



La conception d'un dossier de siège d'autobus en aluminium hydroformé

Résumé du mémoire de maîtrise de Danick Lapointe, Université Laval

15 avril 2020

LA CONCEPTION D'UN DOSSIER DE SIÈGE D'AUTOBUS EN ALUMINIUM HYDROFORMÉ [1]

Résumé du mémoire de maîtrise de Danick Lapointe, Université Laval, Québec

Anthony Fleury, UQAC, Québec

1 INTRODUCTION

À l'échelle mondiale, la majorité de la consommation d'énergie passe par les énergies non renouvelables. En effet, en 2007, 81,4 % de celle-ci provenait des combustibles fossiles, alors que seulement 12,0 % provenaient d'énergie renouvelable et 5,9 % de l'énergie nucléaire [2]. Le domaine du transport est un grand consommateur de combustibles fossiles, et l'augmentation de la demande énergétique a fait augmenter le prix du baril de Brent de 24 \$US en 1997 à 50 \$US en 2005 [3]. Dans le but d'économiser cette énergie et d'en faire meilleur usage, une diminution du poids des véhicules de transport routier est une piste de solution.

Ainsi, l'utilisation de matériau léger tel que l'aluminium offre cet avantage, tout en conservant des propriétés mécaniques intéressantes. De plus, l'aluminium au Québec est produit à partir de l'hydroélectricité, une énergie renouvelable. Toutefois, seulement un tiers des revenus provient du secteur de transformation secondaire, ce qui lui donne une faible valeur ajoutée. Il serait plutôt viable de transformer l'aluminium canadien ici même, au lieu d'importer des produits transformés ailleurs avec l'aluminium d'ici.

Un point de départ réside dans la fabrication d'autocar, plus précisément dans les composants d'un banc de passager. Pour diminuer le poids du véhicule, donc de réduire la consommation d'énergie, il serait possible de remplacer les composants actuels en acier par de l'aluminium.

Comparativement à l'acier, la transformation de l'aluminium n'est toutefois pas aussi connue et sa formabilité est plus faible. Du travail est encore nécessaire à ce jour pour comprendre le comportement de l'aluminium dans diverses méthodes de transformation. Par exemple, l'hydroformage pourrait permettre de tirer le maximum des capacités de l'aluminium et d'augmenter la complexité des pièces, tout en permettant une fabrication en série.

Pour répondre à ces problématiques, l'objectif principal de ce travail est de faire la conception d'une pièce majeure de structure en aluminium destinée au transport. Ceci permettrait de réduire de 20 % le poids d'un siège, de diminuer les coûts de production et d'utiliser l'hydroformage comme technique de mise en forme. La méthode pour répondre à ces objectifs part de la définition d'un cahier de charges, de la génération de solutions, de la conception, de la fabrication et de la mise à l'essai d'un prototype.

Un sous-ensemble d'objectifs peut être aussi défini : choisir la géométrie désirée, vérifier la résistance, vérifier l'hydroformabilité avec des simulations numériques, ajuster la géométrie au besoin, fabriquer l'outillage et les pièces, faire l'usinage final et faire les essais de résistance.

2 TRANSFORMATION PAR HYDROFORMAGE

La technique d'hydroformage consiste à la mise en forme d'un objet de forme complexe à l'aide d'un fluide sous pression. La pression du fluide doit exercer une force entraînant une contrainte supérieure à la limite élastique du matériau, ce qui génère une déformation plastique permanente d'une pièce. Des pièces de faible épaisseur, comme des plaques ou des tubes, peuvent être transformées par hydroformage.

Cette étude se concentre sur l'hydroformage de tube, qui consiste à gonfler une pièce tubulaire scellée entre deux matrices. Deux poussoirs injectent un fluide qui augmente la pression interne et le tube prend de l'expansion dans le sens circonférentiel jusqu'à la ligne de périmètre. Cette ligne limite le périmètre extérieur du changement de forme de la section après l'hydroformage. Le chargement de pression peut être soit linéaire (matrices fixes) ou non linéaire (matrices mobiles). Pour la technique à matrices mobiles, les poussoirs injectent du matériel supplémentaire dans le sens axial du tube en plus de la pression dans le sens circonférentiel, tel qu'illustré à la figure 1.

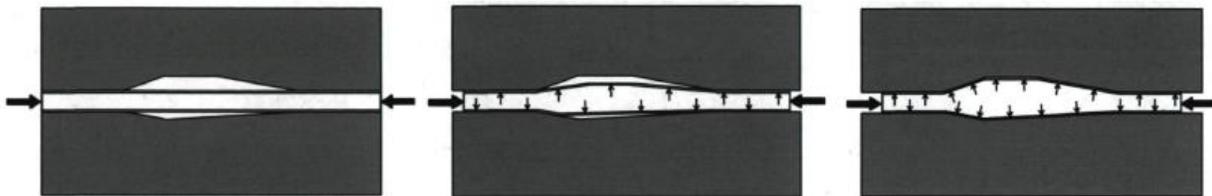


Figure 1 - Poussée axiale pendant le chargement en pression [1]

L'injection de fluide et de matériel doit être contrôlée afin de respecter la limite de formabilité du matériau. Cette limite est représentée dans un diagramme par la déformation admissible dans la direction principale selon une déformation quelconque dans la direction secondaire [4]. Des simulations numériques permettent de limiter la mise au point de la procédure d'hydroformage par essais et erreurs.

La méthode à matrices fixes limite l'augmentation de la ligne de périmètre à 3 % [5]. La méthode à matrices mobiles permet quant à elle une augmentation de la ligne de périmètre supérieure de l'ordre de 65 % de déformation pour l'acier, et de 30 % pour l'aluminium.

Il existe aussi une autre méthode de transformation par hydroformage de plaque. Cette technique est semblable à l'estampillage, sauf qu'une des deux matrices est remplacée par un fluide mis sous pression. Comparé à l'estampillage, l'hydroformage permet d'appliquer une force plus uniforme par le fluide; un seul côté de la plaque est soumis aux forces de frottement et une seule matrice doit être usinée. L'outillage devient alors moins coûteux.

3 PROCESSUS DE DESIGN

Avant de développer un concept, il est important de bien définir un cahier des charges qui inclut plusieurs paramètres du matériau, de la géométrie et de la résistance à partir d'une étude des produits du marché et d'une revue des normes en vigueur.

D'abord, la géométrie d'un siège est soumise à des contraintes qui doivent respecter l'espace disponible d'un autocar. Un bon point de départ pour connaître les dimensions cibles est de comparer ce qui se fait sur le marché. Les dimensions et les matériaux de trois sièges avec ceinture de sécurité à trois points d'ancrage de compagnies différentes sont comparés. Un des modèles est constitué d'une structure tubulaire en acier à haute résistance. Ils sont fabriqués avec deux techniques de transformation, soit en tube plié avec renfort en plaques d'acier soudées ou en tube plié avec section pressée et poinçonnée.

Ensuite, les bancs d'autocar sont soumis à trois groupes de normalisation : Amérique du Nord, Europe et Australie. Un dossier de siège doit respecter des normes de résistance de la structure, de l'appui-tête, des ancrages de ceinture de sécurité et des ancrages de fixation au sol.

En Amérique du Nord, aucune norme n'impose l'implantation d'une ceinture de sécurité à 3 points d'appui dans un autocar. Les fabricants se fient principalement à la législation européenne pour approuver leurs produits. Cette législation européenne, sous la bannière des Nations Unies (UN), donne des valeurs de résistance requise pour un siège d'autocar. L'Australie a adhéré à cette législation, mais estime une valeur de décélération de 20G plutôt que 12G pour l'UN. La valeur de 20G se traduit par la valeur de décélération des voitures nord-américaines, qui est surévaluée par rapport à un autocar. La normalisation des UN est considérée dans ce travail.

Maintenant, un nombre d'objectifs quantifiables doit être établi. La conception du dossier du siège doit répondre aux besoins géométriques et aux exigences de résistance. Six tests sont exigés par les normes afin de respecter ces critères. Les valeurs les plus contraignantes de ces tests ont été conservées, soit la force ponctuelle appliquée au dossier et le moment de flexion maximal reporté au système d'inclinaison. Ceci a permis de définir le cahier de charge du problème au tableau 1.

Tableau 1 - Cahier de charges [1]

Propriétés	Valeurs
Structure en aluminium	Oui
Alliage	AA6061
Structure hydroformée	Oui
Appui-tête intégré dans le dossier	Oui
Facilité d'assemblage avec les autres composants	Oui
Ceinture trois points d'appui	Oui
Force de traction au troisième point d'appui [N]	4200
Largeur de la structure [mm]	450 – 500
Hauteur de la structure [mm]	550 – 650
Profondeur de la structure [mm]	< 100
Poids de la structure [kg]	< 4.58

Maintenant, un concept final doit être envisagé en se basant sur des solutions innovatrices, réalisables et prometteuses. Selon les critères d'adaptabilité, d'apparence, de poids, de robustesse et d'utilisation de l'aluminium et de nouvelles technologies, une étude de faisabilité sur trois concepts de siège a permis de les juger et de les comparer. À noter que l'hydroformabilité limite la dimension du dossier et que la structure peut être de type coque ou tubulaire.

Le concept classique est de forme rectangulaire avec des composants extérieurs. Le concept épaulé a un dossier plus évasé aux épaules avec rembourrage, qui permet de mieux entourer le haut du corps. Le dossier du concept allongé possède une section plus élancée avec une courbe ergonomique qui limite le rembourrage du siège. La solution retenue est un mélange des points forts des trois concepts de siège. Le dossier du siège présenté à la figure 2 est formé d'une structure tubulaire de forme complexe. Il comprend un appui-tête extérieur ajustable pour diminuer la hauteur du dossier, une courbure pour limiter le rembourrage supplémentaire et un système d'inclinaison mécanique.

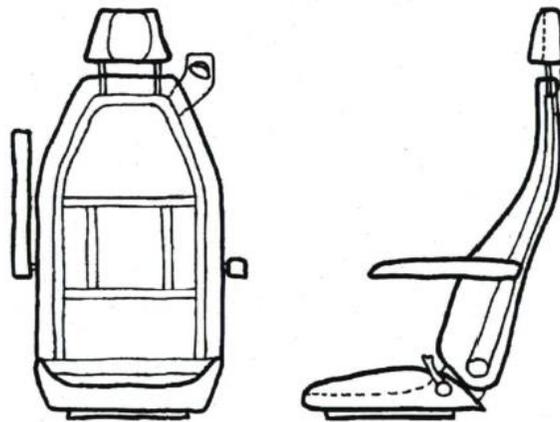


Figure 2 - Croquis de la solution retenue [1]

4 CONCEPTION ET EXÉCUTION

Le concept de siège précédemment choisi doit être détaillé afin de modéliser sa structure de dossier et à calculer sa résistance de façon analytique et numérique. Plusieurs itérations de la forme de la structure, détaillées à la figure 3, ont été étudiées, et pour chacune d'elle, la résistance et l'hydroformabilité (selon le modèle de Filion [4]) ont été vérifiées avec ajustement de la géométrie au besoin. Pour chaque itération, la ligne centrale est tracée avec le même rayon de courbure aux plis pour faciliter le pliage et avec un angle de courbure ergonomique. Ensuite, les sections à inertie variable sont imaginées le long de cette ligne avec changements de géométrie graduels. La somme de ces opérations donne une géométrie 3D, présentée à la figure 3. Les embouts sont présents seulement pour faciliter l'hydroformage et sont enlevés à l'étape d'usinage.

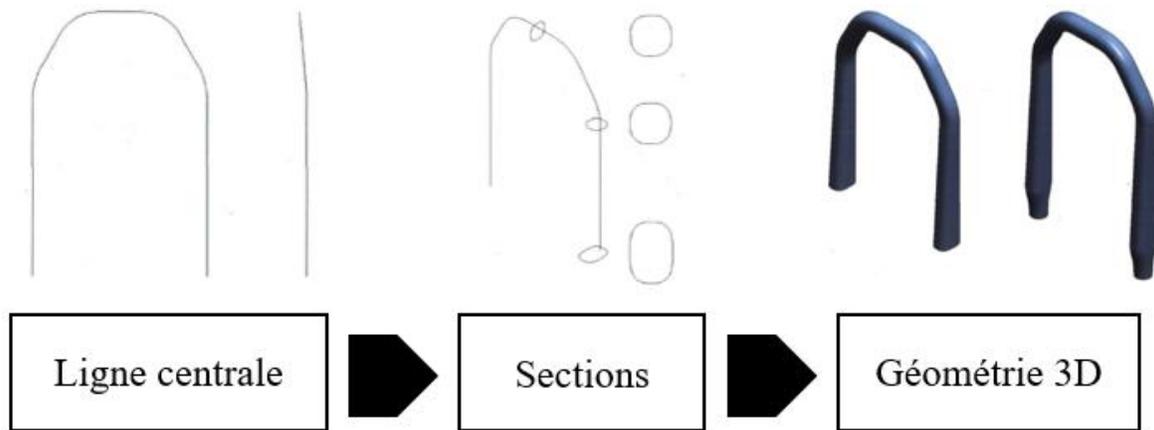


Figure 3 - Étapes de conception de la structure du dossier [1]

La capacité des équipements d'hydroformage a aussi été vérifiée selon les besoins de la pièce. La pression de formage et la force de fermeture de la presse, qui sont respectivement de 275 MPa et de 1000 T, sont largement suffisantes pour hydroformer la pièce.

Pour la résistance, quatre aspects du dossier ont été vérifiés par des calculs analytiques et par des simulations numériques : la résistance générale de la structure, la résistance de l'assemblage à l'appui-tête, la résistance de l'assemblage au système d'inclinaison et la résistance au troisième point d'appui. À noter que les déformations plastiques sont permises, pourvu que le dossier ne se détruise pas. Le logiciel Pro/Engineer de PTC a permis la modélisation du problème.

Premièrement, pour la résistance générale, le problème est défini comme une poutre en flexion et la géométrie est simplifiée. Soixante-dix pourcent de la force de traction est imposé au troisième point d'appui, donc 2940 N, à une distance de 700 mm du système d'inclinaison. La contrainte maximale de flexion calculée est de 111 MPa, ce qui est inférieur à la limite élastique de 276 MPa de l'aluminium. Les simulations numériques donnent aussi des contraintes maximales de von Mises inférieures à la limite élastique.

Deuxièmement, pour la résistance de l'assemblage à l'appui-tête, l'intensité du cisaillement doit être vérifiée. La géométrie de l'appui-tête est simplifiée comme étant une paroi mince de 4.5 mm d'épaisseur. Une charge de 890 N est appliquée à une distance de 147 mm du centroïde de section du tube. Un facteur de sécurité (FS) de 17 est calculé, donc il n'y a aucune contrainte excessive induite par l'appui-tête. Les simulations numériques ont permis de faire une étude paramétrique de différents diamètres de tiges d'appui-tête en acier et en aluminium. Une tige en aluminium de 15.875 mm de diamètre permet de diminuer le poids du siège de 0.14 kg.

Troisièmement, l'assemblage du système d'inclinaison du dossier est composé de quatre boulons disposés à la verticale. C'est l'endroit le plus contraint de la structure. Quelques hypothèses sont avancées : le chargement est entièrement repris par un seul côté, les joints boulonnés sont de type portance et le problème reste dans le domaine plastique. Le chargement de 4200 N est à une distance de 700 mm de l'assemblage.

Trois modes de défaillance des boulons sont calculés : la rupture du boulon même, la pression diamétrale et le cisaillement du bord lisse. Le FS pour la pression diamétrale est relativement

faible, mais respecte tout de même la résistance du matériau. Pour la vérification numérique, une simulation de contact sur des pièces planes simplifiées et un chargement proportionnel au chargement réel, une plastification du matériau est observée au niveau du premier et du quatrième trou.

Des essais expérimentaux ont été réalisés afin de vérifier le mode de rupture comme étant ductile ou fragile. Sur le quatrième trou (le plus haut des quatre), une rupture ductile a été observée, autant pour une charge de 4480 N que pour une charge de 8250 N. La figure 4 montre que la déformation simulée et celle expérimentale est du même ordre de grandeur, mise à part l'orientation. La conception du joint est donc adéquate.

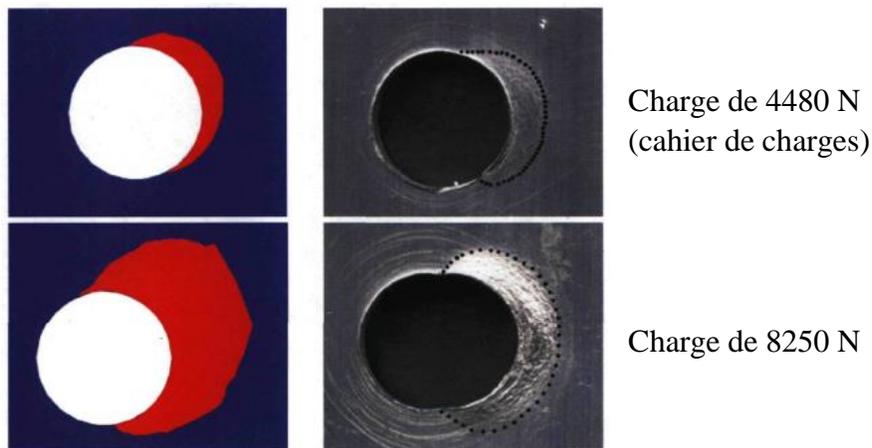


Figure 4 - Comparaison des déformations attendues et expérimentales sur le quatrième trou [1]

Finalement, pour la résistance au troisième point d'appui, la torsion doit être vérifiée. Le même calcul en cisaillement que l'appui-tête est calculé, qui donne un FS de 3.4. Cependant, les analyses numériques démontrent que la torsion à la jonction entre le support de ceinture et la membrure de la structure engendre un dépassement de la limite élastique.

La résistance en écrasement du tube est aussi à vérifier pour ce composant. Le calcul analytique ne démontre aucun cisaillement de la structure sur le pourtour de la rondelle de l'assemblage. Le facteur de levier de 4.2 offre un chargement de 17 640 N à la rupture du boulon.

Le mode de défaillance des boulons est aussi vérifié. Le FS du cisaillement du bord lisse de 2.75 est faible, mais est quand même supérieur à la limite. Une analyse numérique de contact entre la structure du dossier et un boulon soumis à une traction axiale est aussi réalisée. D'après les résultats, une fine couche sous le boulon se comprime au-delà de la limite élastique, mais reste dans le domaine ductile. Il n'y a pas de rupture fragile. À noter que ces simulations ont été faites à partir d'un boulon, alors que la fixation réelle comprend deux boulons. La résistance est alors conforme aux exigences.

5 FABRICATION, TESTS ET RÉSULTATS

À partir de plans dessinés, un prototype de dossier a été fabriqué. Un suivi rigoureux des étapes de fabrication a été nécessaire pour valider le potentiel de production et cibler les problèmes

potentiels. Le dossier du siège a par la suite été testé afin de caractériser sa résistance, de vérifier le respect des normes et de valider les calculs de la conception.

D’abord pour la fabrication, les étapes sont présentées à la figure 5. Après l’étape de l’extrusion, les tubes sont soumis à un traitement thermique pour atteindre l’état recuit (O). Ceci permet d’uniformiser les propriétés mécaniques pour ainsi augmenter la précision des simulations d’hydroformage. Ensuite, les tubes sont pliés pour donner la forme de base qui entre dans les moules d’hydroformage. À la suite de l’étape d’hydroformage avec matrices mobiles, les propriétés mécaniques de l’alliage à la résistance ultime sont insuffisantes. Une mise en solution et un vieillissement naturel sont alors nécessaires pour donner l’état stable T6 à l’alliage, ce qui augmente de près de 5 fois la limite élastique de la pièce. Finalement, quelques manipulations d’usinage sont nécessaires pour couper les embouts superflus et pour percer les trous des assemblages des accessoires extérieurs. À noter que si le système d’inclinaison est en acier, une couche de peinture pour la protection contre la corrosion galvanique est obligatoire.

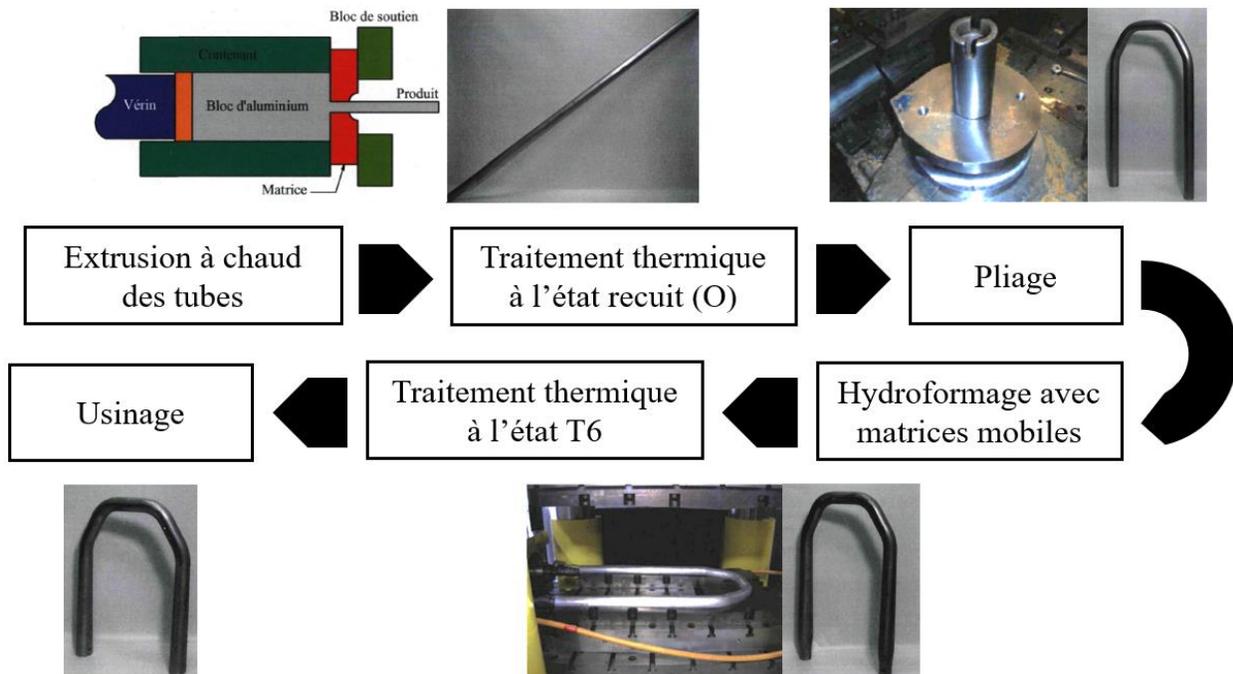


Figure 5 - Processus de fabrication de la structure du dossier [1]

Ensuite, six tests de résistance ont été faits sur cette structure afin de vérifier la justesse et la cohérence de la conception et de confirmer le respect des normes et du cahier de charges. Le dossier a été sollicité en traction sous les deux configurations de chargements de la figure 6 : cellule de charge attachée à une chaîne au troisième point d’appui (1) et cellule attachée à un simulateur de torse et une ceinture de sécurité en trois points (2). La cellule de charge a été calibrée avant chaque essai. De plus, le dossier est fixé au sol à partir des trous prévus pour le système d’inclinaison sous les deux configurations de la figure 7 : boulons qui traversent complètement le tube (A) et boulons qui traversent une seule paroi (B).

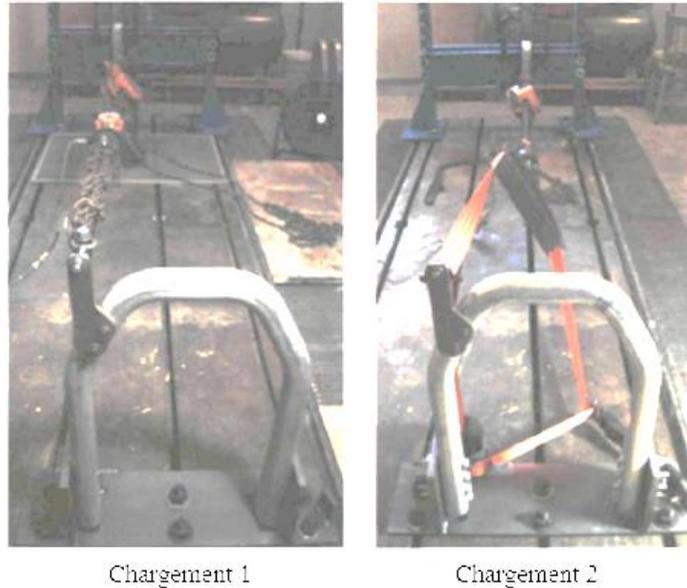


Figure 6 - Configuration de la cellule de chargement [1]

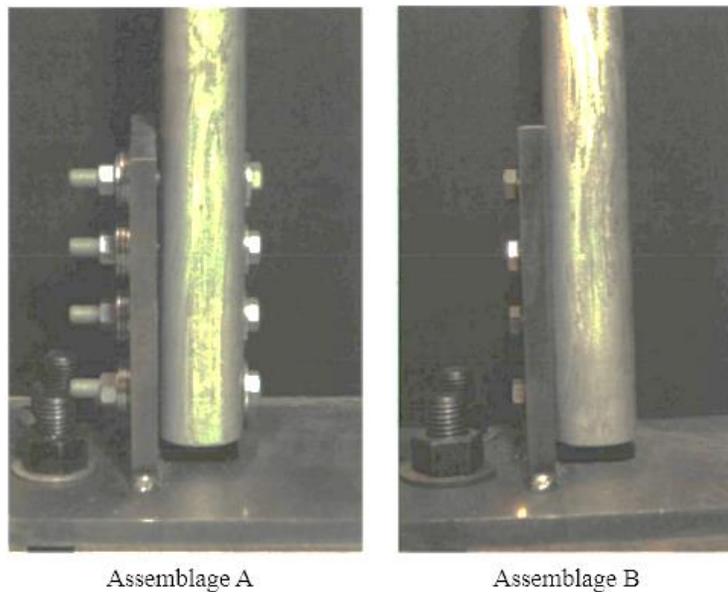


Figure 7 - Configuration de l'assemblage au système d'inclinaison [1]

Le test 1 a pour objectif de vérifier la résistance totale du dossier pour la configuration 1A. Un chargement de 4200 N en traction a été appliqué en 33 secondes et a été maintenu pendant 173 secondes. Le dossier résiste à cette force du cahier des charges.

Le test 2 a pour objectif de vérifier les contraintes imposées à 4200 N, de comparer avec les valeurs de conception et de vérifier l'évolution au-delà de 4200 N pour la configuration 1A. Un chargement de 4200 N en traction a été appliqué en 38 secondes, a été maintenu pendant 94 secondes et a été augmenté jusqu'à 6600 N par paliers de 400 N. Des jauges de déformation ont été placées aux endroits les plus contraints, soit en avant et en arrière des membrures à la flexion maximale.

Malgré un écart de 21 % à 35 % entre les valeurs expérimentales et les valeurs numériques, le dossier conserve son intégrité durant toute la période d'augmentation de charge et aucun trou de boulons n'a été déformé. Les résultats sont satisfaisants et répondent aux objectifs.

Le test 3 a pour objectif de vérifier la résistance du dossier pour la configuration 2A. Un chargement de 8400 N en traction a été appliqué en 53 secondes et a été maintenu pendant 93 secondes. Le dossier a soutenu la charge. Comme il n'a subi aucun bris, il est conforme aux normes.

Le test 4 a pour objectif de vérifier la résistance et le déplacement maximal du dossier pour un chargement plus contraignant. Avec la configuration d'essai 2B, un chargement de 8400 N en traction a été appliqué en 41 secondes et a été maintenu pendant 110 secondes.

À l'étape de conception, une déformation plastique a été calculée et simulée au niveau des trous de boulons du système d'inclinaison. Toutefois, l'expérience ne démontre aucune déformation plastique apparente. Aussi, le déplacement mesuré de 14.1 mm est largement inférieur à la valeur maximale de 355 mm imposée par les normes. Le dossier est ainsi conforme pour ces deux paramètres.

Le test 5 et le test 6 ont pour même objectif celui du test 4, mais pour d'autres conditions d'essai. Pour le test 5, sur la configuration 1B, un chargement de 4200 N en traction a été appliqué en moins de 60 secondes, a été maintenu pendant au moins 30 secondes et a été augmenté jusqu'à 9800 N par paliers de 400 N. Une déformation de 14 % d'augmentation du diamètre des trous de boulons les plus contraints a été observée avec un déplacement maximal de 20 mm. Le dossier a conservé tout de même son intégrité.

Pour le test 6, sur la configuration 1A, un chargement de 4200 N en traction a été appliqué en moins de 60 secondes, a été maintenu pendant au moins 30 secondes et a été augmenté jusqu'à 11 400 N par paliers de 800 N. Une déformation plus importante de 45 % d'augmentation du diamètre des trous de boulons les plus contraints a été observée avec un déplacement maximal de 25 mm. Le dossier a conservé tout de même son intégrité.

6 CONCLUSION

Un des changements recherchés dans l'industrie du transport est la diminution de la consommation des véhicules. Une solution pour répondre à une problématique énergétique mondiale est de diminuer le poids des véhicules, sans négliger la sécurité des occupants. Par exemple, utiliser des matériaux de fabrication plus légers et le port d'une ceinture de sécurité obligatoire dans les autocars sont des pistes à envisager.

L'aluminium offre un bon compromis poids-résistance. Qui plus est, l'aluminium produit au Québec est fabriqué à partir d'une énergie renouvelable. Utiliser l'aluminium local dans certains produits de consommation promet une économie d'énergie de transport, tout en étant une valeur ajoutée au produit.

Les résultats obtenus par rapport au poids et à la résistance dépassent les exigences normatives. Le dossier peut supporter trois fois la charge de conception, sans subir de déformations plastiques. De

plus, une réduction du poids du dossier de 48 % est obtenue en comparaison au modèle en acier sur le marché. Sa structure en tube d'alliage d'aluminium 6061-T6 a prouvé que ce matériau peut être transformé par l'hydroformage.

Pour optimiser ce travail, un second prototype moins conservateur pourrait être conçu. En diminuant les sections et l'épaisseur du tube, un poids encore plus faible pourrait être obtenu, tout en conservant une résistance respectant les exigences des normes. Ceci pourrait aussi diminuer les risques de problématiques liés à la transformation par hydroformage. Enfin, des simulations d'hydroformage supplémentaire d'un alliage d'aluminium à un état tel que fabriqué (état F) pourraient approfondir les connaissances de cette méthode de transformation en plus de diminuer le coût de fabrication des pièces. En effet, si les simulations s'avèrent concluantes, il ne serait pas nécessaire de faire un traitement thermique préhydroformage des tubes.

7 RÉFÉRENCES

- [1] D. Lapointe, « Conception d'un dossier de siège d'autobus en aluminium hydroformé, » M. Sc., Département de Génie Mécanique, Université Laval, Québec, 2010.
- [2] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, Key world energy statistics 2009, Paris, 2009, 80 p.
- [3] Perspectives économiques de l'OCDE no76, Évolution des prix du pétrole : moteurs, conséquences économiques et ajustement des politiques, 2005, 32 p.
- [4] G. Filion, « Fabrication virtuelle et expérimentale de tubes d'aluminium de formes complexes par hydroformage, » M. Sc., Département de Génie mécanique, Université Laval, Québec, 2011, 109 p.
- [5] H. Singh, *Fundamentals of hydroforming*. Society of Manufacturing Engineers, USA, 2003, 219 p.