



# Complément de conception pour un assemblage riveté de pièces en aluminium

Alain Chapdelaine, Ing.

CeiAI

9 décembre 2020

## Complément de conception pour un assemblage riveté de pièces en aluminium

Par Alain Chapdelaine ing.

### 1. Introduction

L'utilisation d'attaches mécaniques pour assembler des pièces en aluminium sera souvent préférée à la soudure compte-tenu des baisses de propriétés mécaniques, surtout en fatigue, observées dans les assemblages d'aluminium soudés.

La conception d'assemblages rivetés ou boulonnés touchant certains domaines comme par exemple des structures de bâtiments, d'ouvrages d'art, de réservoirs sous pression ou d'équipements aéronautiques doit suivre des normes spécifiques. Les démarches de conception présentées dans cet article ne se veulent pas une substitution du processus normé de conception dans ces secteurs mais plutôt un complément.

La facilité de mise en forme de l'aluminium contribue à l'utilisation grandissante de profilés extrudés aux formes personnalisées comportant souvent des zones fermées. Les rivets aveugles sont adaptés à l'assemblage de ce type de profilés puisqu'ils ne demandent l'accès pour la pose de l'attache et l'outillage qu'à partir d'un côté du joint.

Cet article traitera de considérations sur les modes de défaillance de joints rivetés pour compléter le processus de dimensionnement des rivets ou des pièces à assembler.

### 2. Charge en cisaillement

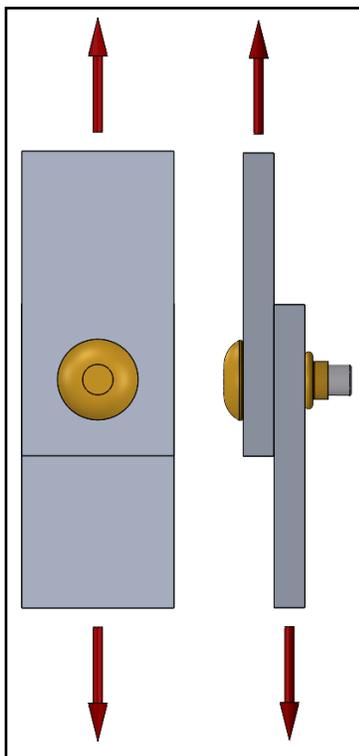


Figure 1 – Simple recouvrement

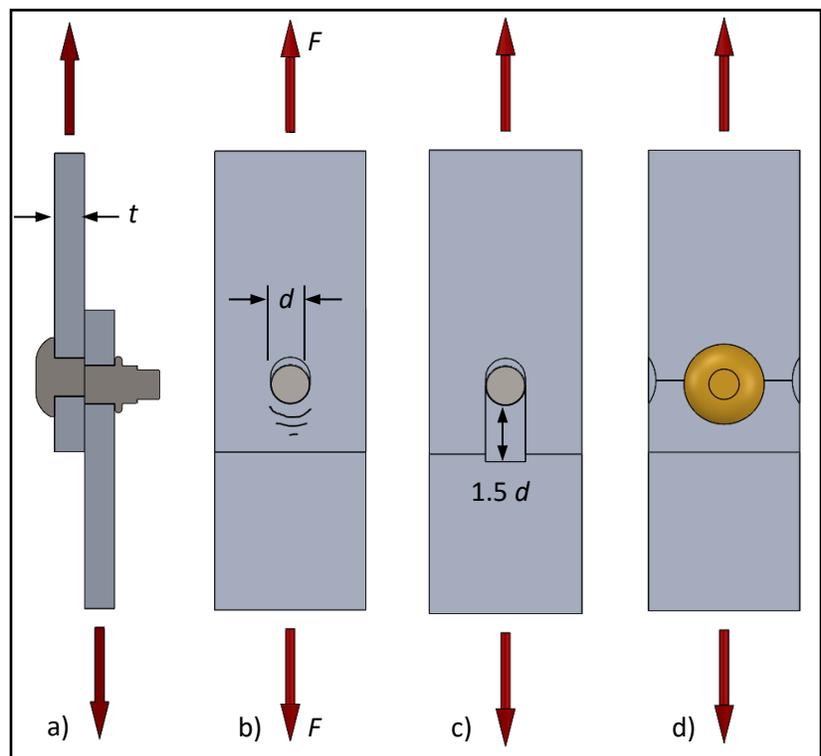


Figure 2 – Principaux modes de défaillance

Les rivets sont principalement adaptés pour des joints travaillant en cisaillement. Dans ces cas, les forces de séparation agissent parallèlement au plan de joint. Considérons un joint à simple recouvrement où la force appliquée sur les membrures cherche à cisailer les rivets dans le plan de jonction (Figure 1).

Les principaux modes de défaillance qui peuvent survenir sont : le bris en cisaillement du rivet (Figure 2a), l'affaissement de la membrure dans la zone d'appui radial du rivet (Figure 2b), la dislocation de la membrure près de la bordure (Figure 2c) et la déformation de la membrure dans sa section nette (Figure 2d).

- Bris en cisaillement du rivet (Figure 2a)

Les rivets aveugles commercialement disponibles sont formés d'un assemblage de pièces en acier haute résistance, transformées et comportant des résistances de base variées. Nous utiliserons des valeurs mesurées de force de résistance du rivet en cisaillement ( $T_r$ ) ou en arrachement ( $F_r$ ) qui sont généralement fournies par le manufacturier de rivets.

- Affaissement de la membrure dans la zone d'appui radial du rivet (Figure 2b)

La distribution des efforts de compression dans la zone d'appui radial entre le rivet et la membrure n'est pas uniforme. Les zones où la déformation sera maximale seront soumis à des conditions triaxiales de chargement. Pour simplifier, nous définissons une contrainte moyenne d'appui radial (« bearing stress »,  $\sigma_b$ ) comme le ratio de la force de cisaillement agissant dans le joint ( $F$ ) sur la surface projetée de la zone d'appui radial ( $A_b$ ). Dans le cas de pièces en aluminium, la limite élastique d'appui radial ( $\sigma_{by}$ ) sera typiquement 1.6 fois la limite élastique ( $\sigma_y$ ) de l'alliage considéré. Si les pièces à assembler n'ont pas la même épaisseur, la force de résistance d'appui radial ( $F_b$ ) la plus faible sera observée sur la pièce la plus mince.

$$F / A_b = \sigma_b \quad \text{ainsi} \quad F_b = A_b \sigma_{by} = 1.6 d t \sigma_y$$

- Dislocation de la membrure près de la bordure (Figure 2c)

En conservant une distance minimale de  $1.5d$  entre la circonférence du corps du rivet et la bordure (ou  $2d$  entre le centre du trou et la bordure), la force requise pour cisailer chacune des deux faces parallèles de la bordure ( $A_d$ ) sera maintenue indépendamment plus grande que la force requise pour affaisser la zone d'appui radial ( $A_b$ ). L'analyse de ce mode de défaillance pourra alors être omis.

$$\begin{aligned} 2 A_d \tau_y &> A_b \sigma_{by} \\ 2 (1.5 d t) (0.6 \sigma_y) &> (d t) (1.6 \sigma_y) \\ 1.8 &> 1.6 \end{aligned}$$

- Déformation de la membrure dans sa section nette (Figure 2d)

Dans le cas d'un chargement cyclique, la résistance en fatigue sera fonction, entre autres, des effets de concentration de contraintes et des maxima locaux de contraintes. Ce type d'analyse n'est pas abordé dans cet article. Cependant, puisque l'aluminium est un matériel ductile, notons le cas d'un chargement statique où la résistance élastique de la membrure ( $F_y$ ) pourra être approximée en calculant la force

requis pour que la contrainte moyenne dans la section nette de la membrure ( $A_n$ ) atteigne la limite élastique ( $\sigma_y$ ).

$$F_y = A_n \sigma_y = (w - d) t \sigma_y$$

En comparant la résistance élastique ( $F_y$ ) à la résistance d'appui radial ( $F_b$ ) de la membrure, nous pouvons trouver la dimension de rivet qui optimise la résistance globale du joint. Un rivet trop petit fera en sorte que la résistance d'appui radial limitera la résistance du joint alors qu'un rivet trop gros limitera la résistance élastique de la membrure dans sa section nette. Le diamètre de rivet sera donc optimal lorsque :

$$F_y = F_b$$

$$(w - d) t \sigma_y = 1.6 d t \sigma_y$$

$$w = 2.6 d$$

Ainsi, la résistance de joint optimale est obtenue lorsque la largeur de la membrure ( $w$ ) est 2.6 fois le diamètre nominal du rivet ( $d$ ). En transposant ce résultat sur un joint de plaques beaucoup plus larges, nous obtenons l'espacement optimal des rivets d'une rangée simple disposée le long du joint : une distance centre à centre de  $2.6 d$ .

### 3. Mode préférentiel de défaillance : éviter le bris des rivets

Pour concevoir le joint, nous commençons généralement par trouver une combinaison de nombre et de dimension nominale de rivets qui fera en sorte que la charge prescrite ( $F$ ) demeurera sécuritairement inférieure ( $\eta$ ) à la force de résistance en cisaillement ( $T_r$ ) offerte par le nombre de rivets ( $n$ ) de même qu'à la force de résistance des appuis radiaux dans la membrure ( $n F_b$ ). Plusieurs solutions pourront fournir les résistances de joint suffisantes.

Tableau 1 – Résistance des rivets aveugles Magna-Bulb de Huck

Diamètre nominal $d$ (po)	Résistance en cisaillement $T_r$ (lbf)
3/16	1 950
1/4	3 500
5/16	5 000

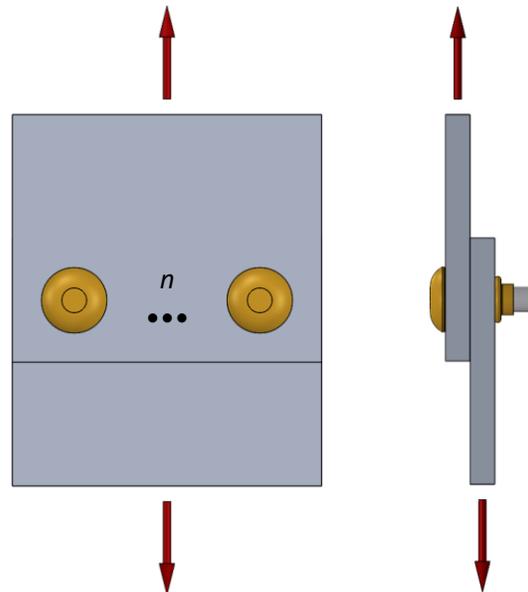


Figure 3 – Exemple de calcul

Dans l'exemple de la Figure 3, on désire utiliser des rivets Huck Magna-Bulb pour joindre deux plaques d'aluminium 6061-T6 ( $\sigma_y = 35\,000$  psi) d'épaisseur ( $t$ ) de 0.20 po qui auront à retenir, avec un facteur de sécurité ( $\eta$ ) de 2.0, une charge ( $F$ ) en tension de 2 500 lbf. Les calculs suivants montrent que deux rivets Magna-Bulb 1/4 feraient tout aussi bien l'affaire que trois rivets Magna-Bulb 3/16 pour supporter la charge prescrite.

$$F < n T_r / \eta \quad \text{et} \quad F < n F_b / \eta = n 1.6 d t \sigma_y / \eta$$

Rivets 3/16 :  $2\,500 < n 1\,950 / 2.0$  et  $2\,500 < n 1.6 \times 0.1875 \times 0.2 \times 35\,000 / 2.0$   
 $2.56 < n$  et  $2.38 < n$

3 rivets Magna-Bulb 3/16 seraient requis

Rivets 1/4 :  $2\,500 < n 3\,500 / 2.0$  et  $2\,500 < n \times 1.6 \times 0.25 \times 0.2 \times 35\,000 / 2.0$   
 $1.43 < n$  et  $1.79 < n$

2 rivets Magna-Bulb 1/4 seraient requis

Il est toutefois souhaitable que la résistance en cisaillement des rivets ( $T_r$ ) dépasse la résistance à l'affaissement de la zone d'appui sur la membrure ( $F_b$ ). En effet, dans le contexte d'un assemblage comportant de nombreux rivets, nous voulons éviter que l'application locale d'une charge entraîne le cisaillement d'un rivet et le transfert soudain de charge aux rivets voisins entraînant potentiellement une séparation complète des pièces assemblées à la suite d'une cascade de bris de rivets. Par contre, si la membrure se déforme localement avant que le rivet ne se cisaille, cela permettra une certaine redistribution de la charge sur les rivets voisins tout en continuant de supporter localement une partie de la charge, certes dans un trou déformé, mais évitant ainsi un bris généralisé.

Cette condition préférentielle sur les modes de défaillance est vérifiée lorsque :

$$T_r > F_b = 1.6 d t \sigma_y$$

Le tableau suivant rapporte les modes de défaillance pour les rivets et les membrures dans l'exemple précédant. Nous constatons que les rivets 3/16 ne satisferont pas cette condition de mode préférentiel de défaillance alors que les plus gros rivets la satisferont.

Tableau 2 – Comparaison des modes de défaillance

Diamètre nominal $d$ (po)	Résistance en cisaillement $T_r$ (lbf)	Condition	Résistance d'appui radial $F_b$ (lbf)
3/16	1 950	<	2 100
1/4	3 500	>	2 800
5/16	5 000	>	3 500

Comme  $T_r$  varie généralement selon  $d^2$  alors que  $F_b$  varie selon  $d$ , cette préférence pour le mode de défaillance de l'affaissement de la zone d'appui radial fournira le diamètre nominal minimum des rivets souhaitables à utiliser pour l'épaisseur des membrures à joindre. Notons que d'autres considérations, tel que l'interférence de la tête ou de la tige résiduelle du rivet avec les pièces environnantes, auront plutôt tendance à limiter la taille désirée des rivets. Dans notre exemple de calcul, nous concluons que les rivets Magna-Bulb 1/4 sont les plus adaptés pour assembler des plaques d'aluminium 6061-T6 de 0.20 po d'épaisseur.

Dans le contexte d'un grand assemblage complexe, la charge prescrite qui agit localement sur un joint particulier n'est généralement pas connue. La vérification du mode préférentiel de défaillance constituera donc la première étape pour dimensionner les rivets selon l'épaisseur des membrures.

#### 4. Charge en arrachement

Compte-tenu qu'ils développent une surface d'appui axial limitée, les rivets aveugles ne sont généralement pas choisis pour une application dans laquelle la charge agit principalement dans la direction axiale du rivet. Toutefois, pour des raisons d'accès lors de l'assemblage, ces rivets demeurent souvent les seuls qui offrent une solution praticable.

Considérons, à la Figure 4, un arrangement où un connecteur en « U » est attaché sur un profilé fermé avec la tête secondaire du rivet qui s'est formée à l'intérieur du profilé.

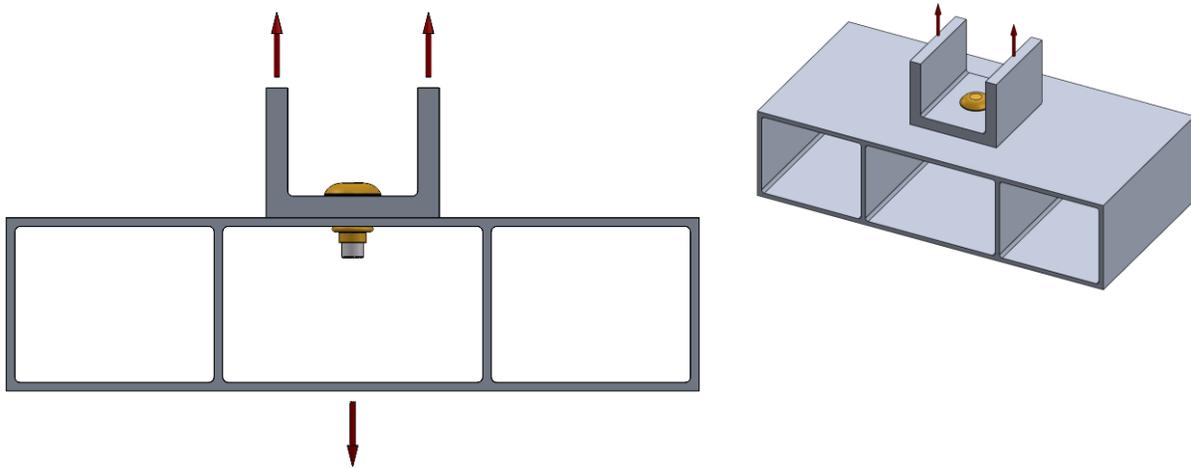


Figure 4 – Joint en arrachement

La défaillance du joint peut survenir de deux façons. Premièrement, le manchon du rivet pourrait céder et casser sous l'effort de tension lorsque la force atteint la limite en arrachement du rivet ( $F_r$ ). Deuxièmement, l'épaulement du côté aveugle du rivet pourrait déformer localement la membrure suffisamment pour laisser passer complètement le rivet (Figure 6). La résistance d'appui axial ( $F_a$ ) qu'offrira la membrure variera principalement selon son épaisseur et selon la dimension de la surface d'appui axial du rivet. Ce deuxième mode de défaillance est plus complexe et donc difficile à prédire avec des méthodes analytiques.

Comme ces deux modes de défaillance mènent à une séparation complète des pièces, il serait optimal, d'un point de vue de conception, d'utiliser un rivet dont la résistance en arrachement serait similaire à la résistance d'appui axial offerte par la membrure du côté secondaire.

## 5. Essais instrumentés en laboratoire

Pour évaluer la résistance en traction d'un tel assemblage, des essais en laboratoire ont d'abord été organisés. Des plaques de 12 po x 12 po, d'épaisseur variant de 0.061 po à 0.125 po, en aluminium 6061-T6 ont été assemblées à un ancrage à l'aide d'un rivet aveugle Huck Magna-Bulb de 5/16 po. Le tout monté sur une colonne de traction instrumentée de façon à ce que l'ancrage puisse suivre le mouvement vertical d'un vérin hydraulique pendant que la plaque reste fixée sur la table d'essai. Le montage mesure et enregistre la force de traction verticale requise pour soulever le rivet (Figure 5).

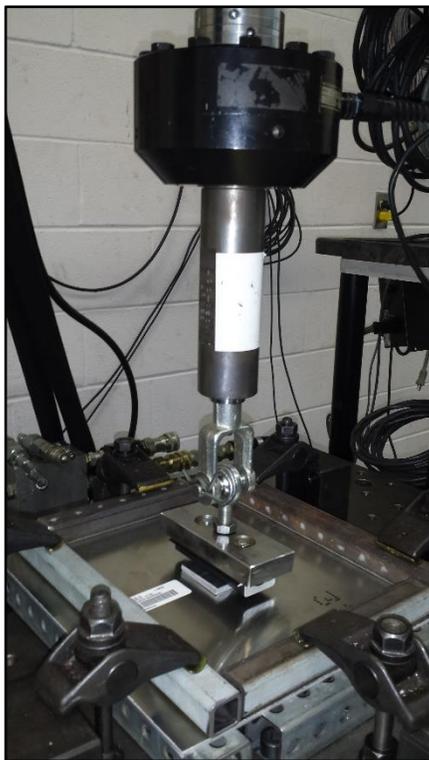


Figure 5 – Essais en laboratoire



Figure 6 – Défaillance sur l'appui axial de la membrure

La résistance en arrachement ( $F_r$ ) annoncée par le manufacturier pour le rivet Magna-Bulb 5/16 est de 2 960 lbf. Pour les plaques de 0.61 po, 0.79 po et 0.89 po, la défaillance de l'assemblage est survenue lorsque l'épaulement du côté aveugle du rivet est passé au travers de la plaque avec une force appliquée qui était inférieure à la résistance du rivet (Figure 6). Pour les plaques de 0.125 po, c'est plutôt le rivet qui s'est brisé juste avant qu'il ne réussisse à passer à travers la plaque avec des forces appliquées avoisinant la résistance annoncée du rivet. Les résultats des essais en laboratoire montrent que la résistance d'appui axial de la plaque augmente avec son épaisseur (Figure 7). La forme de la tête primaire du rivet : tête bombée ou tête fraisée n'influence pas la force de résistance d'appui axial offerte par la plaque du côté secondaire.

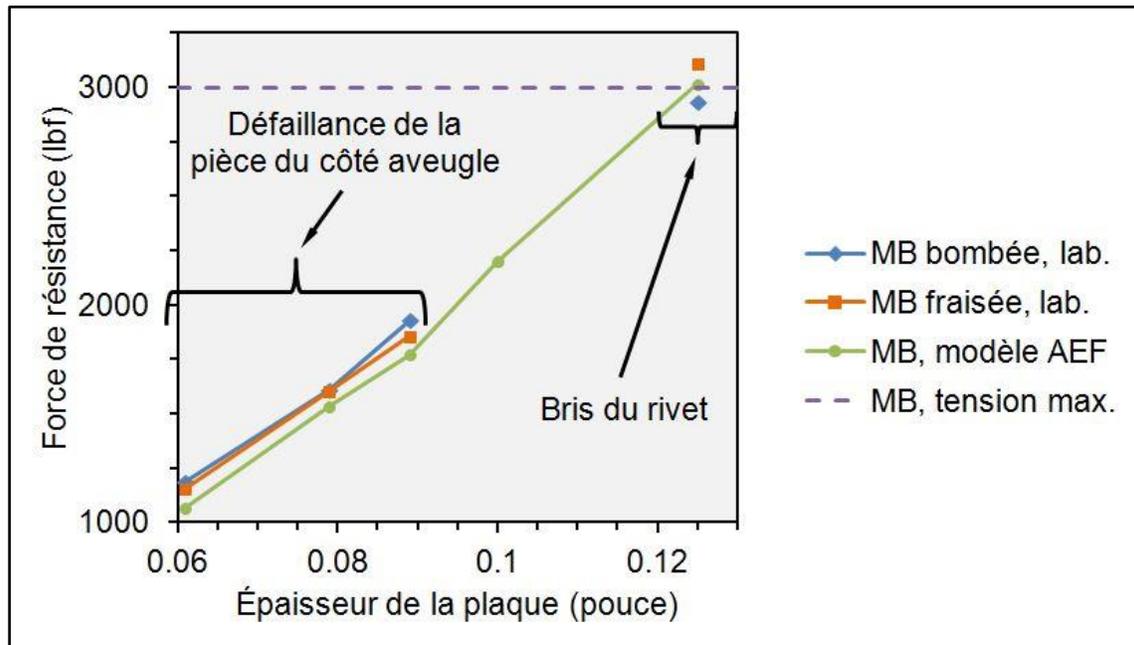


Figure 7 – Mesure de résistance du joint en arrachement

## 6. Modélisation mathématique d'un essai en arrachement

Le travail de modélisation consistait à reproduire les mêmes conditions locales de chargement sur une représentation axisymétrique simplifiée de l'appui d'un rivet Magna-Bulb 5/16 sur une plaque de diverses épaisseurs. Comme première approche, l'interaction de la plaque avec l'ancrage est négligée pour ces cas en traction, le modèle n'incluant pas la géométrie de l'ancrage. Toutefois, plusieurs non-linéarités ont été considérées dans le modèle : un domaine de déformation plastique pour la plaque, un contact avec friction entre la plaque et le bulbe secondaire du rivet ainsi que les considérations pour de grands déplacements. La force de traction requise pour déplacer le rivet verticalement a été calculée sur une cinquantaine de points le long de la trajectoire qui le forçait à passer au travers du trou de la plaque.

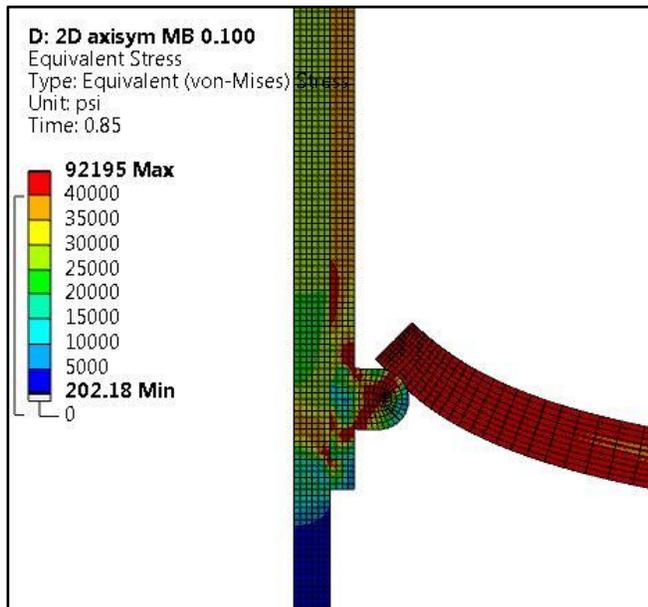


Figure 8 – Modélisation d'un cas en arrachement

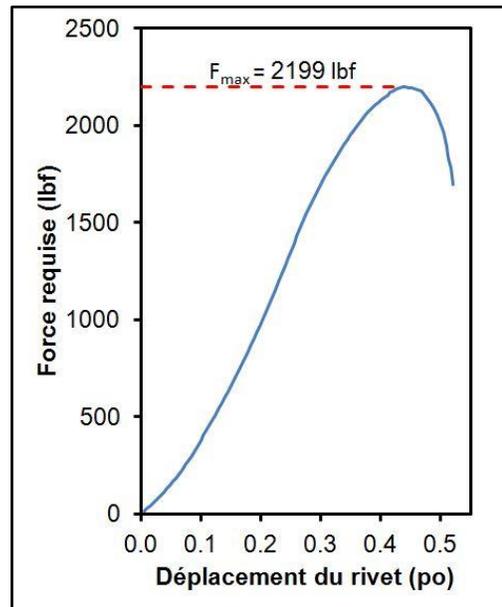


Figure 9 – Résistance d'appui axial

La Figure 8 présente un exemple de résultat de contour de contrainte équivalente pour une plaque en aluminium 6061-T6 de 0.100 po d'épaisseur avec un rivet Magna-Bulb 5/16 po. Le sommet rapporté sur la courbe de la force versus le déplacement à la Figure 9 correspond à la résistance d'appui axial ( $F_a$ ) prédite par le modèle. La Figure 7 rapportait aussi les valeurs de résistance d'appui axiale prédites par le modèle pour les mêmes quatre épaisseurs de plaque testées dans les essais de laboratoire (courbe verte). Le modèle s'avère donc, malgré les simplifications géométriques, assez fiable pour estimer la résistance en arrachement de ce type de joint riveté.

Les rivets Magna-Bulb 5/16 sont donc un choix optimal pour assembler un connecteur sur une plaque d'aluminium d'alliage 6061-T6 de 0.125 po d'épaisseur puisque la résistance annoncée en arrachement du rivet ( $F_r = 2\,960$  lbf) est similaire à la résistance prédite d'appui axial de la plaque ( $F_a = 3\,018$  lbf).

## 7. Aide à la conception de profilé

La modélisation de joint riveté est utile lors de la conception d'un profilé et de sa matrice d'extrusion. Reprenons l'exemple de la Figure 4 avec un profilé rectangulaire comportant des zones fermées, en aluminium 6061-T6, aux parois d'une épaisseur nominale de 0.100 po et sur lequel on doit joindre un ancrage soumis à des forces en traction. L'ancrage pourrait être riveté au profilé à l'aide d'un rivet aveugle structural Huck BOM 5/16 po affichant une résistance en arrachement ( $F_r$ ) de 5 200 lbf. Notons que la géométrie fermée d'un long profilé commanderait l'utilisation de rivets aveugles.

Si nous joignons l'ancrage sur le profilé aux parois nominales de 0.100 po avec ce rivet BOM, la résistance d'appui axial ( $F_a$ ) de l'assemblage sera limitée aux environs de 2 200 lbf, force à laquelle le rivet passera à travers le profilé. Cette valeur de résistance est basée sur la prédiction du modèle concernant la résistance offerte par une plaque de même épaisseur au passage d'un rivet Magna-Bulb de dimension

nominale identique (Figure 9). Une situation qui serait non optimale puisque la résistance en arrachement du rivet BOM serait sous-utilisée.

En ajoutant au profilé une surépaisseur localisée dans la zone de rivetage, nous augmenterons de façon significative la résistance d'appui axial du profilé sans trop alourdir l'assemblage. Le modèle peut vérifier la résistance d'appui axial du profilé pour différents types de surépaisseur et trouver les dimensions requises du renfort dans la zone de rivetage qui fournissent au profilé une résistance d'appui axial ( $F_a$ ) similaire à la limite en traction du rivet ( $F_r$ ) choisi. La Figure 10 présente un arrangement similaire avec un profilé de même épaisseur nominale mais renforcé dans la zone de rivetage avec une bande de 0.75 po de large à 0.225 po d'épaisseur.

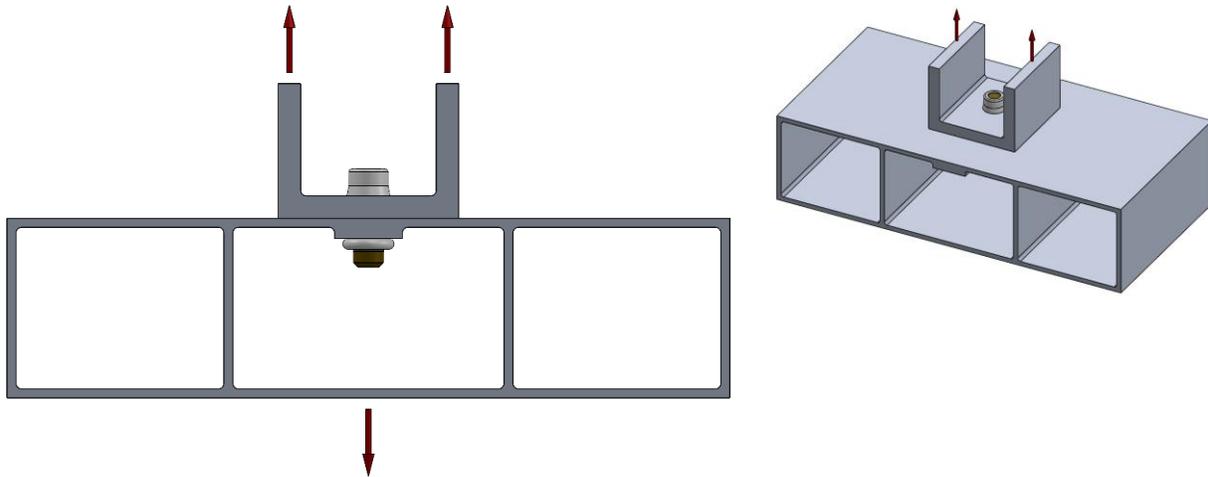


Figure 10 – Modification du profilé pour améliorer sa résistance d'appui axial

La Figure 11 montre la géométrie locale modélisée, simplifiée cette fois-ci sur deux plans de symétrie (un quart du domaine), avec les contours de déformations plastiques dans la plaque renforcée. Notons que les déformations dans le rivet d'acier haute résistance ont été considérés dans le domaine élastique seulement. Le modèle prédit que la résistance d'appui axial du profilé modifié sera de 5 140 lbf (Figure 12).

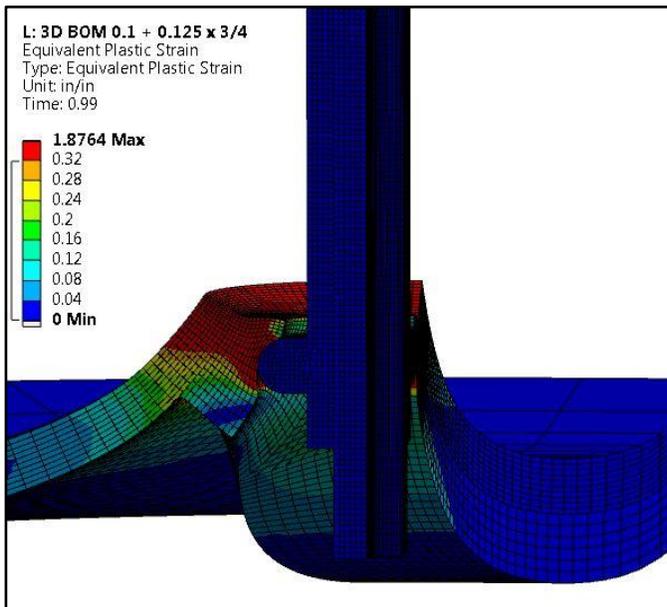


Figure 11 – Modélisation d'un profilé renforcé

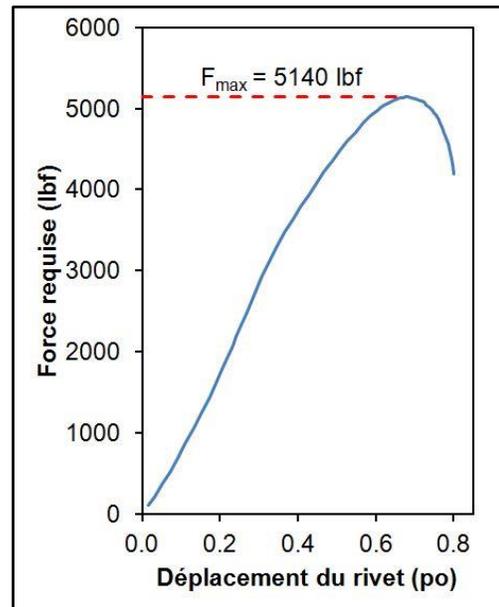


Figure 12 – Résistance modifiée d'appui axial

La résistance globale du joint en arrachement sera donc plus que doublée, optimale pour le rivet choisi puisque la résistance d'appui axial du profilé ( $F_o = 5\,140$  lbf) sera dorénavant similaire à celle annoncée en arrachement du rivet ( $F_r = 5\,200$  lbf) et obtenue sans ajout de pièce supplémentaire au prix d'une augmentation marginale du poids de l'assemblage.

## 8. Conclusions

Les modes de défaillance, autant en cisaillement qu'en arrachement, sur un assemblage riveté de pièces en aluminium ont été comparés, analysés, mesurés en laboratoire et modélisés mathématiquement.

La comparaison des modes de défaillance en cisaillement nous a permis de trouver l'espacement optimal des rivets ( $2.6 d$ ) dans un joint par recouvrement de pièces d'aluminium.

Afin de minimiser le risque de défaillance généralisée, les rivets devraient être dimensionnés de façon à ce que la résistance en cisaillement du rivet dépasse la résistance d'appui radial offerte par les membrures.

Les travaux de modélisation mathématique d'assemblage riveté peuvent soutenir le processus de conception de profilé d'aluminium et ainsi aider à optimiser la résistance des joints travaillant en arrachement.