bien maîtrisés par les différents mouleurs :

- moulage par projection simultanée;



- moulage au contact;
- moulage par injection de résine.

### Moulage par projection simultanée

Le moulage par projection simultanée est particulièrement bien adapté à la fabrication de grandes pièces peu sollicitées au niveau mécanique. Ce procédé utilise un moule ouvert peu dispendieux dans lequel des fibres de verre courtes sont projetées simultanément avec une quantité appropriée de résine à l'aide d'un pistolet de projection. Un débullage, opéré par des travailleurs, est requis pour bien compacter le matériau avant le gel de la résine et s'assurer qu'il n'y a pas de bulles d'air qui affecteraient à la fois le fini de surface et les propriétés du stratifié ainsi obtenu. Le contrôle des épaisseurs est assez difficile et les pièces produites avec ce procédé pourraient nécessiter certains ajustements lors de l'assemblage au véhicule. Des conformateurs peuvent cependant être utilisés pour contrôler localement l'épaisseur du stratifié.

Ce procédé permet de fabriquer des pièces à un prix très compétitif, vu le prix des matières premières utilisées et son haut rendement au niveau de la déposition des matériaux (kg/h). Le rendement et le coût de production peuvent encore être améliorés en robotisant le procédé, mais le volume de production doit justifier un tel choix. La projection pose cependant de plus en plus de problèmes au niveau environnemental à cause des émissions de styrène. Une variante de ce procédé, la projection simultanée en chambre sous vide, permet de résoudre en partie ce problème et élimine en grande partie les besoins de débullage. Peu de mouleurs possède cependant cette technologie.

### Moulage au contact

Le moulage au contact utilise également un moule ouvert peu dispendieux, mais contrairement à la projection simultanée, les renforts sont déposés manuellement dans le moule sous forme de tissu et de mat. C'est donc un procédé plus lent et nécessitant un apport en main-d'œuvre plus important que le précédent. Il permet cependant d'orienter les fibres en fonction des efforts agissant sur la pièce, ce qui améliore les performances mécaniques. Seules quelques pièces pourraient nécessiter l'orientation des fibres au moment de la fabrication. Comme auparavant, le contrôle des épaisseurs est difficile, mais la situation peut être améliorée par l'utilisation de conformateurs. Ce procédé souffre des mêmes problèmes au niveau environnemental que la projection simultanée.

### Moulage par injection de résine

Le moulage par injection de résine, mieux connu sous son acronyme anglais RTM (*Resin Transfer Molding*), nécessite l'emploi d'un moule en deux parties (moule et contre-moule) rigide et solide. La fabrication de grandes pièces est possible et grandement facilitée si elles sont simples et relativement plates. Ce procédé permet de fabriquer des pièces en général de meilleure qualité que les procédés précédents (teneur en fibres constante, peu de porosité, épaisseur constante, beau fini de surface sur les deux côtés de la pièce), mais les moules et la forme des renforts utilisés sont plus chers. Le coût des moules doit être amorti sur un grand nombre de pièces pour que ce procédé soit intéressant d'un point de vue économique, mais son choix ne devient pleinement justifiable que si tous les avantages reliés à ce procédé sont exploités. Seules quelques pièces pourraient bénéficier des avantages offerts par ce procédé : panneaux d'accès et habillage des fenêtres par exemple. Ce procédé a cependant l'avantage de fonctionner à moules fermés et, de par les émissions de styrène réduites qui en découlent, demeure donc très intéressant d'un point de vue environnemental et santé et sécurité au travail.

Des variantes au procédé RTM peuvent être envisagées pour réduire les coûts, soit le procédé RTM assisté par le vide où les moules peuvent être moins robustes et donc moins chers, ou encore l'infusion de résine où le contre-moule peut être remplacé par une membrane flexible, jetable ou non.

#### **4.1.2.1.4 Modes d'assemblage courants**

Comme tous les efforts externes sont repris par l'ossature métallique, les panneaux d'habillage ne sont pas trop sollicités et plusieurs modes d'assemblage sont possibles : collage, rivetage, boulonnage. Le collage permet d'obtenir un assemblage de grande qualité et sans attache visible, mais il a un caractère permanent. La préparation des surfaces de collage est également critique et peut être difficile à réaliser dans un environnement industriel où les travailleurs sont peu sensibilisés à ce problème. L'assemblage à l'aide d'attaches mécaniques permet un démontage plus ou moins facile des panneaux, mais les zones percées doivent habituellement être renforcées. Des inserts métalliques du type goujon peuvent être intégrés directement au composite et éviter ces problèmes reliés à la présence de trous. De plus, ils permettent une fixation «invisible», ce qui est intéressant pour les panneaux exposés au regard des passants.

#### **4.1.2.2 Concept 1-B : Ossature d'acier inoxydable**

Ce concept est une variante du précédent. Ici, l'ossature d'acier est remplacée par une en acier inoxydable dans le but d'augmenter la durée de vie. Les mêmes



avantages et inconvénients que le concept précédent peuvent être répétés ici et la même approche composite est utilisée. L'acier inoxydable du type AISI 409 est souvent utilisé pour ces applications structurales. Le module et la résistance de l'acier de structure et de cet acier inoxydable sont, à toutes fins utiles, identiques, et un peu d'optimisation, combiné à l'achat de cette matière première en grande quantité, permettent habituellement aux fabricants d'offrir des autobus au même poids et même prix qu'un autobus en acier.

#### 4.1.2.3 Concept 1-C : Ossature en profilés composites pultrudés

Ce concept est également une variante du premier. Ici, l'ossature d'acier est remplacée par une structure faite de profilés composites pultrudés. Comme dans le cas du concept 1-B, l'objectif est d'éviter la corrosion de la structure de la caisse et d'augmenter la longévité du véhicule.

Les profilés seraient fabriqués par pultrusion de fibres de verre et de résine polyester ou vinylester. Ils sont achetés directement d'un fabricant de profilés composites. Les profilés seraient assemblés entre eux par collage et emmanchement au niveau des joints. Au besoin, des attaches mécaniques pourraient être utilisées.

Sur la base des propriétés spécifiques des matériaux, une ossature en profilés pultrudés ayant des propriétés (résistance et rigidité) équivalentes à celle de départ en acier de charpente aurait une masse de :

Résistance :

$$M_{\text{pultrusion}} = \frac{S_{y, \text{acier}}}{\rho_{\text{acier}}} \times \frac{\rho_{\text{pultrusion}}}{S_{y, \text{pultrusion}}} M_{\text{acier}} \quad (1)$$

Rigidité :

$$M_{\text{pultrusion}} = \frac{E_{\text{acier}}}{\rho_{\text{acier}}} \times \frac{\rho_{\text{pultrusion}}}{E_{\text{pultrusion}}} M_{\text{acier}} \quad (2)$$

La notation conventionnelle est utilisée dans les deux équations ci-dessus, soit :

M = masse

S<sub>y</sub> = limite élastique

E = module d'élasticité

ρ = densité du matériau

La masse la plus grande entre la résistance équivalente ou la rigidité équivalente est utilisée dans les calculs. Il est à noter que les profilés pultrudés, comme les composites en général, n'ont pas de limite élastique à proprement parlé. Ces matériaux ont, en effet, un comportement linéaire élastique jusqu'à la rupture, ou presque, et l'on utilise plutôt, dans l'équation 1, la limite de rupture.

#### 4.1.2.4 Comparaison des coûts

Pour fins de comparaison des concepts, les éléments de coût suivants sont considérés :

- fibre de verre E (mèches pour projection) : 3 \$/kg
- résine polyester : 3,50 \$/kg
- gelcoat : 5 \$/kg
- profilés pultrudés verre/polyester : 1,13 \$/kg
- taux de déposition verre/résine (projection) : 10 kg/min
- application du gelcoat : 1 min/m<sup>2</sup> (temps standard d'atelier)
- débullage : 3 min/m<sup>2</sup> (temps standard d'atelier)

Les coûts liés aux attaches (rivets, boulons ou colle) sont négligés dans cette analyse. Les autres hypothèses posées pour l'analyse se retrouvent en annexe.

Les coûts liés aux panneaux composites sont évalués sur la base d'un stratifié de 4 mm d'épaisseur ayant une teneur en verre de 35 p. cent massique et fabriqué par projection simultanée. Le prix des moules, des matrices de formage et des gabarits d'assemblage ne sont pas considérés dans les analyses. Les moules représentent un coût récurrent puisqu'ils doivent être remplacés au bout d'un certains temps.



Les détails de l'analyse se retrouvent à l'annexe D. Le tableau 3 résume les principales conclusions de cette analyse comparative :

**Tableau 3** : Comparaison des concepts «châssis d'acier avec carrosserie à ossature portante» à l'autobus de référence

	variation masse (%)	variation coût de production (%)
référence acier	10 500 kg	152 400 \$
composite-acier ou acier inoxydable (concepts 1-A et 1-B)	- 1,9 %	+ 1,3 %
composite-profilés pultrudés (concept 1-C)	+ 23,2 %	+ 5,8 %

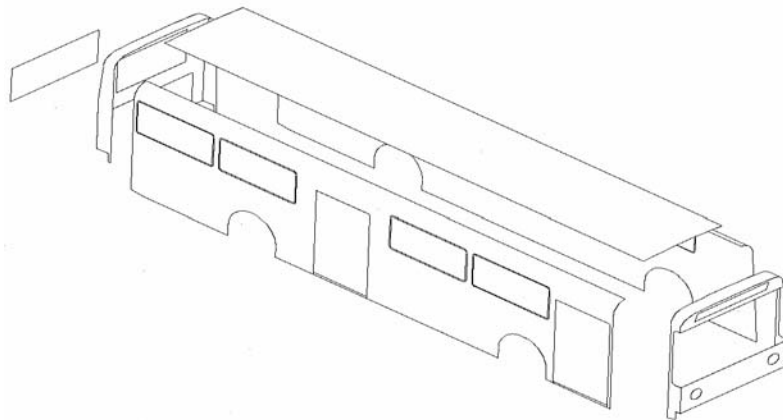
Une variation de 25 p. cent sur les temps de fabrication et d'assemblage se traduit ici par une variation de l'ordre de 0,25 p. cent sur le coût total d'un autobus.

#### 4.1.3 Concept 2 : Caisse en panneaux sandwichs structuraux

Ici, l'ossature et le revêtement d'acier sont remplacés par des panneaux sandwichs structuraux. Ces derniers sont fixés au châssis d'acier standard qui sert de plateforme de départ. **Ce concept n'est donc applicable qu'à un autobus avec châssis porteur.** Les panneaux devraient être aussi grands que possible afin de diminuer le temps d'assemblage et favoriser l'intégrité structurale de la caisse, mais il serait tout de même possible de réaliser de bons joints structuraux si une solution incorporant plusieurs petits panneaux était retenue. Cette approche a déjà été utilisée par Breda pour un autobus urbain et par Bombardier/MBB pour le monorail de Walt Disney. En poussant ce concept à l'extrême, la caisse devient monocoque. La compagnie TPI a utilisé cette approche pour l'autobus Genesis. Les deux variantes de ce concept panneaux sandwichs sont développées ci-dessous et évaluées sur la base de notre autobus de référence.

#### 4.1.3.1 Concept 2-A : Assemblage de panneaux

Dans le concept 2-A, la caisse de l'autobus est constituée de cinq pièces principales, soit le toit, les deux parois latérales, la face avant et le bout arrière (figure 4). Des profilés d'aluminium seraient utilisés comme éléments de bordure à la périphérie des panneaux pour faciliter l'assemblage et pour assurer l'intégrité structurale du sandwich (transmission des efforts d'une peau à l'autre et cisaillement dans le matériau d'âme). Pour des fenêtres fixes, les peaux du sandwich pourraient être soudées ensemble, comme illustré au détail D du dessin 2452-DD-004 en annexe. Des fenêtres coulissantes plus traditionnelles demanderaient cependant une bordure formée d'un profilé d'aluminium. Les panneaux seraient assemblés entre eux à l'aide de rivets industriels ou de boulons et d'adhésif. En plus d'augmenter la résistance du joint, ce dernier assure l'étanchéité de la caisse. La caisse serait fixée au châssis d'acier par l'entremise d'un profilé d'aluminium. Afin d'éviter les problèmes de corrosion galvanique entre l'acier et l'aluminium, un isolant électrique (film plastique, traitement peinture ou autre) devrait être utilisé à ce niveau. La caisse serait maintenue en place par rivetage ou boulonnage. Un cache pourrait être installé pour améliorer l'apparence. Un noyau dur (bois, extrusion d'aluminium ou mousse dense) serait placé dans le sandwich pour éviter l'écrasement du panneau lors du serrage. Il faut noter qu'un cache pourrait également être installé au niveau des joints de la face avant et du bout arrière pour améliorer l'apparence visuelle.



**Figure 4** : Autobus concept 2-A

##### 4.1.3.1.1 Avantages/Désavantages

Les avantages et désavantages présentés au tableau 4 sont identifiés pour ce concept :

**Tableau 4** : Avantages et désavantages du concept 2-A

AVANTAGES	DÉSAVANTAGES
résistance à la corrosion améliorée : élimination de l'ossature et du revêtement métalliques	assemblage des panneaux critiques : collage et/ou boulonnage
isolation thermique et acoustique intégrée à la structure	technologie peu éprouvée et risque technologique plus élevé, surtout s'il y a beaucoup de joints
traînée aérodynamique réduite : peu ou pas de rivets en surface, formes fluides	apport en main-d'œuvre important pour la fabrication des panneaux sandwichs
esthétique améliorée : peu ou pas de rivets visibles, formes fluides	problèmes structuraux ou d'apparence possibles pour de grands panneaux en cas de gradient thermique important entre les deux faces
possibilité d'intégrer la finition intérieure aux panneaux structuraux lors du moulage	coefficients de dilatation thermique sandwich/châssis d'acier différents : problème d'assemblage possible
diminution du temps d'assemblage par la diminution du nombre de composantes et de sous-ensembles et, en corollaire, simplification de la chaîne de montage	les panneaux sandwichs demandent de grands arrondis : esthétique de l'autobus pourrait être affectée
le fabricant d'autobus reçoit des panneaux préfabriqués et n'a pas à connaître la technologie des composites	
réduction de poids	

#### 4.1.3.1.2 Matériaux possibles

##### Renforts

Comme auparavant, la fibre de verre E, soit le grade standard, serait utilisée pour ce genre d'application étant donné son rapport coût/performance et sa grande diffusion dans l'industrie. La fibre de renfort peut se retrouver sous différentes formes en fonction des procédés retenus pour la fabrication : mats à fils coupés, mats à



filaments continus, mats cousus, tissus bidirectionnels, tissus multidirectionnels, mèche de filaments continus.

### Résines

Une résine thermodurcissable polyester serait utilisée en raison de son bon rapport coût/performance et de sa facilité d'utilisation. Les résines polyesters sont cependant quelque peu fragiles et une résine présentant un allongement à la rupture un peu plus élevé serait peut-être souhaitable pour certaines pièces particulièrement exposées aux impacts comme celles de la face avant et du bas de caisse. Dans ce cas, une résine de la famille des vinylesters serait plus appropriée. Les résines vinylesters présentent également des propriétés mécaniques supérieures aux polyesters et pourraient être utilisées pour tous les panneaux si le niveau de sollicitation est important. Des résines époxydes pourraient être considérées pour cette même raison. Des charges ignifugeantes (hydroxyde d'aluminium, par exemple) peuvent être ajoutées aux résines pour améliorer leur résistance au feu. Des formulations de résines spéciales peuvent également être envisagées en regard de cette problématique. Afin d'améliorer le fini de surface et la résistance aux éléments auxquels sont exposés les panneaux composites dans ce genre d'application (soleil, eau, sel, produits pétroliers divers), un gelcoat polyester devrait recouvrir les pièces. Une couche de peinture polyuréthane pourrait également faire l'affaire.

### Matériau d'âme

Le matériau d'âme du sandwich sert à éloigner les peaux, en composites dans notre cas, afin d'augmenter le moment d'inertie de la structure et reprend l'essentiel des efforts de cisaillement. Le plus souvent, le matériau d'âme est constitué d'une mousse structurale, de bois de balsa ou d'une structure alvéolaire type nid d'abeilles.

Les éléments suivants doivent être considérés lors de la sélection du matériau d'âme :

- conformabilité (possibilité d'épouser des formes complexes);
- résistance au feu requise ou non;
- résistance en compression;
- résistance en cisaillement;
- coût.



Bien que les choix définitifs ne pourront être confirmés qu'après des études approfondies, les matériaux suivants sont proposés puisqu'ils sont déjà utilisés sur une grande échelle dans des applications structurales telles que les coques et les ponts de bateaux:

- mousse PVC;
- bois de balsa;
- nid d'abeilles polypropylène.

Le nid d'abeilles en polypropylène présente un risque technologique plus élevé, car il s'agit d'un matériau relativement nouveau et sans historique au niveau des applications. Le potentiel de réduction de masse est cependant plus élevé qu'avec les matériaux traditionnels.

Les ouvertures pratiquées dans les parois pour les fenêtres laissent peu de matériel pour reprendre les efforts, entre autres de compression et de cisaillement. Pour cette raison, le sandwich pourrait contenir certains éléments métalliques (ou profilés pultrudés) qui serviraient à reprendre ces efforts.

#### **4.1.3.1.3 Procédés possibles**

Vu la dimension prévue des panneaux, des procédés en moules ouverts sont retenus pour garder les coûts d'outillage bas. Le moulage contact, tel que décrit précédemment, combiné ou non avec la projection simultanée, représente probablement le meilleur choix possible en considérant la rapidité et la facilité de mise en œuvre de cette solution. Ici, les renforts et la résine seraient déposés dans le moule et bien débullés pour obtenir un stratifié bien compacté. Après polymérisation de la résine, le matériau d'âme serait collé en place à l'aide d'une colle appropriée. La deuxième peau serait enfin bâtie directement sur le matériau d'âme en y déposant les fibres et la résine. Comme auparavant, cette solution pose certains problèmes au niveau environnemental. L'infusion de résine, qui utilise une membrane flexible comme contre-moule, permet de résoudre en grande partie ces problèmes.

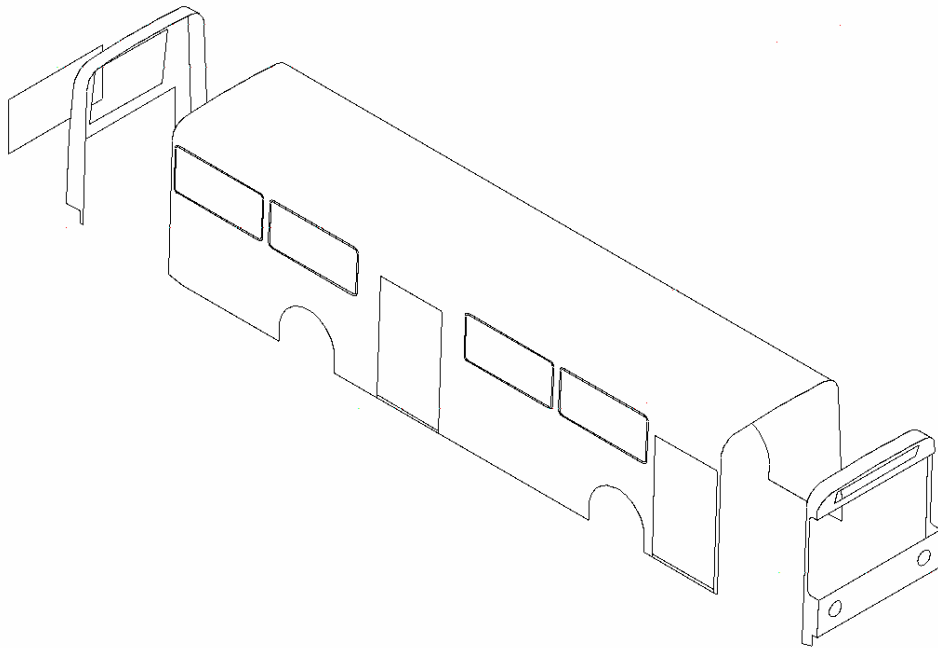
#### **4.1.3.1.4 Modes d'assemblage courants**

Les panneaux sandwichs sont assemblés de façon à former la caisse de l'autobus. L'essentiel des efforts de flexion est repris par le châssis d'acier standard. La caisse n'a donc plus qu'à supporter les efforts de torsion et la charge de renversement du véhicule. Comme les efforts doivent être transmis au châssis d'acier, les joints caisse-châssis doivent être robustes.

Les panneaux seraient assemblés par une combinaison de collage et d'attaches mécaniques (rivets, boulons ou autres).

#### 4.1.3.1.5 Concept 2-B : Caisse sandwich monocoque

Ce concept est une extension du précédent. L'ossature et le revêtement d'acier du véhicule de référence sont remplacés par une caisse en panneaux sandwich structuraux (figure 5). Contrairement au concept 2-A cependant, le corps central de la caisse n'est plus fabriqué d'un assemblage de panneaux : il est fabriqué directement dans le moule d'une seule pièce. Pour des raisons de simplicité et d'efficacité, la face avant et le bout arrière sont fabriqués dans des moules séparés. Cette caisse est déposée sur le châssis d'acier standard qui sert de plate-forme de départ.



**Figure 5** : Autobus concept 2-B

#### **4.1.3.1.6 Avantages/Désavantages**

Les avantages et désavantages reliés à ce concept sont essentiellement les mêmes que le précédent, mais la réduction du temps d'assemblage est encore plus marquée.

#### **4.1.3.1.7 Matériaux possibles**

Les mêmes matériaux que ceux proposés pour le concept 2-A pourraient être utilisés.

#### **4.1.3.1.8 Procédés possibles**

Comme auparavant, le moulage contact serait recommandé sur la base de sa simplicité et sa rapidité de mise en œuvre, mais la dimension de la caisse et les problèmes reliés aux émissions de styrène rendent le procédé d'infusion particulièrement intéressant à plus long terme.

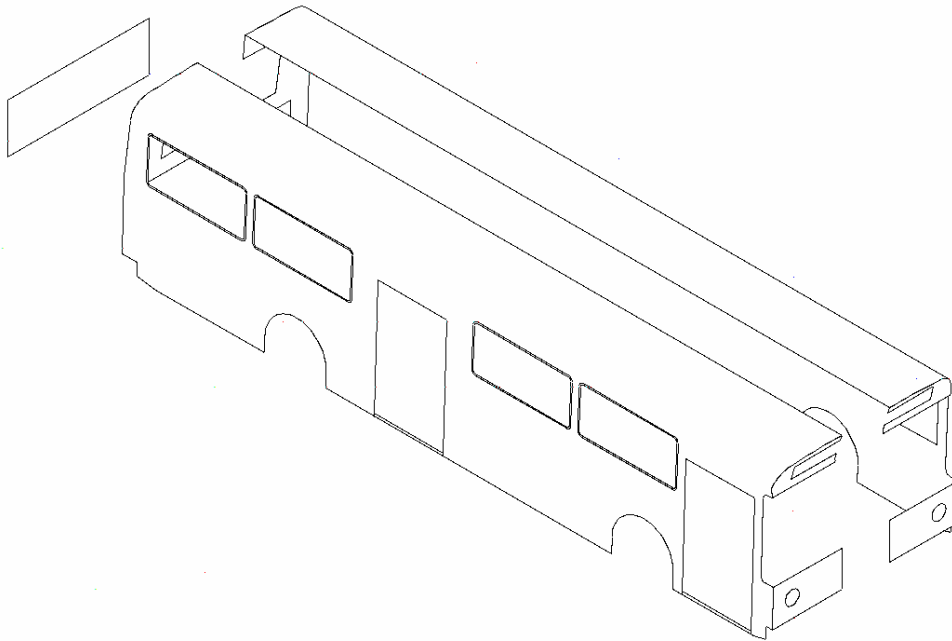
Nous retrouvons plusieurs variantes du procédé d'infusion dans l'industrie. L'infusion de résine est utilisée par plusieurs mouleurs pour fabriquer des bateaux, souvent très grands (10 m et plus). Le groupe Dupont/Hardcore a fabriqué un wagon de marchandises complet en composite par ce procédé. L'autobus ATTB de Northrop-Grumman a également été fabriqué avec ce procédé. Ces quelques exemples montrent donc que cette technologie permet de fabriquer de grandes structures et il est donc tout à fait envisageable de fabriquer une caisse complète par infusion.

#### **4.1.3.1.9 Modes d'assemblage courants**

Les mêmes techniques d'assemblage seraient utilisées avec ce concept 2-B.

#### **4.1.3.2 Concept 2-C**

L'annexe E présente un troisième concept d'assemblage qui pourrait également être considéré pour des travaux plus approfondis. Le concept 2-C décrit une caisse obtenue par l'assemblage de deux demi-coquilles avec un joint longitudinal (figure 6). Ce concept est surtout intéressant au niveau de la fabrication qui s'en trouve simplifiée par rapport au concept 2-B (moule moins profond : accès plus facile au fond du moule lors de la fabrication, moins d'accumulation de styrène, etc.). Les mêmes procédés de fabrication, matériaux et modes d'assemblages que ceux décrits pour les concepts 2-A et 2-B seraient applicables.



**Figure 6** : Autobus concept 2-C

#### 4.1.3.3 Comparaison des coûts

Pour fins de comparaison de ce concept avec l'autobus de référence, les éléments de coût suivants sont considérés :

- verre E (mèches pour projection) : 3 \$/kg
- résine polyester : 3,50 \$/kg
- mousse PVC 14 mm , 88 kg/m<sup>3</sup> : 37,99 \$/kg
- gelcoat : 5 \$/kg
- taux de déposition verre/résine (projection) : 10 kg/min
- application du gelcoat : 1 min/m<sup>2</sup> (temps standard d'atelier)
- débullage : 3 min/m<sup>2</sup> (temps standard d'atelier)
- mise en place de la mousse (adhésif, mousse, compaction) : 40 min/m<sup>2</sup> (temps standard d'atelier)

Les coûts liés aux attaches (rivets, boulons ou colle) sont négligés dans cette analyse. De même, aucun renfort métallique au niveau des fenêtres ou comme

bordure des panneaux sandwichs n'a été considéré dans les analyses. Les autres hypothèses se retrouvent en annexe.

Les coûts reliés aux panneaux composites sont évalués sur la base d'un sandwich d'épaisseur totale de 20 mm ayant des peaux composites verre/polyester de 3 mm d'épaisseur. L'épaisseur des panneaux est considérée uniforme dans les analyses. Les peaux ont une teneur en verre de 45 p. cent massique. Le moulage par projection simultanée est le procédé retenu pour la présente analyse. L'adhésif pour le collage de la mousse n'a pas été considéré dans les analyses. Le prix des moules, des matrices de formage et des gabarits d'assemblage ne sont pas considérés dans les analyses. Les moules représentent un coût récurrent puisqu'ils doivent être remplacés au bout d'un certain temps.

Les coûts reliés à l'assemblage ont été évalués en considérant :

#### Concept 2-A

- 1 panneau pour le toit;
- 1 panneau pour le bout avant;
- 1 panneau pour le bout arrière;
- 1 panneau pour le mur gauche;
- 1 panneau pour le mur droit.

Assemblage des panneaux entre eux : collage et rivetage.

#### Concept 2-B

- corps central de la caisse en un seul morceau et faces avant et arrière séparées.

Assemblage des panneaux entre eux : collage et rivetage.

Le concept 2-C n'est pas évalué spécifiquement car son coût de fabrication se retrouvera entre ceux des concepts 2-A et 2-B. Les détails de l'analyse se retrouvent à l'annexe E. Le tableau 5 résume les principales conclusions de cette analyse comparative. Une variation de 25 p. cent des temps de fabrication et d'assemblage se traduit par une variation du coût total de moins de 1 p. cent dans les deux cas.

**Tableau 5 :** Comparaison des concepts «panneaux sandwichs structuraux» à l'autobus de référence

	variation masse (%)	variation coût de production (%)
référence acier	10 500 kg	152 400 \$
assemblage de panneaux sandwichs structuraux (concept 2-A)	- 14,4 %	+ 0,3 %
caisse sandwich monocoque (concept 2-B)	- 14,4 %	-0,3 %

#### 4.1.4 Concept 3 : Assemblage de panneaux pultrudés

Dans ce troisième concept, l'ossature et le revêtement d'acier sont remplacés par des éléments pultrudés. La caisse ainsi obtenue est fixée à un châssis d'acier qui sert de plate-forme de départ. **Encore une fois, ce concept n'est valable que pour un autobus avec châssis porteur.** La face avant et le bout arrière, en raison de leur forme, seraient fabriqués en matériau sandwich. Cette approche a été utilisée par Goldsworthy/Alcoa pour un véhicule de transport de marchandises.

Pour des raisons pratiques, le tour des portes serait fabriqué d'un panneau sandwich. Des profilés d'aluminium seraient placés au-dessus et au-dessous des fenêtres pour en faciliter le montage. Les piliers entre les fenêtres seraient également faits de profilés d'aluminium. Le toit serait constitué de trois panneaux pultrudés, dont deux identiques (panneau de type II – voir les dessins en annexe). Le profilé de coin, identique pour les deux côtés, permettrait de joindre le toit aux parois latérales. Le profilé de coin pourrait être utilisé comme conduit de ventilation. Le panneau en bas des fenêtres serait constitué d'un seul profilé pultrudé, également identique pour le mur gauche et pour le mur droit afin de limiter le nombre de filières requises. La ventilation pourrait être intégrée au profilé de mur, de même que les supports de sièges. Les profilés pultrudés et d'aluminium seraient assemblés entre eux principalement par collage structural. Comme dans le cas du concept précédent, la caisse serait attachée au châssis d'acier par l'entremise d'un profilé, d'aluminium ou de composite. La caisse serait fixée à ce profilé par collage

et boulonnage ou rivetage. Comme auparavant, un cache pourrait être placé sur la ligne de boulonnage pour améliorer l'apparence visuelle. Si un profilé d'aluminium était retenu, l'assemblage devrait être isolé électriquement pour éviter les problèmes de corrosion galvanique. Comme toujours, le contreplaqué est déposé directement sur le châssis d'acier pour former le plancher.

#### 4.1.4.1 Avantages/Désavantages

Les avantages et désavantages identifiés pour ce concept sont présentés au tableau 6. Ce concept permet une réduction de poids.

#### 4.1.4.2 Matériaux possibles

##### Renforts

La fibre de verre E serait utilisée. Elle se retrouverait principalement sous forme de mèches continues pour la pultrusion et de mats et tissus pour la face avant et le bout arrière. Des mats et tissus pourraient cependant être incorporés dans les éléments pultrudés afin d'augmenter leur robustesse.

##### Résines

Des résines vinylesters, époxydes ou à base de méthacrylate de méthyl présentent le plus d'intérêt pour les profilés pultrudés. Des résines polyesters ou vinylesters seraient utilisées pour la face avant et le bout arrière. Comme auparavant, des charges ignifugeantes pourraient être ajoutées à certaines résines pour améliorer leur résistance au feu. Des formulations spéciales de résines pourraient également être considérées.

##### Matériau d'âme

Les mêmes matériaux d'âme que ceux présentés précédemment pourraient être utilisés, soit la mousse PVC, le balsa ou le nid d'abeilles polypropylène.

##### Autres

La conception détaillée pourrait nous indiquer que des extrusions d'aluminium seraient nécessaires à certains endroits pour des raisons de rigidité. La présente analyse préliminaire considère des extrusions d'aluminium au-dessus et en dessous des fenêtres ainsi que des piliers de fenêtres en aluminium.



#### **4.1.4.3 Procédés possibles**

La face avant et le bout arrière seraient fabriqués par moulage contact ou par projection. Ces procédés ont été décrits auparavant.

Les différents profilés formant la caisse seraient fabriqués par pultrusion. Ce procédé s'apparente à l'extrusion des métaux. En effet, les renforts, constitués de fibres continues, de mats ou de tissus, sont imprégnés de résine et forcés à travers une filière (moule) chauffée. La résine polymérise sous l'effet de la chaleur et le matériau garde la forme de la filière. La pultrusion est un procédé de fabrication en continu tout comme l'extrusion. Le procédé de pultrusion permet de fabriquer des profilés ayant de très bonnes propriétés mécaniques, entre autres par une orientation judicieuse des fibres et par une teneur en fibre très élevée.

#### **4.1.4.4 Modes d'assemblage courants**

L'assemblage des différents profilés pultrudés et des panneaux sandwichs (face avant et bout arrière) serait effectué par collage et rivetage.

#### **4.1.4.5 Comparaison des coûts**

Pour fins de comparaison de ce concept avec l'autobus de référence, les éléments de coût suivants sont considérés :

- fibre de verre E (mèches pour projection) : 3 \$/kg
- résine polyester : 3,50 \$/kg
- mousse PVC 14 mm, 88 kg/m<sup>3</sup> : 37,99 \$/kg
- gelcoat : 5 \$/kg
- pultrusion : 1,13 \$/kg
- extrusion d'aluminium : 5,12 \$/kg
- taux de déposition verre/résine (projection) : 10 kg/min
- application du gelcoat : 1 min/m<sup>2</sup> (temps standard d'atelier)
- débullage : 3 min/m<sup>2</sup> (temps standard d'atelier)



**Tableau 6** : Avantages et désavantages du concept 3

AVANTAGES	DÉSAVANTAGES
résistance à la corrosion améliorée : élimination de l'ossature et du revêtement métalliques	problèmes de collage possibles avec les éléments pultrudés à cause des agents de démoulage internes
isolation thermique et acoustique intégrée à la structure	assemblage des panneaux critiques : collage et/ou boulonnage/rivetage
possibilité d'intégrer la finition intérieure aux panneaux structuraux lors du moulage	technologie peu éprouvée et risque technologique plus élevé, surtout s'il y a beaucoup de joints
diminution du temps d'assemblage par la diminution du nombre de composantes et de sous-ensembles et, en corollaire, simplification de la chaîne de montage	isolation thermique peut-être insuffisante (air entre parois et ponts thermiques) pour climats nordiques : isolation supplémentaire intégrée à l'habillage intérieur
esthétique améliorée : peu ou pas de rivets visibles, formes fluides	coût des filières très élevé
le fabricant d'autobus reçoit des panneaux et des profilés préfabriqués et n'a pas à connaître la technologie des composites	
traînée aérodynamique réduite : peu ou pas de rivets en surface, formes fluides	
possibilité d'intégrer des fonctions non structurales à la caisse comme les conduits de chauffage et de ventilation	
peu de main-d'œuvre nécessaire pour fabriquer les profilés pultrudés	

Les coûts reliés aux attaches (rivets, boulons ou colle) sont négligés dans cette analyse. Les autres hypothèses posées pour l'analyse se retrouvent en annexe.

Les coûts reliés aux panneaux composites des face avant et bout arrière sont évalués sur la base d'un sandwich d'épaisseur totale de 20 mm ayant des peaux composites verre/polyester de 3 mm d'épaisseur. Les peaux ont une teneur en verre de 45 p. cent massique. Le moulage par projection simultanée est le procédé retenu pour la fabrication des face avant et bout arrière. L'adhésif à mousse n'a pas été considéré. Le prix des moules, des matrices de formage et des gabarits d'assemblage ne sont pas considérés dans les analyses. Les moules représentent un coût récurrent puisqu'ils doivent être remplacés au bout d'un certain temps.

Les profilés pultrudés considérés dans cette analyse ont une configuration caisson. L'épaisseur totale des profilés est de 40 mm et l'épaisseur des parois est de 3 mm. Il est à noter que la conception finale pourrait commander des parois d'épaisseur variable d'un endroit à l'autre en fonction des efforts en présence, ce qui est d'ailleurs possible avec ce procédé. La présente analyse préliminaire se limite cependant à des parois d'épaisseur constante. Le coût des filières n'est pas considéré dans l'analyse économique.

Les détails de l'analyse se retrouvent à l'annexe F. Le tableau 7 résume les principales conclusions de cette analyse comparative :

**Tableau 7 :** Comparaison du concept 3 à l'autobus de référence

	variation masse (%)	variation coût de production (%)
référence acier	10 500 kg	152 400 \$
assemblage de panneaux sandwichs et de profilés pultrudés	- 8,3 %	- 0,7 %

Une variation des temps de fabrication et d'assemblage de 25 p. cent se traduit ici par une variation du coût total de fabrication de moins de 0,5 p. cent.



## 4.2 AUTOBUS SANS CHÂSSIS

### 4.2.1 Autobus de référence/concept de base actuel

Comme auparavant, nous définissons un autobus de référence pour mieux comparer le dernier concept tout composite. Cet autobus est plus contemporain de par sa grande fenestration et plus représentatif des derniers véhicules apparus sur le marché de par sa structure métallique tubulaire, sans châssis porteur, et son revêtement extérieur en composites. Rien n'est changé pour le reste afin de pouvoir comparer ces concepts sans châssis à ceux décrits précédemment : l'habillage est classique, le plancher est en contreplaqué recouvert d'un couvre-sol et les éléments mécaniques sont standards. **Cet autobus de référence est en soi un concept composite parce qu'il rejoint à plusieurs égards le concept 1 décrit précédemment et s'apparente beaucoup au LFS de Nova Bus.** Les caractéristiques générales de cet autobus de référence sont les suivantes :

- longueur : 12,2 m (40 pi)
- largeur : 2,6 m (102 po)
- empattement : 6,5 m (256 po)
- voie avant : 2,2 m (86 po)
- voie arrière : 1,9 m (76 ½ po)
- garde au sol : 355 mm (14 po)
- hauteur hors tout : 3,1 m (121 ½ po)
- portes : 1,27 m (50 po) × 2,31 m (91 po)
- fenêtres : 1270 mm (50 po) × 1295 mm (51 po)

Deux options sont considérées pour la structure tubulaire : acier de charpente et acier inoxydable. Cette démarche est calquée sur les tendances actuelles du marché, car des autobus avec structure d'acier inoxydable sont déjà offerts en option par certains fabricants pour répondre aux attentes des utilisateurs en ce qui à trait à la corrosion. Comme expliqué au paragraphe 4.1.2.2, nous assumons qu'un autobus en acier inoxydable a le même poids et se vend au même prix qu'un autobus en acier. L'option profilés pultrudés n'est pas envisagée ici, car nous avons démontré à la section précédente qu'elle conduisait à une structure plus lourde. Le risque associé à cette solution est également plus élevé ici, car il n'y a plus de châssis d'acier (plate-forme) et la structure en pultrusions devrait reprendre à elle seule tous les efforts.

Les peaux composites du revêtement extérieur sont fabriquées par projection simultanée en moule ouvert, comme décrit au paragraphe 4.1.2.1.

Sur cette base, et en recoupant les informations publiées et/ou transmises verbalement par les personnes contactées dans le cadre de la présente étude quant à la ventilation des masses des composantes majeures et des coûts typiques, l'autobus de référence – structure d'acier ou d'acier inoxydable - pèse, en état de marche, mais sans passager, 10 490 kg (23 100 lb) et son coût de fabrication est évalué à 161 150 \$. La ventilation des masses et des coûts est présentée à l'annexe G.

Les éléments de coût suivants sont considérés :

- acier de charpente : 0,75 \$/kg
- fibre de verre (mèches pour projection) : 3 \$/kg
- résine polyester : 3,50 \$/kg
- gelcoat : 5 \$/kg
- revêtement intérieur : 3,25 \$/kg
- isolation : 9,17 \$/kg
- contreplaqué marin ¾ po : 3,61 \$/kg

Les éléments apparaissant en italiques (fenêtres, habillage intérieur et mécanique) dans l'analyse des coûts de l'annexe G sont approximatifs, mais les ordres de grandeur sont adéquats pour un autobus de ce type et, soit identiques, soit comparables, à ce qui a été utilisé pour l'analyse des autres concepts présentés précédemment.

#### **4.2.2 Concept 4 : Caisse monocoque autoportante**

Ce concept permet de pousser encore plus loin l'utilisation des panneaux sandwichs. Ici, la structure tubulaire et le revêtement sont remplacés par une caisse monocoque autoportante (figure 7). Des berceaux (sous-châssis) métalliques sont utilisés afin d'intégrer plus facilement les éléments mécaniques (moteur, direction/suspension, essieux, etc) à cette caisse composite et de redistribuer les efforts à des points d'attaches correctement positionnés et renforcés. Cette approche a été utilisée pour le bus Metroliner et le projet ATTB cité au chapitre 2.

Le corps central de la caisse serait obtenu par l'assemblage (collage structural et rivetage/boulonnage) de deux demi-coquilles. Les faces avant et arrière seraient moulées séparément. Les berceaux supportant les éléments mécaniques seraient



fabriqués soit d'acier de charpente, soit d'acier inoxydable. Les berceaux seraient du type structure tubulaire mécano-soudée. Ceux-ci seraient fixés à la caisse autoportante à l'aide de boulons. Des noyaux durs seraient placés dans le sandwich du plancher pour éviter l'écrasement de l'âme lors du serrage des boulons et pour redistribuer les efforts sur une plus grande surface. Des noyaux similaires pourraient être placés dans les murs pour la fixation des sièges. Des profilés d'aluminium seraient placés autour des fenêtres pour en faciliter le montage et assurer l'intégrité structurale du sandwich. Les faces avant et arrière seraient fixées au corps central de la caisse de la même façon que décrit précédemment, soit par boulonnage et collage. Comme toujours, une garniture de plastique pourrait être utilisée, au besoin, pour cacher les têtes de rivets ou de boulons et ainsi améliorer l'apparence visuelle du joint.

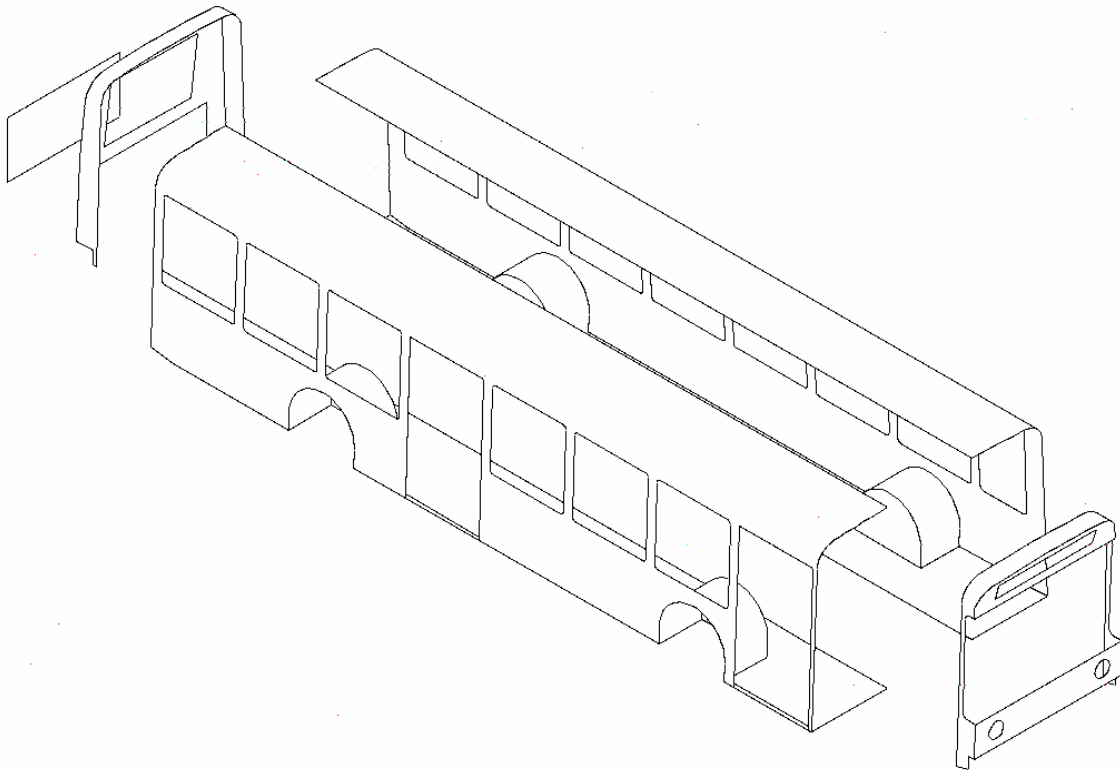


Figure 7 : Autobus concept 4

#### **4.2.2.1 Concept 4-A : Fabrication par projection/drapage**

##### **4.2.2.1.1 Avantages/Désavantages**

Les avantages et désavantages reliés à ce concept sont essentiellement les mêmes que ceux déjà présentés pour le concept 2 (tableau 4).

##### **4.2.2.1.2 Matériaux possibles**

Pour les renforts et la résine, les matériaux considérés pour le concept 2 seraient applicables. L'utilisation d'une résine plus flexible prend cependant ici tout son sens étant donné que la caisse doit conserver son intégrité structurale à long terme (tolérance à l'endommagement, résistance en fatigue). Une résine vinylester ou époxyde serait donc plus appropriée. Comme toujours, des charges ignifugeantes ou des formulations de résines spéciales peuvent être considérées pour améliorer la résistance au feu du composite.

Comme l'intégrité structurale ne peut plus être assurée, même en partie, par le châssis d'acier comme dans les cas précédents, une mousse présentant des propriétés mécaniques supérieures devrait être utilisée. Une mousse PVC de  $150 \text{ kg/m}^3$  est ici considérée.

##### **4.2.2.1.3 Procédés possibles**

Bien qu'il serait théoriquement possible de fabriquer une caisse structurale par projection simultanée, les propriétés mécaniques des peaux ainsi fabriquées (isotropie et faible teneur de verre) ne permettent pas de tirer pleinement avantage des composites, surtout en ce qui a trait au poids. Pour cette raison, le moulage contact (drapage de tissus dans un moule ouvert) serait beaucoup plus intéressant, car il permet d'orienter les fibres dans le sens des efforts et ainsi d'optimiser, d'un point de vue structural, la caisse en composites. Bien qu'il soit plus facile de contrôler la quantité de résine appliquée avec le moulage contact, il n'en demeure pas moins que ce procédé ne permet pas encore d'atteindre des taux de fibres très élevés. L'infusion de résine, procédé décrit auparavant, permet d'atteindre des taux de renforts plus élevés. Des préimprégnés, moulés en sac sous vide, dans un autoclave ou non, pourraient aussi être envisagés et donneraient un composite avec des propriétés mécaniques encore meilleures, ce qui se traduirait par un allègement généralisé de la caisse. Ce procédé est cependant plus compliqué à mettre en œuvre et nécessite des investissements importants au niveau de l'équipement, surtout si la variante de moulage en autoclave était retenue.



#### 4.2.2.1.4 Modes d'assemblage courants

Différentes approches sont ici possibles :

- caisse type tunnel avec face avant et bout arrière rajoutés, surtout intéressant pour une caisse obtenue par enroulement filamentaire (voir section 4.2.2.2);
- assemblage de deux demi-coquilles avec face avant et bout arrière rajoutés.

Cette dernière approche est illustrée en annexe.

Les modes d'assemblages décrits précédemment sont applicables pour ce quatrième concept : collage et boulonnage/rivetage.

#### 4.2.2.2 Concept 4-B : Fabrication par enroulement filamentaire

Le procédé d'enroulement filamentaire a été utilisé dans le passé pour fabriquer de grandes structures de génie civil qui peuvent s'apparenter au corps central de l'autobus (par ex. tunnel pour relier deux bâtiments) ou encore, dans le domaine du transport, pour fabriquer, sur un plan expérimental, des voitures de chemin de fer (expériences notamment en Europe par Composites Aquitaine).

Avec ce procédé, des fibres imprégnées d'une résine sont enroulées autour d'un mandrin. Ce dernier représente la surface intérieure de la pièce que l'on désire fabriquer. Les fibres peuvent se retrouver sous forme de mèches, rubans ou, plus rarement, de tissus. Une fois la résine polymérisée, la pièce est extraite du mandrin. Il est possible de fabriquer des structures sandwichs avec le procédé d'enroulement filamentaire. Un des problèmes posé par ce procédé est la difficulté d'orienter les fibres axialement, soit dans la direction des efforts de flexion, importants pour notre application. En effet, l'enroulement filamentaire permet facilement de déposer les fibres circonférentiellement ( $90^\circ$ ), mais difficilement pour des angles inférieurs à  $15^\circ$ . Des tissus peuvent, entre autres, être utilisés pour contourner ce problème. Un autre problème, probablement plus important lorsque l'on considère ce procédé pour fabriquer un corps d'autobus, se situe au niveau de la qualité du fini extérieur. En effet, avec ce procédé le « moule » est le mandrin et donc la belle surface se retrouve à l'intérieur. Comme le fini extérieur est important pour un véhicule commercial, des opérations de finition (masticage, sablage) très onéreuses tant en main-d'œuvre, qu'en matériel et qu'en poids doivent précéder la mise en peinture et rendent cette approche peu intéressante. Cette approche n'est donc pas développée plus à fond dans le cadre de cette étude.



### 4.2.2.3 Comparaison des coûts

Pour fins de comparaison de ce concept avec l'autobus de référence, les éléments de coût suivants sont considérés :

- fibre de verre E (tissus) : 8 \$/kg
- résine polyester : 3,50 \$/kg
- mousse PVC, 150 kg/m<sup>3</sup> : 58,65 \$/kg
- gelcoat : 5 \$/kg
- taux de déposition verre/résine (projection) : 10 kg/min
- application du gelcoat : 1 min/m<sup>2</sup> (temps standard d'atelier)
- débullage : 3 min/m<sup>2</sup> (temps standard d'atelier)
- drapage des tissus : 1 ½ min/pli/m<sup>2</sup> (temps d'atelier standard)
- mise en place de la mousse (adhésif, mousse, compaction) : 40 min/m<sup>2</sup> (temps d'atelier standard)

Les coûts liés aux attaches (rivets, boulons ou colle) sont négligés dans cette analyse. Les autres hypothèses posées pour l'analyse se retrouvent en annexe.

Les coûts liés aux panneaux composites des face avant, bout arrière, toit et murs sont évalués sur la base d'un sandwich d'épaisseur totale de 40 mm ayant des peaux composites verre/polyester de 4 mm d'épaisseur. Les peaux ont une teneur en verre de 45 p. cent massique. Le plancher est également de configuration sandwich, mais d'épaisseur totale de 50 mm avec des peaux verre/polyester de 5 mm. Comme auparavant, les peaux ont une teneur en verre de 45 p. cent massique. Le moulage contact, avec les fibres de renfort sous forme de tissus, est plutôt retenu pour la fabrication de ces pièces, sauf pour la couche directement en contact avec le gelcoat qui est obtenue par projection simultanée (évite le télégraphiage des fibres). L'adhésif à mousse n'a pas été considéré dans les analyses. Le prix des moules, des matrices de formage et des gabarits d'assemblage ne sont pas considérés dans les analyses. Les moules représentent un coût récurrent puisqu'ils doivent être remplacés au bout d'un certain temps.

Les détails de l'analyse se retrouvent à l'annexe H. Le tableau 8 résume les principales conclusions de cette analyse comparative.

Une variation de 25 p. cent des temps de fabrication et d'assemblage se traduit par une variation de 1,3 p. cent environ du coût total de fabrication.



**Tableau 8 :** Comparaison du concept 4 aux autobus de référence «sans châssis», grande fenestration

	variation masse (%)	variation coût de production (%)
référence grande fenestration – structure acier ou acier inoxydable	10 490 kg	161 150 \$
caisse sandwich monocoque et autoportante (concept 4)	-14,3 %	+ 33,8 %

### 4.3 RÉSUMÉ DES CONCEPTS COMPOSITES PRÉLIMINAIRES

Les tableaux 9 et 10 présentent un résumé des quatre concepts composites préliminaires développés dans ce rapport et permettent de mieux en apprécier la valeur relative.

De cette analyse, il ressort que les concepts 1-A et 1-B pourraient être intéressants, non pas en fonction d'un allègement important, mais plutôt **du point de vue résistance à la corrosion**. Le risque est faible et l'impact sur le coût de fabrication minime. Le concept 1-C n'est pas intéressant, car les analyses préliminaires nous indiquent qu'il y aurait augmentation de la masse, parfois même significative, et augmentation des coûts de fabrication. L'autobus de référence «sans châssis» (concept de base actuel) et à grande fenestration, avec un poids à peu près identique à l'autobus de référence avec châssis d'acier et un coût de fabrication environ plus élevé de 6 p. cent, s'avère également une option intéressante si l'on considère la résistance à la corrosion reliée aux panneaux composites et l'élément de vente offert par la grande fenestration. L'option structure tubulaire en acier inoxydable est d'autant plus intéressante que l'élément résistance à la corrosion y est encore renforcé.

**Tableau 9** : Résumé des concepts composites «avec châssis» proposés

concept	caractéristiques principales	variation masse (%)	variation coût production (%)	niveau de risque
référence acier	<ul style="list-style-type: none"> <li>châssis d'acier (plate-forme)</li> <li>ossature d'acier</li> <li>revêtement tôle d'acier</li> </ul>	10 500 kg	152 400 \$	s/o
1-A, 1-B	<ul style="list-style-type: none"> <li>châssis d'acier (plate-forme)</li> <li>ossature d'acier, d'acier inoxydable</li> <li>revêtement panneaux composites</li> </ul>	- 1,9 %	+ 1,3 %	faible
1-C	<ul style="list-style-type: none"> <li>châssis d'acier (plate-forme)</li> <li>ossature en profilés composites pultrudés</li> <li>revêtement panneaux composites</li> </ul>	+23,2 %	+ 5,8 %	moyen
2-A	<ul style="list-style-type: none"> <li>châssis d'acier (plate-forme)</li> <li>caisse structurale : assemblage de panneaux sandwichs</li> </ul>	- 14,4 %	+ 0,3 %	moyen

Tableau 9 (suite)

2-B	<ul style="list-style-type: none"> <li>châssis d'acier (plate-forme)</li> <li>caisse structurale : structure sandwich monocoque</li> </ul>	- 14,4 %	- 0,3 %	moyen
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>châssis d'acier (plate-forme)</li> <li>caisse structurale : assemblage de profilés composites pultrudés</li> </ul>	- 8,3 %	- 0,7 %	élevé

Tableau 10 : Résumé des concepts composites «sans châssis» proposés

concept	caractéristiques principales	variation masse (%)	variation coût production (%)	niveau de risque
référence grande fenestration (concept de base)	<ul style="list-style-type: none"> <li>structure autoportante acier ou acier inoxydable</li> <li>revêtement peaux composites</li> <li>grandes fenêtres</li> </ul>	10 490 kg	161 150 \$	faible
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>caisse monocoque autoportante</li> <li>berceaux métalliques pour intégration des éléments mécaniques</li> </ul>	- 14,3 %	+ 33,8 %	moyen

Les concepts 2 sont intéressants, car ils permettent d'atteindre un niveau d'allègement significatif de l'ordre de 15 p. cent sans impact important au niveau des coûts de fabrication. **Ces concepts mettent à profit les trois principaux avantages que les composites peuvent offrir pour les autobus urbains :**

**légèreté, liberté au niveau des formes et résistance à la corrosion** (le châssis d'acier reste cependant sensible à la corrosion). Le niveau de risque est un peu plus élevé que précédemment. La présence du châssis type longeron ne permet cependant pas de fabriquer des autobus à plancher bas. Néanmoins, ces concepts offrent un bon potentiel et mériteraient d'être développés plus à fond lors de travaux ultérieurs.

Le concept 3 permet aussi un allègement important, mais le niveau de risque qui y est associé, principalement à cause du prix des outillages, des problèmes de collage et d'isolation, le rend moins intéressant. À notre avis, ce concept est peu porteur et devrait être mis de côté.

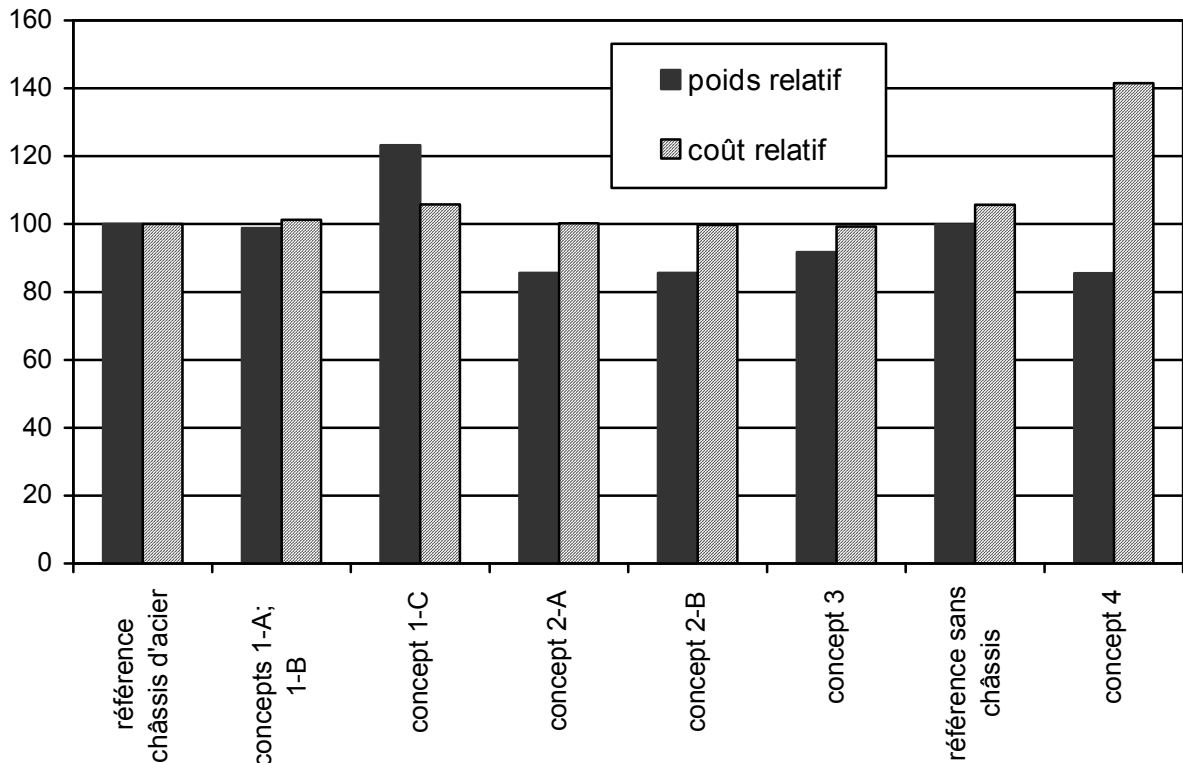
Le concept 4 permet d'atteindre environ le même niveau d'allègement que les 2-A et 2-B en comparaison avec l'autobus de référence correspondant « acier », soit autour de 15 p. cent. La comparaison est tout aussi favorable lorsque l'on compare le concept 4 à un autobus de base actuel avec structure d'acier inoxydable qui offre une résistance à la corrosion plus comparable, mais le concept composite reste cher. Le coût de fabrication élevé s'explique d'une part par le procédé de fabrication retenu (moulage contact et tissus) qui demeure fortement tributaire d'opérations manuelles et, d'autre part, des coûts de matières premières (mousse dense et tissus). Un autre procédé de fabrication, comme l'infusion de résine, combiné à des travaux d'optimisation permettraient de diminuer à la fois le coût de fabrication et la masse, et ainsi de rendre cette solution plus attrayante. Le concept 4 est le seul, parmi tous les concepts proposés, qui **exploite au maximum les trois avantages jugés critiques pour l'utilisation des composites dans les autobus urbains : légèreté, résistance à la corrosion inégalée et liberté, presque absolue, au niveau des formes**. Pour ces raisons, cette solution nous semble prometteuse et devrait également être développée plus à fond lors de travaux ultérieurs.

La figure 8 permet de comparer entre eux les différents concepts présentés dans ce rapport. Par choix et pour faciliter la comparaison, les poids et les coûts sont normalisés par rapport à l'autobus de référence avec châssis d'acier (poids=100 et coût=100).

#### 4.4 COMPOSANTES INDIVIDUELLES

L'intégration de pièces composites individuelles dans les autobus urbains peut s'inscrire dans une démarche différente, mais servir les mêmes objectifs





**Figure 8 :** Comparaison des concepts

de réduction de poids et, surtout, d'amélioration de la résistance à la corrosion. Cette approche *par pièce* peut, en effet, être très intéressante pour la remise à neuf d'autobus où certaines composantes, par exemple celles plus sujettes à la corrosion, plutôt que de les remplacer par celles d'origine, le sont par un équivalent composite. Des pièces individuelles peuvent également être utilisées dans les autobus neufs par le fabricant qui désire prendre moins de risques pour une première expérience avec les composites.

Sur la base des analyses préliminaires présentées ci-dessus, six composantes sont particulièrement intéressantes pour une version composite : les portes, le toit, les escaliers, les faces avant et arrière et le plancher. Ces composantes sont, en effet, parmi celles qui pourraient bénéficier au mieux des avantages liés à l'utilisation des composites : légèreté, résistance à la corrosion et liberté au niveau des formes.

#### 4.4.1 Portes

Une solution composite pour les portes pourrait être intéressante au niveau de la résistance à la corrosion. En effet, et comme mentionné auparavant, les portes présentent de grandes surfaces vitrées qui laissent peu de place à un allègement notable.

Le cadre des portes pourrait être fabriqué en composite sandwich verre/polyester. Une telle construction permettrait d'atteindre les niveaux de rigidité escomptés. Au besoin, des renforts carbone pourraient être intégrés au composite. Le carbone est beaucoup plus cher que le verre, mais la faible quantité requise pour cette composante aurait une incidence négligeable sur le prix de revient.

Les procédés suivants pourraient être considérés :

- moulage contact;
- injection de résine (RTM);
- infusion de résine.

Ces procédés ont été décrits précédemment. De tous, le procédé d'injection de résine serait probablement le plus approprié puisqu'il permet d'obtenir une pièce avec deux belles surfaces (moulage en moule fermé), une caractéristique importante pour un cadre de porte où tous les côtés sont apparents.

#### 4.4.2 Toit

Selon les résultats de notre enquête, le toit n'est pas particulièrement sujet à la corrosion. Il est donc rarement remplacé dans un processus de reconstruction. Pour un autobus urbain conventionnel, le toit représente environ 2 p. cent de la masse totale. La réduction de poids n'est donc pas un argument choc en faveur des composites. Par contre, une solution composite permettrait une plus grande liberté au niveau du design et peut être une réduction des temps d'assemblage. Le toit pourrait en effet être fabriqué chez un mouleur et être livré au fabricant d'autobus prêt à installer, c'est-à-dire fini ( finition extérieure, isolation, finition intérieure) et complet avec l'écouille de secours.

Comme développé dans le concept 1, la solution la plus simple est de coller une peau composite sur une structure d'acier. Celle-ci ne permet cependant pas de livrer le toit avec l'écouille de secours, ni de diminuer les temps d'assemblage puisque le toit doit par la suite être isolé et complété par l'application d'un revêtement intérieur. Une solution sandwich serait donc plus intéressante.



Un toit sandwich serait fabriqué avec des peaux composites verre/polyester et une âme en mousse PVC. D'autres types d'âmes pourraient également être considérés, comme la mousse SAN ou le bois de balsa. Cette solution sandwich permettrait de livrer un toit prêt au montage. Comme le toit pourrait être conçu de façon à présenter des caractéristiques structurales adéquates, il pourrait être déposé sur une ossature plus légère ou bien la remplacer complètement.

Les procédés de moulage contact ou moulage par projection simultanée en moules ouverts pourraient être considérés. L'infusion de résine serait également un bon procédé et conduirait à une surface intérieure de meilleure qualité. Le revêtement intérieur pourrait être mis en place par le fabricant de panneaux composites, par exemple par collage d'un mince revêtement en feuille, plastique ou laminé papier/phénol haute pression. Au besoin, le mouleur pourrait également incorporer au toit certaines fonctions, comme la ventilation, et «noyer» dans le sandwich certains fils électriques.

#### **4.4.3 Escaliers**

Comme nous l'avons mentionné au paragraphe 3.6, les escaliers sont particulièrement sujets à la corrosion. Ils pourraient être fabriqués en composite verre/polyester ou verre/vinylester par le procédé de moulage contact ou de projection simultanée. Comme la portée d'une marche est somme toute petite et que la forme générale d'un escalier (marche et contremarche) conduit à une structure intrinsèquement rigide, un stratifié solide d'épaisseur approprié ferait probablement l'affaire. Au besoin, la marche pourrait être fabriquée d'un sandwich balsa ou mousse. Le fini gelcoat traditionnel permettrait de donner la couleur requise aux escaliers et augmenterait la durabilité de la pièce. Au besoin, la résine pourrait être colorée de la même couleur afin de préserver une meilleure apparence en cas d'éclat et d'écaillage du gelcoat. Comme les escaliers seraient livrés par le mouleur prêt à installer, il en résulterait une diminution des temps d'assemblage chez le fabricant d'autobus (fixation rapide à l'autobus par quelques boulons ou vis).

#### **4.4.4 Bout avant et bout arrière**

L'utilisation des composites pour les faces avant et arrière est particulièrement intéressante dans les cas suivants :



- reconstruction d'autobus lorsque les pièces d'origine n'existent plus;
- reconstruction d'autobus lorsque l'on désire remplacer les pièces d'origine par d'autres plus résistantes à la corrosion;
- reconstruction d'autobus lorsque l'on désire doter le véhicule d'une esthétique propre ou mettre un autobus un peu vieillot au goût du jour et à peu de frais;
- construction d'autobus neufs lorsque l'on désire avoir une grande liberté au niveau du design et une bonne résistance à la corrosion;
- construction d'autobus neufs lorsque l'on désire diminuer les temps d'assemblage.

Comme décrit auparavant dans ce rapport, les faces seraient idéalement construites en composite sandwich : isolation thermique et acoustique intégrée, panneaux structuraux. Les panneaux seraient livrés prêts pour l'assemblage sur le véhicule. Tous les points d'attaches pour le tableau de bord seraient intégrés au composite. Il serait également possible, en poussant un peu plus l'intégration du mouleur dans le processus, d'obtenir des faces déjà câblées avec les phares et autres pièces en place. Cette approche de fournisseur-intégrateur et de fabricant-assembleur est d'ailleurs de plus en plus utilisée en Europe, entre autres pour les véhicules industriels.

Les procédés de moulage décrits plus haut pour les faces avant et arrière seraient applicables ici.

#### **4.4.5 Plancher**

Le plancher ne représente qu'un peu plus de 2 p. cent de la masse totale d'un autobus urbain conventionnel. Un plancher plus léger, certes souhaitable, ne diminuera donc pas de façon notable la masse totale d'un autobus. Par contre, un plancher contreplaqué est sujet à la pourriture et à l'absorption d'eau (augmentation de la masse dans le temps), problèmes qui seraient éliminés en recourant à un plancher composite.

Le plancher serait ici fabriqué en composite sandwich. L'âme du sandwich devrait être assez dense pour résister aux contraintes locales d'écrasement. Le bois de balsa ou une mousse dense ferait l'affaire. Les panneaux, plats et ne nécessitant donc pas d'outillages compliqués, seraient fabriqués par moulage contact ou par moulage sous presse. Des inserts appropriés seraient intégrés aux panneaux pour permettre la fixation au plancher des différents éléments : supports de sièges, colonnes d'appui, etc.



Notons en terminant que cette technologie est déjà en application, entre autres pour les planchers du métro de Londres et dans plusieurs wagons de transport des passagers.

## 5. CONCLUSION ET IDENTIFICATION DES PARTENAIRES

### 5.1 CONCLUSION

L'enquête auprès des grands utilisateurs d'autobus urbains nous a appris qu'ils attachaient assez peu d'importance au poids des véhicules. **La corrosion les préoccupe cependant beaucoup.** La visite des compagnies œuvrant dans le domaine de la réfection des autobus a permis de confirmer que la corrosion est le principal problème pour l'industrie.

Les composites sont déjà présents, à différents niveaux, dans les autobus urbains commerciaux, et ce, tant pour les neufs que les refaits. Leur utilisation reste cependant assez marginale en regard du poids total d'un autobus. Les composites sont utilisés essentiellement pour des composantes non structurales, notamment au niveau des revêtements extérieurs (peaux composites sur structure tubulaire d'acier), des panneaux d'accès (par ex. accès au moteur), des sièges, du poste de conduite et des escaliers dans certains modèles, mais encore de façon assez marginale dans l'ensemble. Ils sont donc utilisés d'une manière assez traditionnelle en misant certes sur leur légèreté, **mais aussi et surtout sur leur capacité à produire des formes complexes et esthétiques à un prix abordable par rapport aux métaux** (par ex. poste de conduite, sièges) **et leur résistance à la corrosion** (par ex. revêtement extérieur). Les composites ont cependant été poussés beaucoup plus loin dans certains autobus plus spécialisés ou véhicules concepts. À ce niveau, le projet le plus intéressant, et sans doute le plus médiatisé, est celui du ATTB (É.-U.). Cet autobus monocoque en panneaux sandwichs, fabriqués en six exemplaires, est environ 30 p. cent plus léger qu'un autobus conventionnel de 12 m. **Cette réduction importante du poids a été atteinte en réduisant à la fois le poids de la structure et de l'habillage et celui des composantes mécaniques.** Il est fabriqué par un procédé d'infusion de résine et la fibre de carbone est largement utilisée. Le ATTB s'est inspiré d'un autobus Européen, le Metroliner, qui est aussi de construction monocoque sandwich. Comme pour le ATTB, le carbone y est largement utilisé. Les données publiées sur cet autobus nous apprennent que le poids de la structure a été réduit de 50 p. cent par rapport à l'ancien modèle qu'il remplace. L'utilisation du carbone permet une réduction de poids substantielle, mais le prix est beaucoup plus élevé que pour la fibre de verre.

Les résultats de l'enquête auprès des utilisateurs et l'étape d'identification des composantes nous a permis de voir qu'il y avait place pour les composites dans un autobus urbain, mais que le potentiel de réduction de poids était, somme toute,



limité parce que l'ensemble des composantes non mécaniques (moteur, essieux, système de freinage, système électrique, pneumatique etc.) ne représente qu'environ 30 p. cent de la masse totale. Une réduction de poids de 50 p. cent au niveau des composantes non mécaniques seules ne se traduira donc que par une réduction totale du poids de l'autobus de 15 p. cent. Cette limite s'explique entre autres par les grandes surfaces vitrées que l'on retrouve sur un autobus urbain et qui laissent peu de place à la réduction de poids. **Il apparaît donc clair que la réduction de poids des autobus a ses limites, et ce, peu importe les technologies et matériaux utilisés.** De ce fait, la réduction de poids seule n'est pas suffisante pour inciter les fabricants à utiliser les composites et d'autres avantages, comme la liberté au niveau du design et la résistance à la corrosion, sont pour eux des éléments intéressants.

Quatre concepts composites sont proposés et développés dans notre étude autour d'un autobus de référence typique de 12 m. Cette approche a été utilisée pour éviter de travailler avec un modèle d'un fabricant particulier et pour assurer une base de comparaison fiable. Les trois premiers concepts sont développés autour d'un autobus du type carrosserie montée sur châssis d'acier. Le dernier est développé autour d'un autobus de référence plus contemporain à grande fenestration et à structure tubulaire autoportante. **Ainsi, par cette double approche avec châssis et sans châssis, toutes les principales pistes possibles de réduction de poids des autobus urbains ont pu être évaluées.**

Les concepts préliminaires proposés vont du plus simple et facile jusqu'au plus élaboré. Nous avons limité les analyses à des matériaux non aérospatiaux. Par choix, nous avons gardé le plancher en contreplaqué dans les trois premiers concepts pour faciliter la comparaison avec l'autobus de référence. Un plancher composite, comme celui décrit au paragraphe 4.4.5, pourrait cependant être considéré et permettrait de réduire légèrement le poids. Les matériaux susceptibles d'être utilisés ont été présentés et les principaux procédés de fabrication et modes d'assemblage sont décrits dans ce rapport. Une approche par *propriétés équivalentes* a été utilisée à certains moments pour évaluer le poids d'éléments composites. Celle-ci a certes ses limites, mais une analyse plus détaillée aurait demandé un effort de design et de calcul qui dépasse le cadre de la présente étude. Des travaux poussés d'ingénierie et d'optimisation permettraient probablement de réduire encore la masse.

Notre étude ne prend pas en compte la réduction de poids possible due à l'utilisation de composantes mécaniques plus petites, donc plus légères, à cause du poids d'ensemble de l'autobus qui serait réduit par l'utilisation des composites. Elle ne prend pas non plus en compte la possibilité offerte, par l'utilisation de matériaux légers, d'allonger les autobus tout en respectant les normes au niveau du

chargement maximum par essieu. En effet, un autobus plus long, mais d'un poids identique à un autobus actuel, pourrait transporter plus de passagers, sur certains tronçons du moins (problème possible de manœuvrabilité dû à la longueur de l'autobus), et donc augmenter la rentabilité générale du service de transport en commun. Ces économies pourraient aider à justifier l'achat d'autobus plus dispendieux au départ.

**Des réductions additionnelles de poids seraient possibles en utilisant le carbone, mais l'impact sur le coût de fabrication serait significatif.** Il faut, bien sûr, souligner que nos études se sont limitées à des composites fibre de verre, mais que des travaux de développement plus poussés pourraient éventuellement indiquer que le carbone serait nécessaire, d'un point de vue structural, en certains endroits.

Dans l'analyse économique, les coûts reliés aux matières premières sont assez fiables puisque les quantités sont évaluées sur la base de l'autobus de référence (composantes bien définies, surface connues, etc.) et qu'ils considèrent les prix du marché actuel. Un peu plus d'incertitude demeure cependant du côté des temps de fabrication et d'assemblage. Par contre, une analyse de sensibilité a démontré que le coût total de fabrication d'un autobus est relativement peu sensible à ces variations main-d'œuvre. La précision des conclusions que nous tirons de l'étude économique est ainsi bonne et certainement adéquate pour une étude préliminaire. Les temps de fabrication des pièces composites sont évalués sur la base d'une mécanisation moyenne et typique pour l'industrie des composites. Une mécanisation plus poussée, si le volume le justifiait, pourrait contribuer à réduire les coûts.

Nos analyses préliminaires démontrent que l'on pourrait fabriquer un autobus avec châssis d'acier environ 15 p. cent plus léger par rapport au véhicule de référence correspondant sans trop augmenter le coût de fabrication et tout en gardant le risque technologique à un niveau raisonnable. Un allègement du même ordre de grandeur est aussi envisageable pour un autobus sans châssis à grande fenestration, mais l'utilisation des composites a alors un impact plus important sur le coût de fabrication.

Il ressort clairement de cette étude que la seule façon de réduire significativement le poids des autobus urbains est d'intégrer les composites à **tous les niveaux possibles**, y compris au niveau de la structure. Autrement, le remplacement *composante par composante*, même s'il peut aider à résoudre certains problèmes de corrosion ou d'aspect visuel, ne conduira qu'à des réductions de poids marginales.



## 5.2 IDENTIFICATION DES PARTENAIRES

Suite aux conversations tenues avec plusieurs intervenants, il semble assez clair que personne ne semble prêt à investir dans le seul but de réduire le poids des autobus. Par contre la résistance à la corrosion, l'esthétique, la réduction des coûts d'assemblage sont tous des éléments qui incitent à une plus grande utilisation des composites. **Néanmoins, les sociétés de transport et les utilisateurs en général disent ne pas avoir de budget pour ce genre de développement.**

Des trois fabricants canadiens d'autobus urbains seul ORION Bus Industries a montré un intérêt pour financer des travaux plus poussés. Par contre, la mise en place d'un partenariat avec un autre fabricant leur semble hors de question. Une bonne approche serait donc de réaliser une alliance entre un fabricant et un ou deux mouleurs de pièces en composites avec le Centre des Matériaux Composites pour offrir le support technique.

## BIBLIOGRAPHIE

1. *Analyse avantages-coûts d'autobus urbains allégés*, Corbeil, S., Hardy, J., Mantha, M., rapport technique, TP 12558F, Centre de développement des transports, novembre 1995.
2. *Heavy Duty Transit Bus - Common Design Requirements for Standard and Low Floor Buses*, janvier 1999 (document préliminaire gracieusement fourni par le CDT et M. William Brown de la Commission de transport de Toronto).
3. *Advanced Technology Transit Bus, FY95, Final Report*, rapport technique ATTB-96-03-067, Northrop Grumman, mars 1996.
4. North American Bus Industries, spécifications techniques des modèles 30C-LF et 40C-LF.
5. *Faserverbundbauweisen – Halbzeuge und Bauweisen* (en allemand), M. Flemming, G. Ziegmann, S. Roth, Springer-Verlag éd., Berlin, 1996, pp. 261-268.
6. *Modular plastic panels cut bus body cost*, Automotive Engineering, 3 (88), mars 1980, pp. 108-109.
7. *Plaxton Coach & Bus*, bulletin d'information, autobus *Plaxton Pointer 2*.



## ANNEXE A



## Données sur l'autobus Metroliner

*(Not available in electronic format/  
Non disponible en format électronique)*



## ANNEXE B

Concept proposé par une firme anglaise en 1980

*(Not available in electronic format/  
Non disponible en format électronique)*





## ANNEXE C



## Autobus de référence avec châssis

*(Not available in electronic format/  
Non disponible en format électronique)*







## ANNEXE D



## Concepts 1-A, 1-B et 1-C

*(Not available in electronic format/  
Non disponible en format électronique)*





# ANNEXE E





## Concepts 2-A, 2-B et 2-C

*(Not available in electronic format/  
Non disponible en format électronique)*







## ANNEXE F



## Concept 3

*(Not available in electronic format/  
Non disponible en format électronique)*





# ANNEXE G





# Autobus de référence sans châssis et grande fenestration

## Concept de base actuel

*(Not available in electronic format/  
Non disponible en format électronique)*







## ANNEXE H



## Concept 4

*(Not available in electronic format/  
Non disponible en format électronique)*





