Document de support à la présentation :

Conception des charpentes d’aluminium

Module 4 – Pièces en traction

Contenu développé par :

**Ahmed Rahem, ing., Ph. D.**

Professeur au Département des sciences appliquées de l’UQAC

Table des matières

[Note 4](#_Toc127197350)

[A- Introduction 5](#_Toc127197351)

[Diapositive 6 et 7 : 5](#_Toc127197352)

[Diapositive 8 et 9: 6](#_Toc127197353)

[Diapositive 10 : 7](#_Toc127197354)

[Diapositive 11 : 8](#_Toc127197355)

[Diapositive 12 : 8](#_Toc127197356)

[B- Classification des pièces d’aluminium travaillant en traction 9](#_Toc127197357)

[Diapositive 15 : 9](#_Toc127197358)

[Diapositive 16 et 17 : 11](#_Toc127197359)

[Diapositive 20 : 11](#_Toc127197360)

[Diapositive 25 : 12](#_Toc127197361)

[C- Comportement des pièces tendues en aluminium 13](#_Toc127197362)

[Diapositive 31 : 13](#_Toc127197363)

[Diapositive 33 : 13](#_Toc127197364)

[Diapositive 34 : 14](#_Toc127197365)

[Diapositive 35 : 15](#_Toc127197366)

[D- Différence entre le comportement en traction des pièces en acier et celui des pièces en aluminium 18](#_Toc127197367)

[Diapositive 38 et 39 : 18](#_Toc127197368)

[E- Définition de l’aire d’une section d’une pièce en traction 19](#_Toc127197369)

[Diapositive 42 : 19](#_Toc127197370)

[Diapositive 44 : 20](#_Toc127197371)

[Diapositive 45 : 21](#_Toc127197372)

[Diapositive 46 : 23](#_Toc127197373)

[Diapositive 47 : 23](#_Toc127197374)

[Diapositive 48 : 24](#_Toc127197375)

[Diapositive 49 : 25](#_Toc127197376)

[Diapositive 50 : 25](#_Toc127197377)

[Diapositive 51 : 27](#_Toc127197378)

[Diapositive 53, 54 et 55 : 28](#_Toc127197379)

[Diapositive 56 : 30](#_Toc127197380)

[Diapositive 57, 58, 59 et 60 : 31](#_Toc127197381)

[Diapositive 62 et 63 : 32](#_Toc127197382)

[F- Définition de l’aire d’une section d’une pièce en traction soudée 34](#_Toc127197383)

[Diapositive 66 : 34](#_Toc127197384)

[Diapositive 67 : 36](#_Toc127197385)

[Diapositive 68 : 36](#_Toc127197386)

[Diapositive 69 : 37](#_Toc127197387)

[Diapositive 70 : 37](#_Toc127197388)

[Diapositive 71 : 38](#_Toc127197389)

[Diapositive 72 : 39](#_Toc127197390)

[Diapositive 73 et 74 : 40](#_Toc127197391)

[Diapositive 76 : 41](#_Toc127197392)

[Diapositive 77 : 43](#_Toc127197393)

[Diapositive 78 : 44](#_Toc127197394)

[G- Mode de mise hors service par plastification ou fracture (états limites ultimes) 46](#_Toc127197395)

[Diapositive 81 : 46](#_Toc127197396)

[Diapositive 82 et 83 : 48](#_Toc127197397)

# Note

Avec la permission de monsieur Denis Beaulieu, une certaine partie du matériel est reproduite des manuels *Calcul des charpentes d’aluminium* et *Les caractéristiques de l’aluminium structural*. Bien que l'utilisation du matériel ait été autorisée, monsieur Beaulieu n'est pas responsable de la manière dont les données sont présentées, ni de toute représentation ou interprétation.

# Introduction

## Diapositive 6 et 7 :

Quand l’assemblage d’une pièce en traction se fait à l’aide de boulons, on doit tenir compte de la présence des trous qui modifient le comportement de la pièce. Comme ils réduisent l’aire de la section disponible pour résister à la traction, il faut non seulement considérer l’aire de la section brute ($A\_{g}$), mais aussi l’aire de la section nette ($A\_{n}$) au droit de l’assemblage.

**4.1 Introduction**

Ce chapitre est le premier de la série portant sur le calcul des pièces constituant les charpentes d’aluminium. On distingue essentiellement les poutres, les poteaux, les pièces de contreventement et les assemblages, mais il est possible de décomposer plus finement, si on classe les éléments structuraux en fonction des efforts qui les sollicitent.

On identifie ainsi les pièces sollicitées en traction, en compression, en flexion, en torsion et en flexion composée. Dans ce dernier cas, la pièce fléchie peut aussi être sollicitée en traction, en compression ou en torsion. S’ajoutent à cette liste, les pièces soumises à des sollicitations alternées. Les assemblages, pour leur part, sont classés en deux grandes catégories : les assemblages mécaniques et les assemblages soudés. Cette classification définit le contenu du volume.

Il convient, au départ, d’aborder l’élément le plus facile à dimensionner, soit la pièce en traction. Une pièce soumise à un effort de traction pure est une pièce sollicitée par une force appliquée au centre de gravité de la section qui tente d’allonger la pièce. La distribution des contraintes est en principe uniforme sur toute la section.

Le calcul des pièces tendues ne semble pas difficile, à première vue, mais les problèmes apparaissent lorsqu’on examine ce qui se passe au droit des assemblages qui sont situés aux extrémités de la pièce et, parfois, le long de celle-ci. Dans ces zones de faible longueur par rapport à la longueur totale de la pièce, les contraintes ne sont pas uniformes.

Dans le dimensionnement des pièces sollicitées en traction, il faut donc empiéter sur les chapitres réservés aux assemblages, de façon à tenir compte des différents phénomènes qui affectent la résistance et le comportement de la pièce. Ils sont multiples, mais on ne s’attardera qu’à l’étude des principaux : rupture sur la section nette, excentricités et pertes de résistance liées à la présence de soudures. Le texte de ce chapitre servira d’introduction aux chapitres VII et VIII[[1]](#footnote-1) qui couvrent en détail le dimensionnement des assemblages mécaniques et soudés.

## Diapositive 8 et 9:

Le calcul des pièces tendues ne semble pas difficile, à première vue, mais les problèmes apparaissent lorsqu’on examine ce qui se passe au droit des assemblages qui sont situés aux extrémités de la pièce et, parfois, le long de celle-ci. Dans ces zones de faible longueur par rapport à la longueur totale de la pièce, les contraintes ne sont pas uniformes.

Dans le dimensionnement des pièces sollicitées en traction, il faut donc empiéter sur les chapitres réservés aux assemblages, de façon à tenir compte des différents phénomènes qui affectent la résistance et le comportement de la pièce. Ils sont multiples, mais on ne s’attardera qu’à l’étude des principaux : rupture sur la section nette, excentricités et pertes de résistance liées à la présence de soudures. Le texte de ce chapitre servira d’introduction aux chapitres VII et VIII qui couvrent en détail le dimensionnement des assemblages mécaniques et soudés.

Une membrure en traction doit être en mesure de supporter le plus adéquatement possible la charge à laquelle elle est soumise. La résistance pondérée à la traction (Tr) de la pièce doit égaler ou excéder la force de traction pondérée (Tf) appliquée sur celle-ci.

$$T\_{r} \geq T\_{f}$$

Cette vérification est relativement simple lorsque la force de traction sollicitant la pièce est appliquée au centre de gravité de la section en traction. La pièce est alors soumise à un effort de traction pur. Si ce n’est pas le cas, il faudra tenir compte de l’excentricité, soit la distance entre le point d’application de la force de traction et le centre de gravité de la pièce. La pièce peut aussi être soumise à une force axiale et, en plus, à des moments de flexion appliqués aux extrémités de celle-ci. Dans ce dernier cas, il y aura un effort de flexion combiné à l’effort de traction. Ce type de sollicitation combinée sera traité dans le chapitre 5 sur les éléments en flexion.

De plus, les conditions de liaison et la disposition des éléments d’assemblage par rapport aux extrémités de la pièce en traction vont influencer les critères de calcul et la vérification des pièces en traction. Ces assemblages sont classés en deux catégories, soit les assemblages soudés et les assemblages mécaniques et, plus particulièrement dans ce dernier cas, les assemblages boulonnés. La disposition des éléments d’assemblages boulonnés par rapport à l’élément en traction peut engendrer une excentricité par rapport à l’axe de la pièce. L’analyse de la géométrie de l’assemblage permet de déterminer et de prendre en compte cette excentricité dans les formules de calculs. Pour les assemblages soudés, il faudra tenir compte de la perte de résistance de l’aluminium dans les zones affectées thermiquement par les soudures. Dans ces zones, la perte de résistance peut être très importante.

**Dans ce chapitre, nous verrons les équations de calculs des pièces en traction. Les équations de vérification des assemblages et des pièces de transfert seront vues dans le chapitre sur les assemblages.**

## Diapositive 10 :

Une membrure en traction doit être en mesure de supporter le plus adéquatement possible la charge à laquelle elle est soumise. La résistance pondérée à la traction (Tr) de la pièce doit égaler ou excéder la force de traction pondérée (Tf) appliquée sur celle-ci.

$$T\_{r} \geq T\_{f}$$

Cette vérification est relativement simple lorsque la force de traction sollicitant la pièce est appliquée au centre de gravité de la section en traction. La pièce est alors soumise à un effort de traction pur. Si ce n’est pas le cas, il faudra tenir compte de l’excentricité, soit la distance entre le point d’application de la force de traction et le centre de gravité de la pièce. La pièce peut aussi être soumise à une force axiale et, en plus, à des moments de flexion appliqués aux extrémités de celle-ci. Dans ce dernier cas, il y aura un effort de flexion combiné à l’effort de traction. Ce type de sollicitation combinée sera traité dans le chapitre 5 sur les éléments en flexion.

De plus, les conditions de liaison et la disposition des éléments d’assemblage par rapport aux extrémités de la pièce en traction vont influencer les critères de calcul et la vérification des pièces en traction. Ces assemblages sont classés en deux catégories, soit les assemblages soudés et les assemblages mécaniques et, plus particulièrement dans ce dernier cas, les assemblages boulonnés. La disposition des éléments d’assemblages boulonnés par rapport à l’élément en traction peut engendrer une excentricité par rapport à l’axe de la pièce. L’analyse de la géométrie de l’assemblage permet de déterminer et de prendre en compte cette excentricité dans les formules de calculs. Pour les assemblages soudés, il faudra tenir compte de la perte de résistance de l’aluminium dans les zones affectées thermiquement par les soudures. Dans ces zones, la perte de résistance peut être très importante.

**Dans ce chapitre, nous verrons les équations de calculs des pièces en traction. Les équations de vérification des assemblages et des pièces de transfert seront vues dans le chapitre sur les assemblages.**

## Diapositive 11 :

Cette recommandation permet d’éviter la formation de chaînettes et une tendance à la vibration de l’élément tendu lorsque la charge de traction qui le sollicite est nulle ou lorsqu’elle varie selon un cycle rapide

Il ne suffit pas de vérifier les états limites de rupture de la section nette au droit des assemblages et de plastification de la section brute, pour obtenir une pièce en traction qui résiste de façon adéquate aux charges qui lui sont imposées. Il faut, de plus, vérifier les états limites d’utilisation. **Pour les pièces en traction, il suffit de s’assurer que la pièce ne s’allonge pas de façon excessive et que son élancement respecte les limites prescrites.**

## Diapositive 12 :

**Annexe H de la norme CSA S157-19 (page 164)**

Cette recommandation permet d’éviter la formation de chaînettes et une tendance à la vibration de l’élément tendu lorsque la charge de traction qui le sollicite est nulle ou lorsqu’elle varie selon un cycle rapide.

# Classification des pièces d’aluminium travaillant en traction

## Diapositive 15 :

**4.2 Classification et utilisation des pièces en traction**

On peut classer les pièces travaillant en traction en quatre catégories, selon leur utilisation: les câbles, les tubes, les barres et plaques et, enfin, les profilés à section ouverte et à section composée (figure 4.1 – voir acétate).

**Figure 4.1 – Exemples de section de pièces ou de profilés utilisés pour résister aux efforts de traction**

**4.2.1 Les câbles**

Les câbles en aluminium n’ont pas d’application structurale autre que pour le transport de l’énergie électrique. Lorsqu'on doit recourir à des câbles pour supporter des structures d’aluminium, on utilise des câbles d’acier, lesquels sont plus résistants et moins déformables. Ils peuvent être recouverts d’aluminium, de façon à augmenter leur résistance à la corrosion.

**4.2.2 Les tubes**

Les structures spatiales tridimensionnelles de grande portée, utilisées par exemple comme toitures, représentent une utilisation spatiale et particulièrement intéressante des tubes en aluminium comme pièces en traction et en compression. L’optimisation du choix des pièces a démontré que les profils creux, carrés ou circulaires étaient les plus appropriés pour les charpentes spatiales, tout en étant les plus esthétiques. Il existe plusieurs systèmes d’ossature modulaire pour les charpentes bi- et tridimensionnelles et la plupart de ces systèmes sont brevetés. L’assemblage des pièces dans ces structures présente généralement des défis intéressants (figure 4.2a – voir acétate 16).

**Figure 4.2 – Utilisation de profilés et de pièces en aluminium pour résister aux efforts de traction**

Les tubes d’aluminium sont aussi utilisés dans les structures de support de panneaux de signalisation, les ponts, les passerelles et les poutres à treillis pour, entre autres, résister aux efforts de traction (figure 4.2b – voir acétate 17).

**4.2.3 les barres et les plaques**

Les barres et les plaques sont utilisées comme pièces travaillant en traction, principalement dans les contreventements verticaux en treillis, au moment de la construction, pour assurer la stabilité de la charpente (figure 4.2c). On les utilise aussi comme tirants dans diverses applications, comme dans les toitures inclinées de bâtiments légers et dans les façades (figure 4.2c – voir acétate 18). Ces pièces sont parfois laminées, mais elles sont surtout extrudées. Les tiges extrudées sont légèrement moins résistantes, mais elles sont généralement préférées comme pièces de contreventement. Lorsqu’on utilise des barres circulaires comme tirants ou contreventements, les extrémités sont souvent filetées, ce qui facilite l’assemblage et permet d’appliquer une tension initiale dans les barres. Cette tension initiale a pour fonction de réduire les vibrations. Lorsque les barres sont filetées, on doit tenir compte, dans les calculs de résistance, que les filets réduisent d’environ 25 % l’aire de la section.

**4.2.4 Les profilés à section ouverte et à section composée**

Les profilés simples les plus souvent utilisés pour résister aux efforts de traction sont les cornières, les profilés en C et les profilés en T (figure 4.1d – voir acétate). En fait, le procédé d’extrusion permet l’utilisation d’une multitude de formes de sections pouvant satisfaire la plupart des besoins. Dans les structures d’aluminium, ce sont certainement les cornières qui ont reçu la faveur des concepteurs. C’est la raison pour laquelle elles ont fait l’objet de recherches intensives et de recommandations spéciales pour les calculs, comme nous le verrons plus loin. Les tours de radio et les tours de transmission pour le transport d’énergie électrique, sont une des applications des structures légères tridimensionnelles faisant usage des cornières.

Lorsque les charges de traction ou de compression sont trop importantes pour que des profilés simples leur résistent, on a recours à des profilés à section composée. Plusieurs exemples courants de profilés à section composée sont illustrés sur la figure 4.1e (voir acétate). On utilise généralement des cornières, des profilés en C et des profilés en T qu’on relie soit par boulonnage ou soudage, si les profilés sont plus ou moins en contact, soit par des triangulations (pièces composées triangulées), soit par des traverses de liaison. Les pièces à section composée sont généralement utilisées comme poteaux, mais les sections impliquant deux cornières ou deux profilés en C sont aussi utilisées pour résister à la traction.

Dans ce type de pièces, les composantes de liaison, représentées par des traits discontinus sur la figure 4.1e, ne contribuent pas à l’aire de la section résistant à la traction ou à la compression. Elles servent à distribuer les efforts aux composantes principales et sont surtout mises en œuvre lorsque la pièce est appelée à fléchir sous les charges. Elles jouent aussi le rôle d’éléments stabilisateur le long de la pièce, parce qu’elles réduisent l’élancement des composantes principales et augmentent leur capacité de résistance aux battements et aux vibrations.

* La principale règle concernant le calcul des pièces à section composée peut se résumer ainsi : l’élancement d’une composante principale doit être plus petit ou égal à l’élancement global de toute la pièce. Il existe plusieurs autres règles sur les pièces à section composée, mais ce sont surtout des règles empiriques concernant la construction des pièces.

**Pour illustration – voir « pièces assemblées rivetées constituant le pont d’Arvida[[2]](#footnote-2) »**

## Diapositive 16 et 17 :

**4.2.2 Les tubes**

Les structures spatiales tridimensionnelles de grande portée, utilisées par exemple comme toitures, représentent une utilisation spatiale et particulièrement intéressante des tubes en aluminium comme pièces en traction et en compression. L’optimisation du choix des pièces a démontré que les profils creux, carrés ou circulaires étaient les plus appropriés pour les charpentes spatiales, tout en étant les plus esthétiques. Il existe plusieurs systèmes d’ossature modulaire pour les charpentes bi- et tridimensionnelles et la plupart de ces systèmes sont brevetés. L’assemblage des pièces dans ces structures présente généralement des défis intéressants (figure 4.2a).

## Diapositive 20 :

Une pièce soumise à un effort de traction pure est une pièce sollicitée par une force appliquée au centre de gravité de la section et qui tend à allonger la pièce.

Dans les charpentes d’acier, les pièces sollicitées en traction sont, en théorie, assez faciles à dimensionner puisque la distribution des contraintes est considérée uniforme sur toute la section. Tel n’est pas toujours le cas puisqu’il existe, au voisinage des assemblages, une distribution non uniforme des contraintes conditionnée par la disposition géométrique des éléments de liaison.

Dans le dimensionnement des pièces sollicitées en traction, il faut donc tenir compte de la possibilité de rupture sur la section nette dans les assemblages boulonnés ou rivetés, ainsi que des excentricités et du décalage en cisaillement dans les assemblages boulonnés, rivetés ou soudés. Pour le dimensionnement, il s’agit, en fait, de décider quel type de section sera utilisée et comment réaliser les assemblages pour rendre la section la plus efficace possible.

Il ne suffit pas de vérifier les états limites de rupture de la section nette au droit des assemblages et de plastification de la section brute, pour obtenir une pièce en traction qui résiste de façon adéquate aux charges qui lui sont imposées. Il faut, de plus, vérifier les états limites d’utilisation. Pour les pièces en traction, il suffit de s’assurer que la pièce ne s’allonge pas de façon excessive et que son élancement respecte les limites prescrites.

Quoi qu’il en soit, à cause de l’absence de problèmes de stabilité, les pièces sollicitées en traction sont les plus efficaces du point de vue de l’utilisation de l’acier.

## Diapositive 25 :

**Structures suspendues**

Une structure suspendue (voir acétate) peut être considérée comme un cas particulier d'une structure articulée à noyau central. Il s'agit en fait d'une série de planchers suspendus à un chapeau similaire à celui présenté sur l’acétate 24. Les réactions d'appui des planchers sont conduites vers le haut par des suspentes et transmises au(x) noyau(x) par de grandes poutres-consoles constituant le chapeau. On dispose ainsi au rez-de-chaussée de zones qui sont libérées de poteaux.

La construction commence par le bétonnage des noyaux, puis continue par le montage du chapeau métallique au sommet de la structure. Les autres éléments de la charpente sont suspendus depuis le sommet vers le bas. Pour cette raison, les éléments de planchers doivent avoir une rigidité flexionnelle suffisante pour être mis en place par levage.

# Comportement des pièces tendues en aluminium

## Diapositive 31 :

**4.3 Comportement des pièces tendues en aluminium**

Le comportement général d’une éprouvette soumise à un essai de traction a été décrit à la sous-section 2.9.2[[3]](#footnote-3) et est représenté sur la figure 2.30 (voir acétate). Ce comportement est caractérisé par deux contraintes, soit la limite élastique (Fy) et la contrainte de rupture (Fu). Si la contrainte n’excède pas la limite élastique, l’allongement est faible et la pièce retrouve sa longueur initiale lorsque la contrainte est relâchée. Si la contrainte sur toute la longueur de la pièce atteint la valeur limite Fu, la pièce subit de **grandes déformations** avant de se fracturer.

Le comportement des pièces en traction est semblable à celui des éprouvettes, mais il n’est pas tout à fait identique en raison de la présence de contraintes résiduelles. Ces contraintes sont parallèles à l’axe longitudinal de la pièce et résultent des procédés de fabrication. Elles sont en équilibre à l’intérieur de la pièce. Les contraintes résiduelles sont relativement plus petites dans les profilés extrudés que dans les pièces assemblées ou laminées et leur influence est beaucoup moins significative sur le comportement des pièces en traction que sur le comportement des pièces en compression, comme on le verra dans le prochain chapitre.

Il faut donc considérer deux états limites ultimes pour les pièces tendues, quel que soit le matériau utilisé. Le premier correspond à la plastification de la section brute et est caractérisé par une élongation mesurable de la section. Le deuxième état limite correspond à la rupture de la pièce à la section nette critique. Ces états limites sont respectivement fonction de la limite élastique (Fy) et de la contrainte de rupture (Fu).

## Diapositive 33 :

Le comportement des pièces en traction est semblable à celui des éprouvettes, mais il n’est pas tout à fait identique en raison de la présence de contraintes résiduelles. Ces contraintes sont parallèles à l’axe longitudinal de la pièce et résultent des procédés de fabrication. Elles sont en équilibre à l’intérieur de la pièce. Les contraintes résiduelles sont relativement plus petites dans les profilés extrudés que dans les pièces assemblées ou laminées et leur influence est beaucoup moins significative sur le comportement des pièces en traction que sur le comportement des pièces en compression, comme on le verra dans le prochain chapitre.

Si on regarde maintenant du côté des assemblages boulonnés ou rivetés, il est assez évident, en raison de la nature même de ce type d'assemblage qui implique le perçage de trous dans les pièces, que la résistance de la pièce en traction sera réduite. La réduction n’est pas uniquement proportionnelle à la dimension relative des trous par rapport à la section brute de la pièce. En effet, d’autres phénomènes, telles les excentricités intrinsèques aux différents types d’assemblages et les distributions non uniformes des contraintes qui en découlent, interviennent. Pour une pièce boulonnée, il peut aussi y avoir plusieurs modes de déchirement ou de séparation des pièces.

Le comportement d’une pièce en traction dépend donc fortement des assemblages aux extrémités. La figure 4.5 (voir acétate 33), empruntée à la référence (4.6[[4]](#footnote-4)), illustre ce fait de façon éloquente pour une cornière soudée ou boulonnée à des goussets et sollicitée en traction. Ce sujet est étudié plus en détail dans les sous-section qui suivent.

**Figure 4.5 – Comportement en traction d’une cornière**

Il faut donc considérer deux états limites ultimes pour les pièces tendues, quel que soit le matériau utilisé. Le premier correspond à la plastification de la section brute et est caractérisé par une élongation mesurable de la section. Le deuxième état limite correspond à la rupture de la pièce à la section nette critique. Ces états limites sont respectivement fonction de la limite élastique (Fy) et de la contrainte de rupture (Fu).

## Diapositive 34 :

**4.4.1 Influence des assemblages**

Dans les charpentes d’acier, si l’assemblage d’une pièce travaillant en traction est réalisé à l’aide de soudure, et si toutes les plaques constituant la section sont soudées, tel qu’illustré sur la figure 4.4[[5]](#footnote-5), toute l’aire de la section de la pièce est disponible pour résister à l’effort de traction et la pleine capacité de la section en traction peut être développée. Cette situation ne peut se produire dans les charpentes d’aluminium pour des raisons qui deviendront évidentes dans la sous-section 4.4.4[[6]](#footnote-6).

Si on regarde maintenant du côté des assemblages boulonnés ou rivetés, il est assez évident, en raison de la nature même de ce type d'assemblage qui implique le perçage de trous dans les pièces, que la résistance de la pièce en traction sera réduite. La réduction n’est pas uniquement proportionnelle à la dimension relative des trous par rapport à la section brute de la pièce. En effet, interviennent d’autres phénomènes, telles les excentricités intrinsèques aux différents types d’assemblages et les distributions non uniformes des contraintes qui en découlent. Pour une pièce boulonnée, il peut aussi y avoir plusieurs modes de déchirement ou de séparation des pièces.

Le comportement d’une pièce en traction dépend donc fortement des assemblages aux extrémités. La figure 4.5, empruntée à la référence (4.6), illustre ce fait de façon éloquente pour une cornière soudée ou boulonnée à des goussets et sollicitée en traction. Ce sujet est étudié plus en détail dans les sous-section qui suivent.

**Figure 4.5 – Comportement en traction d’une cornière**

Il faut donc considérer deux états limites ultimes pour les pièces tendues, quel que soit le matériau utilisé. Le premier correspond à la plastification de la section brute et est caractérisé par une élongation mesurable de la section. Le deuxième état limite correspond à la rupture de la pièce à la section nette critique. Ces états limites sont respectivement fonction de la limite élastique (Fy) et de la contrainte de rupture (Fu).

## Diapositive 35 :

**4.3 Comportement des pièces tendues en aluminium**

Le comportement des pièces en traction est semblable à celui des éprouvettes, mais il n’est pas tout à fait identique en raison de la présence de contraintes résiduelles. Ces contraintes sont parallèles à l’axe longitudinal de la pièce et résultent des procédés de fabrication. Elles sont en équilibre à l’intérieur de la pièce. Les contraintes résiduelles sont relativement plus petites dans les profilés extrudés que dans les pièces assemblées ou laminées et leur influence est beaucoup moins significative sur le comportement des pièces en traction que sur le comportement des pièces en compression, comme on le verra dans le prochain chapitre.

Il faut donc considérer deux états limites ultimes pour les pièces tendues, quel que soit le matériau utilisé. Le premier correspond à la plastification de la section brute et est caractérisé par une élongation mesurable de la section. Le deuxième état limite correspond à la rupture de la pièce à la section nette critique. Ces états limites sont respectivement fonction de la limite élastique (Fy) et de la contrainte de rupture (Fu).

Le premier état limite n’a pas de conséquences catastrophiques même s’il peut conduire à la mise hors service de la charpente, en raison de déformations trop grandes. Le comportement est ductile et il est généralement possible de déceler le problème avant qu’il ne soit trop tard. Le deuxième, par contre, est de nature fragile puisqu’il peut survenir sans avertissement et entraîner l’effondrement de la charpente. L’état limite impliquent la contrainte de rupture (Fu) et est plus susceptible, on en conviendra, de se produire dans les assemblages. Puisqu’il comporte un plus grand risque, **on lui impose une probabilité de rupture relativement moins élevée, ce qui se traduit par l’application d’un coefficient de tenue plus fiable.** Dans les conditions idéales, on s’assure aussi que le fluage de la pièce sur toute sa longueur se produit avant que la pièce ne se fracture au niveau des assemblages. Même si les assemblages se plastifient grandement en approchant la rupture, les élongations qui en résultent ne se répercutent pas de façon significative sur le comportement global de la pièce, puisque ces déformations sont très localisées.

C’est ainsi que l’on dimensionne les pièces en traction dans les charpentes d’acier. Il existe toutefois une différence importante entre le comportement en traction des pièces en acier et celui des pièces en aluminium, un peu comme le laisse entrevoir la discussion à la sous-section 2.9.2 (figure 2.31[[7]](#footnote-7)). Il n’y a pas de plateau élastique bien défini pour les alliages d’aluminium et, surtout, que l’écart est parfois très mince entre la limite élastique et la contrainte de rupture pour plusieurs alliages d’usage courant.

C’est ce qui est illustré sur la figure 4.3[[8]](#footnote-8) où, en (a), la courbe contrainte-déformation de l’alliage 6351-T6 est comparée à celle de l’alliage 5083-H112 et, en (b), la courbe contrainte-déformation de l’alliage 6061-T6 est comparée à celle de l’acier de nuance G40.21-260W, qui s’y apparente. Il convient toutefois de noter que cette nuance d’acier est très peu utilisée, de nos jours. L’écart entre Fu et Fy est de l’ordre de 100 % pour l’alliage 5083-H112 (voir tableau 2.8[[9]](#footnote-9)), de 15 % pour l’alliage 6351-T6 et de moins de 10 % pour l’alliage 6061-T6, qui est certainement le plus utilisé dans les applications de génie civil. Pour l’acier 260W, la réserve est de 60 %. Les aciers d’usage le plus courant au Canada, soit les aciers de nuances 350W et 300W, ont des écarts respectivement égaux à 30 et 50 % entre Fu et Fy.

Cette différence rend encore plus importante la vérification des deux états limites pour le dimensionnement des pièces en aluminium en traction et justifie l’utilisation d’une probabilité de rupture au moins équivalente à celle qui est utilisée dans les charpentes d’acier.

Dans les charpentes d'acier, c’est souvent la limite élastique qui gouverne le calcul des pièces en traction; dans les charpentes d’aluminium, ce sera plutôt la contrainte de rupture.

En ce qui a trait à la ductilité et à la résilience, dans les charpentes d’aluminium, tous les alliages se qualifient pour la traction, en particulier ceux présentés dans le tableau 2.8. Seuls quelques alliages utilisés en aéronautique, présentent un comportement non résilient. C'est le cas, en l’occurrence, de l’alliage **2014-T6.**

Résilience : Valeur caractérisant la résistance au choc d'un métal.

**Figure 4.3 – Courbes contrainte – déformation types**

# Différence entre le comportement en traction des pièces en acier et celui des pièces en aluminium

## Diapositive 38 et 39 :

C’est ainsi que l’on dimensionne les pièces en traction dans les charpentes d’acier. Il existe toutefois une différence importante entre le comportement en traction des pièces en acier et celui des pièces en aluminium, un peu comme le laisse entrevoir la discussion à la sous-section 2.9.2 (figure 2.31). C’est qu’il n’y a pas de plateau élastique bien défini pour les alliages d’aluminium et, surtout, que l’écart est parfois très mince entre la limite élastique et la contrainte de rupture pour plusieurs alliages d’usage courant.

C’est ce qui est illustré sur la figure 4.3 où, en (a), la courbe contrainte-déformation de l’alliage 6351-T6 est comparée à celle de l’alliage 5083-H112 et, en (b), la courbe contrainte-déformation de l’alliage 6061-T6 est comparée à celle de l’acier de nuance G40.21-260W, qui s’y apparente. Il convient toutefois de noter que cette nuance d’acier est très peu utilisée, de nos jours. L’écart entre Fu et Fy est de l’ordre de 100 % pour l’alliage 5083-H112 (voir tableau 2.8), de 15 % pour l’alliage 6351-T6 et de moins de 10 % pour l’alliage 6061-T6, qui est certainement le plus utilisé dans les applications de génie civil. Pour l’acier 260W, la réserve est de 60 %. Les aciers d’usage le plus courant au Canada, soit les aciers de nuances 350W et 300W, ont des écarts respectivement égaux à 30 et 50% entre Fu et Fy.

Cette différence rend encore plus importante la vérification des deux états limites pour le dimensionnement des pièces en aluminium en traction et justifie l’utilisation d’une probabilité de rupture au moins équivalente à celle qui est utilisée dans les charpentes d’acier.

Dans les charpentes d'acier, c’est souvent la limite élastique qui gouverne le calcul des pièces en traction; dans les charpentes d’aluminium, ce sera plutôt la contrainte de rupture.

En ce qui a trait à la ductilité et à la résilience, dans les charpentes d’aluminium, tous les alliages se qualifient pour la traction, en particulier ceux présentés dans le tableau 2.8. Seuls quelques alliages utilisés en aéronautique, présentent un comportement non résilient. C'est le cas, en l’occurrence, de l’alliage 2014-T6.

**Figure 4.3 – Courbes contrainte – déformation types**

# Définition de l’aire d’une section d’une pièce en traction

## Diapositive 42 :

**4.3 Aire brute de la section**

La résistance en traction est proportionnelle à l’aire brute de la section (Ag). L’aire brute est définie comme étant la somme des produits de l’épaisseur multipliée par la largeur brute de chacun des éléments, mesurée perpendiculairement à son axe (S157, article 7.2). On calcule l’aire brute à l’aide de l’équation suivante :

$A\_{g} = ∑\left(w\*t\right)$ (4.5)

où

w : largeur

t :épaisseur

L’aire brute d’une section standard peut être obtenue directement dans une table de profilés normalisés fournie par le fabricant. Dans le cas des profilés d’aluminium, contrairement à ceux d’acier, les fabricants ne fournissent que des tables ne contenant que les principales dimensions géométriques des profilés fabriqués telles la hauteur nominale, la largeur nominale, l’épaisseur de l’âme et l’épaisseur des semelles. Il faut donc calculer la surface brute le plus justement possible en fonction des dimensions publiés.

Il est de pratique courante, si le calcul est effectué à la main, de négliger le rayon du congé entre les âmes et les semelles. L’utilisation d’un progiciel de calcul structural ou d’un chiffrier électronique (Microsoft Excel, par exemple) permet d’automatiser la détermination des propriétés requises, de tenir compte du rayon des congés et d’éviter les calculs fastidieux.

La figure suivante présente un exemple de chiffrier électronique développé pour cet ouvrage. On y retrouve le calcul des propriétés des sections utilisées dans la structure témoin, soit : les plaques, les cornières, les profilés en C, les profilés en I et les tubes.

**NB** : pour plus de précisions voire « presse d’aluminium – cqrda »

## Diapositive 44 :

**Diamètre des trous**

Dans les charpentes d’aluminium calculées selon la référence (4.7[[10]](#footnote-10)), le diamètre des trous (do) doit être légèrement plus grand que le diamètre (d) des boulons, selon la grosseur des boulons. Ainsi,

* Pour : $d \leq 12mm$,

 $d\_{o} = d + 1mm$ (4.1)

* Pour : $d > 12mm$,

 $d\_{o} = d + 1,5mm$ (4,2)

Dans les versions antérieures de la référence (4.7), le diamètre des trous utilisés pour le calcul de l’aire de la section nette pouvait être 1 mm plus grand que le diamètre des trous spécifié sur les plans d’atelier, afin de tenir compte des bavures qui se produisent dans le métal autour des trous, lors du perçage par poinçonnage. Ce n’est plus le cas maintenant, dans la référence (4.7). Les valeurs à considérer dans les calculs sont donc celles données par les équations (4.1) et (4.2).

Les trous d’assemblages boulonnés non soumis à la fatigue (chapitre IX) peuvent être poinçonnés lorsque l’épaisseur des plaques n’excède pas 12mm. Les plaques de plus grande épaisseur peuvent être poinçonnées, mais à un diamètre inférieur au diamètre requis, puis fraisées à la dimension finale**. Il est souvent préférable de forer les trous dans tous les cas, puisque le poinçonnage a le désavantage d’endommager quelque peu les plaques sur le contour des trous.**

## Diapositive 45 :

Le diamètre des trous (d0) est fonction du diamètre des boulons (d) utilisés. Selon la norme S157, ce diamètre sera de :

Pour : $d \leq 12 mm$

$d\_{o} = d + 1mm$ (S157, art. 14.6.2.3)

Pour:$ d >12mm$,

$d\_{o} = d + 1,5mm$ (S157, art. 14.6.2.3)

**Diamètre des trous**

Dans les charpentes d’aluminium calculées selon la référence (4.7), le diamètre des trous (do) doit être légèrement plus grand que le diamètre (d) des boulons, selon la grosseur des boulons. Ainsi,

* Pour : $d \leq 12mm$,

 $d\_{o} = d + 1mm$ (4.1)

* Pour : $d > 12mm$,

 $d\_{o} = d + 1,5mm$ (4,2)

Dans les versions antérieures de la référence (4.7), le diamètre des trous utilisés pour le calcul de l’aire de la section nette pouvait être 1 mm plus grand que le diamètre des trous spécifié sur les plans d’atelier, afin de tenir compte des bavures qui se produisent dans le métal autour des trous, lors du perçage par poinçonnage. Ce n’est plus le cas maintenant, dans la référence (4.7). Les valeurs à considérer dans les calculs sont, donc, celles données par les équations (4.1) et (4.2).

Les trous d’assemblages boulonnés non soumis à la fatigue (chapitre IX) peuvent être poinçonnés lorsque l’épaisseur des plaques n’excède pas 12mm. Les plaques de plus grande épaisseur peuvent être poinçonnées, mais à un diamètre inférieur au diamètre requis, puis fraisées à la dimension finale**. Il est souvent préférable de forer les trous dans tous les cas, puisque le poinçonnage a le désavantage d’endommager quelques peu les plaques sur le contour des trous**

**S157**

**Perçage des trous**

* 18.7.2.1 - Les trous des joins boulonnés non soumis à la fatigue peuvent être poinçonnés jusqu’à l’obtention du diamètre fini lorsque le matériau a au plus 12 mm d’épaisseur
* 18.7.2.2 - Un matériau de plus de 12 mm d’épaisseur ne doit pas être poinçonné jusqu’à l’obtention du diamètre fini, mais peut être poinçonné à un diamètre inférieur puis alésé pour obtenir le diamètre fini.
* 18.7.2.5 – les trous des joints boulonnés résistant à la fatigue doivent être percés ou poinçonné à un diamètre moindre puis alésés.
* 18.7.2.3 – le diamètre des trous ne doit pas dépasser de plus de 1 mm celui des boulons à un diamètre inférieur de 12 mm, et de plus de 1,5 mm dans le cas des plus gros diamètres

**Pour l’acier. D. Beaulieu charpentes d’acier Tome 1**

Selon la référence (3.1), le diamètre des trous (D), utilisé pour le calcul de l’aire de la section nette, doit être de 2 mm plus grand que le diamètre des trous spécifié sur les plans d’atelier **afin de tenir compte des bavures qui se produisent dans le métal autour des trous, lors du perçage**. Sur les plans d’atelier, on spécifie généralement pour les trous, un diamètre de 2 mm plus grand que celui des boulons (d). On utilise donc, pour le calcul de l’aire de la section nette :

$D = d+4 mm$ (3.2)

**Si l’on sait d’avance que les trous seront forés et non poinçonnés**, il est permis d’utiliser un diamètre (D) égal au diamètre des trous spécifiés parce que le contour des trous forés présente moins de bavures que celui des trous poinçonnés. Ainsi,

$$D = d+2 mm$$

La difficulté, avec cette recommandation, est que la méthode de perçage des trous que le fabricant utilisera échappe généralement au concepteur au moment où il effectue ses calculs. En cas de doute, il est recommandé d’utiliser l’équation (3.2).

## Diapositive 46 :

Dans le cas des trous disposés en diagonale ou en zigzag, la ligne de rupture critique peut passer par les plans inclinés entre les trous voisins (représentée par la ligne 1-2-3-4, à la figure 4.4). La largeur nette correspondant à cette ligne critique se calcule de la façon suivante : en déduisant de la largeur brute la somme des diamètres de tous les trous et en rajoutent, pour chaque segment incliné mesuré dans la série, la grandeur suivante : $s^{2}/(4\*g)$ (S157, art.7.3).

$A\_{n}= A\_{g}- \sum\_{}^{}t\*d\_{o}+ \sum\_{}^{}t\*({s^{2}}/{(4\*g))}$ (4.5) (S157, art. 7.3)

où

d0 : diamètre des trous

t : épaisseur

s : espacement des trous voisins dans le sens d’application de la force

g : espacement transversal des deux trous

## Diapositive 47 :

**S157**

Il faut aussi tenir compte que la ligne de fracture de la pièce peut passer par un plan parallèle à l’axe de la force de traction (représentée par les lignes 2-3-4, sur l’acétate). Dans ce cas, chacune des portions des aires parallèles à l’axe de la force est sollicitée en cisaillement et est calculée avec l’équation suivante :

$A\_{n} = 0,6 l\*t$ (4.6)

où

l : longueur de la ligne parallèle

t : épaisseur

La constante « 0,5 » découle du critère de rupture de Tresca. Cette valeur convient mieux aux structures d’aluminium que la constante 0,6, qui résulte du critère de plasticité de von Mises utilisé dans les structures d’acier.

Dans le calcul de wn et sn (ou pn; voir la figure 4.7 – voir acétate 47), il faut soustraire la largeur do de tous les trous ou portions de trous rencontrés le long d’une ligne de rupture.

Le segment de longueur e, situé à l’extrémité de la pièce et mesuré dans la direction de la charge, est la pince longitudinale. Cette dernière doit être supérieure ou égale à 1,5 fois le diamètre du boulon (voir le chapitre VII). Lorsqu'une pièce sollicitée en traction se déchire le long d’un tel segment (les lignes 8-2 et 9-3 pour l’assemblage de la figure 4.6 – voir acétate 49), l’aire à considérer dans les calculs est égale à :

$$A\_{n} = 0,5\*e\*t$$

L’article 7.3 de la norme A157 donne aussi les précisions suivantes :

« La largeur nette la plus faible (incluant les lignes en zigzag) doit être utilisée pour calculer l’aire nette.

La ligne de rupture en quinconce (en zigzag) est le facteur dominant lorsque la valeur de s2 est inférieure à 2\*g\*d0.

La distance entre les trous ne doit pas être inférieure à 2,5\*d lorsque la valeur de d équivaut au diamètre de l’organe d’assemblage (boulons ou rivets). »

Il faut donc déterminer toutes les lignes de rupture possibles et calculer l’aire nette pour chacune de ces lignes. L’aire nette retenue sera la plus faible des valeurs trouvées.

## Diapositive 48 :

L’article 7.3 de la norme S157 donne aussi les précisions suivantes :

« La largeur nette la plus faible (incluant les lignes en zigzag) doit être utilisée pour calculer l’aire nette.

La ligne de rupture en quinconce (en zigzag) est le facteur dominant lorsque la valeur de s2 est inférieure à 2\*g\*d0.

La distance entre les trous ne doit pas être inférieure à 2,5\*d lorsque la valeur de d équivaut au diamètre de l’organe d’assemblage (boulons ou rivets). »

Il faut donc déterminer toutes les lignes de rupture possibles et calculer l’aire nette pour chacune de ces lignes. L’aire nette retenue sera la plus faible des valeurs trouvées.

Il convient, à cette étape-ci, de devancer quelque peu la matière du chapitre VII et d’identifier quelques dispositions constructives concernant les boulons. Tel qu’illustré sur la figure 4.7, l’espacement ou pas (p) minimal entre les boulons est fixé à 2,5d, la pince longitudinale (e) ne doit jamais être inférieure à 1,5\*d et la pince transversale (et) minimale est égale à 1,25d.

## Diapositive 49 :

Si la pièce en traction comprend des trous dans plus d’un plan, comme dans le cas d’une des cornières illustrées sur la figure 4.5[[11]](#footnote-11), il suffit de déplier la section et d’appliquer les équations précédentes, en considérant les ajustements indiqués sur la figure 4.7 pour le calcul de la largeur brute (wg) et de l’écartement (g4) des trous.

Lorsque *n* boulons sont espacés de façon uniforme et sont disposés en forme de cercle pour résister à un torque, tel qu’illustré sur la figure 4.8 (voir acétate 50), l’aire nette de l’assemblage se calcule à l’aide de l’équation suivante, dans laquelle la constante 0,5 découle du critère de Tresca, puisque le plan de rupture est sollicité en cisaillement :

$A\_{n} = 0,5\*n\*(p – d\_{o})\*t$ (4.11)

Il est mentionné, dans le commentaire de la référence (4.7[[12]](#footnote-12)), que le couple de résistance (Mr) obtenu en multipliant An par la résistance ultime pondérée φuFu et le rayon R, est sécuritaire, tel que démontré par des essais.

Un exemple de calcul de l’aire nette est présenté à la sous-section 4.6.1.

**Figure 4.7 – Cornière en traction boulonnée sur les deux ailes (voir acétate)**

## Diapositive 50 :

**Aire de la section nette**

De façon générale, on définit l’aire de la section brute comme étant la somme du produit de la largeur (w) par l’épaisseur (t) de chacune des parois constituant la section :

$$A\_{g} = ∑w\*t$$

S’il s’agit d’une pièce de forme quelconque, comme le tube montré sur la figure 4.4a[[13]](#footnote-13), l’aire brute est, de toute évidence, égale à l’aire de la section.

L’aire de la section nette de la pièce (An) est obtenue en faisant la somme des aires nettes (Ani) de chacune des parois situées le long d’une ligne potentielle de rupture passant ou non par les trous de boulons.

$A\_{n} = ∑A\_{ni}$ (4.6)

L’aire nette d’une paroi sollicitée en traction, c’est-à-dire dont le plan est perpendiculaire à l’axe de l’effort de traction, est calculée avec l’équation suivante :

$A\_{n} = w\_{n}\*t$ (4.7)

Lorsque la section critique contient des segments inclinés par rapport à l’axe longitudinal de la pièce, comme c'est généralement le cas dans les assemblages dont les trous de boulons sont disposés en quinconce (figure 4.6 – voir acétate), la section nette dépend alors du pas ou espacement longitudinal des trous (s), et de l’écartement, ou espacement transversal des trous (g). L’aire nette d’un segment incliné se calcule à l’aide de l’équation suivante où la quantité s2/(4\*g) est ajouté à la projection de la surface sur un plan perpendiculaire à l’axe de l’effort de traction :

$A\_{n}= w\_{n}^{'}\*t=t\*\left(w\_{n}+ \frac{s^{2}}{4g}\right) $(4.8)

La ligne de rupture passant par les boulons disposés en quinconce risque d’être critique lorsque $s^{2}< 2gd$.

**Figure 4.6 – Calcul de l’aire nette effective**

L’aire nette d’un segment sollicité en cisaillement pur, c’est-à-dire dont le plan est parallèle à l’axe de l’effort de traction, est obtenue de l’équation suivante :

$A\_{n}=0.5\*s\_{n}\*t $(4.9)

La constante *0,5* découle du critère de rupture de Tresca. Cette valeur convient mieux aux structures d’aluminium que la constante *0,6*, qui résulte du critère de plasticité de Von Mises utilisé dans les structures d’acier.

Dans le calcul de wn et sn (ou pn voir la figure 4.7), il faut soustraire la largeur do de tous les trous ou portions de trous rencontrés le long d’une ligne de rupture.

Le segment de longueur e, situé à l’extrémité de la pièce et mesuré dans la direction de la charge, est la pince longitudinale. Cette dernière doit être supérieure ou égale à 1,5 fois le diamètre du boulon (voir le chapitre VII). Lorsqu'une pièce sollicitée en traction se déchire le long d’un tel segment (les lignes 8-2 et 9-3 pour l’assemblage de la figure 4.6), l’aire à considérer dans les calculs est égale à :

$A\_{n} = 0,5\*e\*t$ (4.10)

Puisque la déchirure se produit dans un plan adjacent au boulon, tel qu’illustré sur la figure 4.6, on n’a pas à soustraire la moitié du diamètre du trou de la longueur de la pince (e).

La valeur de An retenue pour le calcul de la résistance à la traction de la pièce, est la plus petite des valeurs calculées considérant toutes les lignes de rupture. Pour l’exemple de la figure 4.6, ce sera la plus petite valeur de An obtenue pour chacune des cinq lignes considérées.

## Diapositive 51 :

Lorsque *n* boulons sont espacés de façon uniforme et sont disposés en forme de cercle pour résister à un torque, tel qu’illustré sur la figure 4.8 (voir acétate), l’aire nette de l’assemblage se calcule à l’aide de l’équation suivante, dans laquelle la constante *0,5* découle du critère de Tresca, puisque le plan de rupture est sollicité en cisaillement :

$A\_{n} = 0,5\*n\*(p – d\_{o}) t$ (4.11)

Il est mentionné, dans le commentaire de la référence (4.7), que le couple de résistance (Mr) obtenu en multipliant An par la résistance ultime pondérée φuFu et le rayon R, est sécuritaire, tel que démontré par des essais.

Un exemple de calcul de l’aire nette est présenté à la sous-section 4.6.1.

Il convient, à cette étape-ci, de devancer quelque peu la matière du chapitre VII et d’identifier quelques dispositions constructives concernant les boulons. Tel qu’illustré sur la figure 4.7 (voir acétate 48), l’espacement ou pas (p) minimal entre les boulons est fixé à 2,5d, la pince longitudinale (e) ne doit jamais être inférieure à 1,5 d et la pince transversale (et) minimale est égale à 1,25d.

**Figure 4.8 – Assemblage circulaire sollicité en torsion**

## Diapositive 53, 54 et 55 :

**4.4.3 Excentricités dans les assemblages boulonnés**

Il arrive souvent que pour transmettre une force de traction (T) à une pièce, on soit obligé d’utiliser un assemblage qui, à cause de son excentricité (e) par rapport à l’axe longitudinal de la section, induit des efforts secondaires de flexion dans la pièce. C’est le cas, entre autres, d’une cornière attachée au joint par une seule aile (figure 4.9a) ou de cas extrême d’une poutre en I, elle aussi reliée à un autre élément par une seule aile (figure 4.9b).

**Figure 4.9 – Assemblage excentriques – voir acétate**

Lorsque la charge (T) agit sur l’excentricité (e) et que la contrainte sur la fibre extrême en traction est limitée à Fy, on a :

$$F\_{y} =\frac{ T}{A} + \frac{(T\*e)}{S}$$

Ainsi,

$$T = \frac{F\_{y}}{\frac{1}{A}+\frac{e}{S}}$$

Si on transforme cette équation comme suit, on obtient les différentes formulations utilisées dans les références (4.7[[14]](#footnote-14)) et (4.15[[15]](#footnote-15)) :

$$T= \frac{AF\_{y}}{1+\frac{eA}{S}}= \frac{AF\_{y}}{1+\frac{ecA}{I}}= \frac{AF\_{y}}{1+\frac{ec}{r^{2}}}= \frac{AF\_{y}}{1+\left(\frac{e}{r}\right)^{2}}$$

Pour les sections fléchies par rapport à un axe principal (figure 4.9b), la variable *c* est, en fait, l’excentricité e puisque le module de section est celui qui est relatif aux fibres tendues de la section. La dernière formulation est satisfaite.

Ainsi, pour tenir compte des contraintes supplémentaires de flexion dans les pièces avec assemblages excentriques, la référence (4.7) propose l’équation (4.12) qui, même si elle a été dérivée pour un comportement élastique le long de la pièce (apparition de Fy dans les fibres extrêmes de la pièce), s’applique aussi lorsque la pièce se plastifie (section compactes). La même équation est utilisée pour simuler le comportement aux joints où la contrainte, comme nous l’avons vu, peut atteindre la limite de rupture (Fu). Il suffit donc d’utiliser l’aire brute effective (Age) et l’aire nette effective (Ane), données par les équations suivantes, dans les équations de résistance qui seront présentées à la section 4.5[[16]](#footnote-16).

$A\_{ge}= \frac{A\_{g}}{1+e\frac{A\_{g}}{S\_{g}} } $ (4.12)

$A\_{ne}= \frac{A\_{n}}{1+e\frac{A\_{n}}{Z\_{n}} }$ (4.13)

Dans l’équation (4.12), Ag est l’aire de la section brute, Sg est le module de section élastique de la section brute calculé par rapport à la fibre extrême en traction, et e est l’excentricité de l’assemblage (à ne pas confondre avec la pince longitudinale), mesurée par rapport à l’axe de flexion de la pièce (figure 4.9).

Dans l’équation (4.13), An est l’aire de la section nette, telle que calculée dans la sous-section 4.4.2, et Zn est le module de section plastique de la section nette, évalué de façon approximative à l’aide de l’équation suivante dérivée pour la flexion élastique, dans laquelle Sn et Sg ont été remplacés par Zn et Zg :

$Z\_{n}= Z\_{g}-\sum\_{}^{}(t\*d\_{o})\_{i}Y\_{i}$ (4.14)

Dans l’équation (4.14), (do\*t) est l’aire d’un trou de boulon situé à une distance y de l’axe neutre de la section. La référence (4.7) suggère de négliger le changement de position de l’axe neutre de la section dû à la présence de trous pour le calcul de Zn (ou Sn).

L’équation (4.13) est une équation générale, applicable à la plupart des profilés. Toutefois, les cornières, de même que les profilés en C et en T, font l’objet de recommandations particulières, dans la référence (4.7).

## Diapositive 56 :

Les assemblages montrés sur la figure 4.12 (voir acétate) sont de type courant et illustrent assez bien la distribution non uniforme des contraintes qui se développent dans l’âme d’une section en I, lorsque les ailes seules sont boulonnées, rivetées ou soudées à des goussets à l’extrémité de la pièce, et dans l’aile libre d’une cornière, lorsqu'une seule aile est reliée à un gousset.

Plus les plaques non reliées sont profondes, plus l’effet de l’excentricité est significatif. En d’autres termes, l’efficacité d’une section est réduite si l’aire de la section des composantes non reliées augmente par rapport à l’aire totale de la section de la pièce sollicitée en traction. La distance *x*, mesurée sur la figure 4.12, est une mesure approximative de l’importance de l’effet de l’excentricité entre le plan de cisaillement et le centre de gravité de la portion de la pièce tributaire du gousset de la connexion.

On admet aussi que, plus l’assemblage est long, plus grandes sont les chances que la distribution des contraintes soit uniforme à la fin de l’assemblage. La longueur L, mesurée sur la figure 4.12 **entre le premier et le dernier boulon** ou entre le **début et la fin d’un cordon de soudure**, selon le cas, est une autre dimension à considérer pour la mesure de cet effet.

Pour tenir compte de l’influence de l’excentricité des connexions, il est possible de regrouper les paramètres *x* et *L* à l’intérieur d’une équation empirique de formulation simple. L’aire nette effective de la section résistante au droit de l’assemblage est égale à :

$A\_{ne}=\left(1- \frac{\overbar{X}}{L}\right)A\_{n} $ (4.19)

Il a suffi, en fait, de réduire la longueur L à une longueur effective L’, tel qu’illustré sur la figure 4.12, et de calculer le rapport L’/L pour obtenir le terme entre parenthèses.

**Figure 4.12 – Effet de l’excentricité des connexions boulonnées ou soudées dans les pièces en traction**

L’équation (4.19) a donné de bons résultats lorsque comparée aux résultats de très nombreux essais réalisés en laboratoire sur des assemblages en acier. Son utilisation dans la pratique pose cependant certains problèmes lorsqu’il s’agit de faire un premier choix de section. La référence (4.2[[17]](#footnote-17)) contourne cette difficulté en recommandant l’utilisation de valeurs sécuritaires dérivées de l’équation (4.19) pour différentes catégories de sections en acier.

## Diapositive 57, 58, 59 et 60 :

**4.4.3 Excentricités dans les assemblages boulonnés**

Il arrive souvent que pour transmettre une force de traction (T) à une pièce, on soit obligé d’utiliser un assemblage qui, à cause de son excentricité (e) par rapport à l’axe longitudinal de la section, induit des efforts secondaires de flexion dans la pièce. C’est le cas, entre autres, d’une cornière attachée au joint par une seule aile (figure 4.9a) ou de cas extrême d’une poutre en I, elle aussi reliée à un autre élément par une seule aile (figure 4.9b).

**Figure 4.9 – Assemblage excentriques – voir acétate 52**

Lorsque la charge (T) agit sur l’excentricité (e) et que la contrainte sur la fibre extrême en traction est limitée à Fy, on a :

$$F\_{y}= \frac{T}{A}+\frac{Te}{S}$$

Ainsi,

$$T= \frac{F\_{y}}{\frac{1}{A}+\frac{e}{S}}$$

Si on transforme cette équation comme suit, on obtient les différentes formulations utilisées dans les références (4.7) et (4.15) :

$$T= \frac{AF\_{y}}{1+\frac{eA}{S}}= \frac{AF\_{y}}{1+\frac{ecA}{I}}= \frac{AF\_{y}}{1+\frac{ec}{r^{2}}}= \frac{AF\_{y}}{1+\left(\frac{e}{r}\right)^{2}}$$

Pour les sections fléchies par rapport à un axe principal (figure 4.9b), la variable *c* est, en fait, l’excentricité *e* puisque le module de section est celui qui est relatif aux fibres tendues de la section. La dernière formulation est satisfaite.

Ainsi, pour tenir compte des contraintes supplémentaires de flexion dans les pièces avec assemblages excentriques, la référence (4.7) propose l’équation (4.12) qui, même si elle a été dérivée pour un comportement élastique le long de la pièce (apparition de Fy dans les fibres extrêmes de la pièce), s’applique aussi lorsque la pièce se plastifie (section compactes). La même équation est utilisée pour simuler le comportement aux joints où la contrainte, comme nous l’avons vu, peut atteindre la limite de rupture (Fu). Il suffit donc d’utiliser l’aire brute effective (Age) et l’aire nette effective (Ane), données par les équations suivantes, dans les équations de résistance qui seront présentées à la section 4.5.

$A\_{ge}= \frac{A\_{g}}{1+e\frac{A\_{g}}{S\_{g}}} $(4.12)

$A\_{ne}=\frac{A\_{n}}{1+e\frac{A\_{n}}{Z\_{n}}}$ (4.13)

Dans l’équation (4.12), Ag est l’aire de la section brute, Sg est le module de section élastique de la section brute calculé par rapport à la fibre extrême en traction, et *e* est l’excentricité de l’assemblage (à ne pas confondre avec la pince longitudinale), mesurée par rapport à l’axe de flexion de la pièce (figure 4.9).

Dans l’équation (4.13), An est l’aire de la section nette, telle que calculée dans la sous-section 4.4.2, et Zn est le module de section plastique de la section nette, évalué de façon approximative à l’aide de l’équation suivante dérivée pour la flexion élastique, dans laquelle Sn et Sg ont été remplacés par Zn et Zg :

$Z\_{n}= Z\_{g}-\sum\_{}^{}(d\_{o}t)\_{i}y\_{i}$ (4.14)

Dans l’équation (4.14), (dot) est l’aire d’un trou de boulon situé à une distance y de l’axe neutre de la section. La référence (4.7) suggère de négliger le changement de position de l’axe neutre de la section dû à la présence de trous pour le calcul de Zn (ou Sn).

L’équation (4.13) est une équation générale, applicable à la plupart des profilés. Toutefois, les cornières, de même que les profilés en C et en T, font l’objet de recommandations particulières, dans la référence (4.7).

## Diapositive 62 et 63 :

Pour une cornière seule, assemblée à l’aide d’un seul boulon sur une de ses ailes (figure 4.10a – voir acétate 61), la contribution de l’aile non retenue est totalement négligée dans le calcul de l’aire effective. Ainsi,

$A\_{ne}=(2g-d\_{o})t\leq \left(b\_{1}-d\_{o}\right)t$ (4.15)

Lorsque le boulon est situé trop près du bord libre, la cornière est pénalisée, puisque le terme 2g devient plus petit par rapport à b1.

Lorsque la cornière est connectée à l’aide de deux boulons, ou plus, sur une file parallèle au sens de l’effort de traction, l’équation suivante s’applique ;

$A\_{ne}=\left(2g+\frac{b\_{2}}{3}-d\_{o}\right)t\leq \left(b\_{1}+\frac{b\_{2}}{3}-d\_{o}\right)t$ (4.16)

On admet ainsi que la cornière est capable de développer le tiers de la capacité de l’aile non reliée.

**Figure 4.10 – Cornières, profilés en C et profilés en T assemblés de façon excentrique[[18]](#footnote-18)**

Les cornières dos à dos reliées sur le même côté d’un gousset (figure 4.10b), les profilés en C boulonnés sur l’âme à un gousset (figure 4.10d), ont une aire nette effective égale à l’aire nette des parois boulonnées plus la moitié de l’aire des parois non attachées, où :

$$A\_{ne}=A\_{n}-\frac{A\_{f}}{2}$$

Dans cette équation, An est l’aire nette de la section totale, c’est-à-dire Ag moins l’aire des trous de boulons (dot) et Af est l’aire des parois non boulonnées.

Enfin, lorsque les cornières sont situées de part et d’autre du gousset, tel qu’illustré sur la figure 4.10e, l’aire nette effective s’évalue de la façon suivante :

$A\_{ne}=A\_{n}-\frac{A\_{f}}{4}$ (4.18)

On reconnaît que cette disposition des cornières est plus efficace que celle montrée sur la figure 4.10b, au droit de l'assemblage.

# Définition de l’aire d’une section d’une pièce en traction soudée

## Diapositive 66 :

**4.4.4 Section effective des pièces soudées**

On a vu à la sous-section 2.6.1 que le soudage des alliages d’aluminium change de façon significative les propriétés de ces alliages. Les alliages non traitables thermiquement (séries 1000, 3000 et 5000) retournent à leur condition de recuit (figure 2.25 – voir acétate) et les alliages traités thermiquement (séries 200, 6000 et 7000) sont mis en solution (figure 2.27 – voir acétate 66). Il en résulte des pertes de résistance pratiquement impossibles à récupérer sauf lorsque l’assemblage subit un traitement thermique approprié après le soudage. L’importance de ces pertes de résistance est représentée schématiquement sur la figure 2.14 (voir acétate 67). Il faut accepter le fait que l’aluminium soudé ne se comporte pas comme l’acier soudé.

Cela implique que les propriétés mécaniques d’un alliage d’aluminium changent sur la section en fonction de la présence de soudures. Pour en tenir compte, on dispose de deux moyens. Le premier consiste à réduire de façon ponctuelle l’épaisseur des pièces dans les zones affectées thermiquement (communément appelées ZAT) et de calculer de nouvelles propriétés de section à utiliser avec Fy ou Fu, dans les calculs de résistance. Le deuxième consiste à calculer une contrainte pondérée en fonction des surfaces relatives affectées ou non thermiquement et à utiliser ces contraintes avec les propriétés géométriques non modifiées de la section. Une de ces deux techniques est toujours utilisée pour calculer les valeurs de résistance, en fonction du type de membrure, de l’application et de la norme retenue.

Avant de présenter les recommandations des normes et dans une perspective pratique, il convient d’examiner de façon plus attentive comment le soudage affecte l’aluminium.

**8. Influence du soudage**

**8.1 Effets du soudage sur les propriétés**

Dans la section précédente, on a pris conscience que la chaleur joue un rôle très important dans le comportement des alliages de corroyage, en modifiant de façon parfois très marquée les propriétés mécaniques de ces alliages. Puisque le soudage dégage localement une très grande quantité de chaleur, on comprend que les propriétés du métal risquent de changer dans la zone affectée thermiquement (ZAT).

La conductibilité thermique de l’aluminium étant grande, on doit s’attendre à avoir une zone affectée thermiquement qui soit relativement large. Pour le calcul des structures, on l’évalue à 25 mm de chaque côté du joint. La zone affectée thermiquement possède une résistance à la traction réduite. Si, pour un alliage écroui ou traité thermiquement, on découpe une éprouvette dans la plaque de la figure 24a pour la soumettre à un essai de traction, il est assuré qu’elle cassera dans la zone affectée thermiquement ou dans la soudure, à une charge nettement moins élevée que la capacité du métal de base, loin de la soudure (figure 24b).

**Figure 24 – Zone affectée par le soudage d’une plaque d’aluminium – voir diapositive 70**

**8.2 Effets du soudage sur les alliages non traitables thermiquement**

Tous les effets de l’écrouissage (sous-section 7.4[[19]](#footnote-19) et figure 20[[20]](#footnote-20)) sont perdus si on atteint 350°C pendant peu de temps. Les différents traitements produits dans la zone affectée par la chaleur, en s’éloignant du métal fondu, sont :

* un recuit complet avec grossissement des grains (sous-section 7.10 b[[21]](#footnote-21) et figure 25 (voir acétate)). On atteint alors l’état O;
* une recristallisation (sous-section 7.8[[22]](#footnote-22)) ;
* un revenu sur écrouissage suivi d’un refroidissement lent (chauffage léger) ;
* un métal de base non affecté.

**Figure 25 – Influence du soudage sur un alliage écroui, non traitable thermiquement (séries 3000 et 5000)**

Par conséquent, la résistance du métal de base, après soudage**, sera considérée du point de vue du design comme étant la résistance dans l’état recuit pour les alliages structuraux des séries 3000 et 5000** (voir la sous-section 6.1[[23]](#footnote-23) et la figure 14 (voir acétate 67)). Les alliages de la série 1000 n’ont pas d’applications structurales, à proprement parler, alors que les alliages de la série 4000 (aussi traitables thermiquement) sont généralement utilisés comme métal d’apport et non comme alliages structuraux (voir les sous-sections 6.2[[24]](#footnote-24) et 6.3[[25]](#footnote-25)). La figure 25 indique l’effet du soudage sur un alliage non traitable thermiquement, écroui et stabilisé (5052-H38). On remarque la similitude entre cette figure et la figure 20. On conviendra que le soudage d’un alliage recuit (état O) entraîne une perte minimale de résistance, tel qu’illustré sur la figure 26[[26]](#footnote-26).

La large bande de matériau devenue ductile (figures 20 et 24a (voir diapositive 70)) fait, qu’en général, les alliages non traitables thermiquement sont faciles à souder puisqu’en s’étirant, la bande reprend une bonne partie des retraits qui surviennent lors de la fabrication de pièces ou de charpentes soudées, à cause des propriétés mécaniques relativement uniformes dans la région soudée. La perte de résistance pour les alliages courants de la série 5000 est de l’ordre de 30 à 40% pour la limite élastique et de l’ordre de 10 % pour la limite ultime.

## Diapositive 67 :

**8.3 Effets du soudage sur les alliages traités thermiquement**

Le soudage des alliages traités thermiquement (séries 2000, 6000 et 7000) **est généralement plus difficile à exécuter que le soudage des alliages non traitables thermiquement** (sous-section précédente). Si on considère, à titre d’exemple, un alliage dans les états T4 et T6 (sous-section 6.2), les effets du soudage sont les suivants dans la zone affectée par la chaleur, en s’éloignant de la soudure :

* une mise en solution et trempe (figures 18[[27]](#footnote-27) a, c) ;
* un survieillissement, si au départ, on est dans l’état T6, ou un léger survieillissement (ou encore un vieillissement artificiel) si, au départ, on est dans l’état T4 (figures 18 d, e) ;
* un métal de base non affecté.

La figure 27 résume l’effet du soudage sur un alliage traité thermiquement dans les états T6 et T4. Il pourrait, en l’occurrence, s’agir de l’alliage 6061 avec, comme métal d’apport, l’alliage 4043.

**Figure 27 – Influence du soudage sur un alliage traité thermiquement (série 6000)**

## Diapositive 68 :

**7.6 comparaison des propriétés des séries d’aluminium**

Les différentes séries d’alliages de corroyage peuvent être classées en deux catégories, comme nous l’avons déjà vu : les alliages non traitables thermiquement (séries 1000, 3000 et 5000) et les alliages traitables thermiquement (séries 2000, 4000, 6000 et 7000). La série 4000, qui n’est pas utilisée structuralement, fait quelque peu exception, tel que déjà mentionné aux sous-sections 6.2 et 6.3.

La figure 14 (voir acétate) donne une idée des niveaux relatifs de résistance mécanique qu’il est possible d’obtenir, selon les méthodes utilisées pour augmenter la résistance des alliages Al-Mn recuit de la série 3000, à un alliage (Al-Mg) à l’état écroui dur de la série 5000 (non traitable thermiquement), ainsi qu’à un alliage traité thermiquement à l’état T6 (mis en solution et vieilli artificiellement) de la série 2000. La figure indique, qu’en général, les alliages traités thermiquement offrent une meilleure résistance que les alliages non traitables thermiquement et que ces derniers sont à leur tour plus résistants que les alliages qui n’ont subi aucun traitement thermique ou travail mécanique. Le soudage, comme on le verra plus loin, viendra changer quelque peu les données.

**Figure 14 – Niveaux relatifs de résistance mécanique**

## Diapositive 69 :

Il faut d’abord faire la distinction entre les soudures longitudinales et les soudures transversales dans les pièces. **Les soudures transversales sont surtout concentrées dans la région des assemblages et affectent la pièce localement** alors que **les soudures longitudinales sont généralement présentes sur toute la longueur de la pièce et affectent les propriétés de la section de la pièce**. La figure 4.13 (voir acétate) illustre quelques applications courantes de soudures longitudinales et transversales.

**Figure 4.13 – Orientation et localisation des soudures dans les pièces**

## Diapositive 70 :

L’influence du soudage est visible dans les tableaux 2.8 (voir acétate) et 2.9 (voir acétate) lorsqu’on compare les résistances des alliages soudés (Fwy et Fwu) à celles des alliages non soudés (Fy et Fu). Ces valeurs sont obtenues d’essais de traction sur éprouvettes, du type de ceux décrits à la sous-section 2.9.2 et tiennent compte de plusieurs facteurs.

**Les résistances des tableaux 2.8 et 2.9 peuvent être utilisées directement dans les calculs**. Si on tente de les comparer aux valeurs présentées dans d’autres documents (la référence (4.1[[28]](#footnote-28)), par exemple), on réalise que les valeurs ne correspondent pas, pour les raisons qui suivent.

## Diapositive 71 :

Les mesures des déformations sont généralement effectuées sur une longueur de référence de 50 mm sur les éprouvettes d’alliages non soudés sollicitées en traction. Lorsqu’on teste une éprouvette obtenue en découpant transversalement une soudure à rainure reliant deux plaques (figure 2.24 – voir acétate), la longueur de référence de 250 mm (ce qui réduit la déformation relative de la soudure et donne une résistance Fwy en apparence) est plus élevée. Dans d’autres pays, des essais de traction sont effectués en considérant une longueur de référence de 50 mm pour les soudures transversales. On obtient ainsi une mesure plus réelle des propriétés de la soudure (figure 4.14 – voir acétate 71). La valeur de résistance (Fwy) ainsi obtenue est à peu près égale à 75 % de la valeur mesurée sur 250mm. Les valeurs présentées en tableau dans la référence (4.1) ont été obtenues à partir de mesures effectuées sur 250 mm, alors que celles présentées dans le tableau 2.8 (voir acétate 69: **Résistance en traction d’alliages et produits d’aluminium utilisés dans le bâtiment**) ont été mesurées en considérant une longueur de référence de 50mm.

**8.1 Effets du soudage sur les propriétés**

Dans la section précédente, on a pris conscience que la chaleur joue un rôle très important dans le comportement des alliages de corroyage, en modifiant de façon parfois très marquée les propriétés mécaniques de ces alliages. Puisque le soudage dégage localement une très grande quantité de chaleur, on comprendre que les propriétés du métal risquent de changer dans la zone affectée thermiquement (ZAT).

La conductibilité thermique de l’aluminium étant grande, on doit s’attendre à avoir une zone affectée thermiquement qui soit relativement large. Pour le calcul des structures, on l’évalue à 25 mm de chaque côté du joint. La zone affectée thermiquement possède une résistance à la traction réduite. Si, pour un alliage écroui ou traité thermiquement, on découpe une éprouvette dans la plaque de la figure 24a pour la soumettre à un essai de traction, il est assuré qu’elle cassera dans la zone affectée thermiquement ou dans la soudure, à une charge nettement moins élevée que la capacité du métal de base, loin de la soudure (figure 24b).

**Figure 24 – Zone affectée par le soudage d’une plaque d’aluminium (voir acétate)**

## Diapositive 72 :

Les mesures des déformations sont généralement effectuées sur une longueur de référence de 50 mm sur les éprouvettes d’alliages non soudés sollicitées en traction.

Lorsqu’on teste une éprouvette obtenue en découpant transversalement une soudure à rainure reliant deux plaques (figure 2.24), la longueur de référence est de 250 mm, ce qui réduit la déformation relative de la soudure et donne une résistance Fwy en apparence plus élevée. Dans d’autres pays, des essais de traction sont effectués en considérant une longueur de référence de 50mm pour les soudures transversales. On obtient ainsi une mesure plus réelle des propriétés de la soudure (**figure 4.14 – voir acétate**). La valeur de résistance (Fwy) ainsi obtenue est à peu près égale à 75 % de la valeur mesurée sur 250mm. Les valeurs présentées en tableau dans la référence (4.1) ont été obtenues à partir de mesures effectuées sur 250mm, alors que celles présentées dans le tableau 2.8 (voir acétate 69) ont été mesurées en considérant une longueur de référence de 50mm.

**Figure 4.14 – Distribution de la résistance en traction autour d’une soudure**

Si, par contre, on mesure la résistance en traction des soudures longitudinales, l’éprouvette découpée dans la soudure aura les propriétés de cette dernière sur toute sa longueur. On considère donc une longueur de 50 mm pour mesurer les déformations et on obtient une résistance dont la valeur est environ 75 % de celle obtenue des mesures transversales effectuées sur une longueur de référence de 250mm. La référence (4.1) recommande l’utilisation de mesures effectuées sur une longueur de 50 mm pour les soudures longitudinales mais présente en tableau les valeurs mesurées transversalement sur une longueur de 250mm. Par contre, elle prescrit l’utilisation d’un facteur de réduction de 0,75 pour obtenir la limite élastique des soudures longitudinales. Cette réduction est aussi considérée incluse dans les valeurs de Fwy du tableau 2.8.

Enfin, les valeurs de résistance ultime (Fwu) présentées dans la référence (4.1) doivent être réduites de 10 % pour tenir compte du fait que les soudures ne sont généralement inspectées que visuellement et que la limite de résistance ultime est une des valeurs les plus critiques pour les calculs. Cette réduction est aussi considérée incluse dans la valeur de Fwu du tableau 2.9 (voir acétate 69 – Résistance en traction d’alliages couramment utilisés pour le soudage (résistance du bain de fusion)).

## Diapositive 73 et 74 :

On peut maintenant revenir à la méthode de calcul pour tenir compte des réductions de résistance en traction causées par les soudures dans les pièces sollicitées en traction.

**Soudures transversales**

Pour tenir compte des soudures transversales, on n’a pas à calculer de section nette effective. On verra donc, à la section 4.5[[29]](#footnote-29), comment elles sont considérées dans les équations de résistance pour la traction et, dans le prochain chapitre, comment elles affectent les équations de résistance pour la compression.

**Soudures longitudinales**

Lorsque des portions de la section transversale d’une pièce sont affectées par le soudage, il faut calculer une épaisseur effective, tm, pour chacune des plaques situées dans les zones affectées thermiquement. Il est convenu que les zones de capacité réduite s’étendent sur 25mm de chaque côté d’une soudure, quelle que soit la méthode de soudage utilisée ou quelle que soit l’épaisseur de la pièce, tel qu’illustré sur la figure 4.15 (voir acétate). Il est aussi convenu que la zone s’évalue par rapport au centre de la soudure, pour les soudures à rainure (voir le chapitre VIII) et que les zones s’évaluent par rapport au talon pour les soudures d’angle. La figure 4.16 (voir acétate 73) présente quelques cas de calcul de zones de capacité réduite.

La référence (4.8[[30]](#footnote-30)) contient des recommandations très explicites et très détaillées sur le sujet. Elle indique, à titre d’exemple, que la longueur de la zone affectée par le soudage varie entre 20 et 40 mm, en fonction de l’épaisseur des plaques, pour des soudages de type MIG (ou GMAW; voir le chapitre II). Pour les fins de ce volume, nous n’entrerons pas dans ces considérations.

Lorsque la résistance est contrôlée par la limite élastique, c’est-à-dire par la plastification,

$t\_{m}=t\frac{F\_{wy}}{F\_{y}}\leq t$ (4.20)

Dans cette équation, l’épaisseur originale (t) est réduite dans la proportion des limites élastiques du métal affecté par le soudage et du métal de base.

**Figure 4.15 – Définition de zone affectée thermiquement et de zone de capacité réduite 4.6**

**Figure 4.16 – Modèles d’évaluation des zones de capacité réduite par le soudage**

## Diapositive 76 :

La référence (4.8) contient des recommandations très explicites et très détaillées sur le sujet. Elle indique, à titre d’exemple, que la longueur de la zone affectée par le soudage varie entre 20 et 40 mm, en fonction de l’épaisseur des plaques, pour des soudages de type MIG (ou GMAW; voir le chapitre II). Pour les fins de ce volume, nous n’entrerons pas dans ces considérations.

Lorsque la résistance est contrôlée par la limite élastique, c’est-à-dire par la plastification,

$t\_{m}=t\frac{F\_{wy}}{F\_{y}}\leq t$ (4.20)

Dans cette équation, l’épaisseur originale (t) est réduite dans la proportion des limites élastiques du métal affecté par le soudage et du métal de base.

**Figure 4.15 – Définition de zone affectée thermiquement et de zone de capacité réduite 4.6**

**Figure 4.16 – Modèles d’évaluation des zones de capacité réduite par le soudage**

Avec cette épaisseur réduite, on calcule une section effective qui sera en mesure de résister aussi bien aux charges de flexion qu’aux charges de traction, en utilisant la limite élastique du métal de base (Fy). En fait, à l’origine, cette technique de réduction des épaisseurs a été développée pour la flexion, puis adaptée à la traction.

Lorsque la résistance est contrôlée par la résistance ultime,

$t\_{m}=t\frac{F\_{wu}}{F\_{u}}\leq t$ (4.21)

Avec cette épaisseur réduite, on calcule une section effective qui sera en mesure de résister aux charges en utilisant la résistance ultime (Fu) du métal de base.

Pour évaluation plus appropriée du module élastique de la section effective (Sm), on peut utiliser l’équation suivante pour le calcul des épaisseurs réduites :

$t\_{m}=t\*\frac{F\_{wy}}{F\_{y}}\*\frac{c}{y}\leq t$ (4.22)

t : épaisseur initiale

c : distance entre l’axe neutre de la section transversale brute et la fibre extrême

y : distance entre l’axe neutre de la section transversale brute et le centre de la soudure

Le module de section élastique de la section effective doit être utilisé pour déterminer le moment résistant au début de la plastification, sauf qu’en cas de flambement local dans un élément soudé, l’article 17.8.4.3 (S6-14) s’applique.

Lorsque la distribution des contraintes est linéaire et que les fibres extrêmes de la pièce n’excèdent pas Fy, cette équation permet de calculer des épaisseurs effectives pour les zones affectées thermiquement, proportionnelles à leur distance de l’axe neutre. Dans l’équation (4.22), *c* est la distance de la fibre extrême mesurée par rapport à l’ace neutre, et y est la distance du centre de la soudure mesurée aussi par rapport à l’axe neutre. Lorsque y est petit, c’est le terme de droite de l’équation qui gouverne. La position de l’axe neutre risque d’être légèrement affectée par ces calculs, mais on néglige cet effet.

La référence (4.7) suggère de négliger l’influence du soudage dans les pièces dont les parois voilent et de considérer plutôt les réductions d’épaisseur calculées pour tenir compte du voilement, comme on le verra dans le chapitre suivant.

Il n’est pas requis, enfin, de tenir compte des aires réduites pour le calcul des flèches des membrures.

Il existe une technique simple et très répandue pour le calcul de la résistance en traction des pièces soudées longitudinalement. Cette approche donne le même résultat que celle qui consiste à calculer une aire réduite (ou effective) à l’aide de l’équation (4.20) et à considérer que toute la section peut atteindre la limite élastique (Fy). Elle a comme avantage d’être applicable au calcul des pièces comprimées et fléchies, comme nous le verrons dans les chapitres V et VI.

## Diapositive 77 :

Pour évaluation plus appropriée du module élastique de la section effective (Sm), on peut utiliser l’équation suivante pour le calcul des épaisseurs réduites :

$t\_{m}=t\*\frac{F\_{wy}}{F\_{y}}\*\frac{c}{y}\leq t$ (4.22)

t : épaisseur initiale

c : distance entre l’axe neutre de la section transversale brute et la fibre extrême

y : distance entre l’axe neutre de la section transversale brute et le centre de la soudure

Le module de section élastique de la section effective doit être utilisé pour déterminer le moment résistant au début de la plastification, sauf qu’en cas de flambement local dans un élément soudé, l’article 17.8.4.3 (S6-14) s’applique.

Lorsque la distribution des contraintes est linéaire et que les fibres extrêmes de la pièce n’excèdent pas Fy, cette équation permet de calculer des épaisseurs effectives pour les zones affectées thermiquement, proportionnelles à leur distance de l’axe neutre. Dans l’équation (4.22), *c* est la distance de la fibre extrême mesurée par rapport à l’ace neutre, et y est la distance du centre de la soudure mesurée aussi par rapport à l’axe neutre. Lorsque y est petit, c’est le terme de droite de l’équation qui gouverne. La position de l’axe neutre risque d’être légèrement affectée par ces calculs, mais on néglige cet effet.

La référence (4.7) suggère de négliger l’influence du soudage dans les pièces dont les parois voilent et de considérer plutôt les réductions d’épaisseur calculées pour tenir compte du voilement, comme on le verra dans le chapitre suivant.

Il n’est pas requis, enfin, de tenir compte des aires réduites pour le calcul des flèches des membrures.

Il existe une technique simple et très répandue pour le calcul de la résistance en traction des pièces soudées longitudinalement. Cette approche donne le même résultat que celle qui consiste à calculer une aire réduite (ou effective) à l’aide de l’équation (4.20) et à considérer que toute la section peut atteindre la limite élastique (Fy). Elle a comme avantage d’être applicable au calcul des pièces comprimées et fléchies, comme nous le verrons dans les chapitres V et VI.

## Diapositive 78 :

L’aire effective (Am) peut être évaluée directement à l’aide de l’équation suivante, dans laquelle Aw est l’aire des zones affectées thermiquement (figure 4.16 – voir acétate 73).

$$A\_{m}=A\_{g}-A\_{w}\frac{(F\_{y}-F\_{wy})}{F\_{y}}$$

Une simple transformation de cette équation donne la relation suivante :

$A\_{m}=\left[1-\frac{A\_{w}}{A\_{g}}\left(1-\frac{F\_{wy}}{F\_{y}}\right)\right]A\_{g}=R\_{m}A\_{g}$ (4.23)

Le facteur de réduction Rm est un facteur de pondération qui s’applique aussi bien à l’aire brute de la section qu’à la contrainte Fy. Dans ce dernier cas, l’équation de calcul utilisée dans plusieurs normes est la suivante :

$$F\_{m}=F\_{y}-\left(\frac{A\_{w}}{A\_{g}}\right)\left(F\_{y}-F\_{wy}\right)$$

En transformant l’équation, on obtient :

$F\_{m}=\left[1-\frac{A\_{w}}{A\_{g}}\left(1-\frac{F\_{wy}}{F\_{y}}\right)\right]F\_{y}=R\_{m}F\_{y}$ (4.24)

Le facteur de réduction Rm donné par l’équation (4.25) peut ainsi être utilisé pour pondérer l’aire brute (Ag) d’une section comportant des soudures longitudinales dans le calcul de la résistance des pièces sollicitées en traction ou en flexion (chapitre VI). Il sera utilisé dans le chapitre suivant pour pondérer la limite élastique (Fy) dans le calcul des pièces comprimées.

Rupture d’un éprouvette d’aluminium dans la soudure

$R\_{m}=\left[1-\frac{A\_{w}}{A\_{g}}\left(1-\frac{F\_{wy}}{F\_{y}}\right)\right]$ (4.25)

Lorsque Rm affecte Ag, on utilise la limite élastique (Fy) pour le calcul des valeurs de résistance et lorsque Rm affecte Fy, on considère la section brute (Ag) dans les calculs. Le résultat final est le même, puisque la résistance est le produit de Ag par Fy.

Si la valeur de Aw n’excède pas 15% de l’aire brute de la section, il est permis de ne pas tenir compte de l’effet du soudage. L’imprécision ne serait apparemment que de 5 %.

Le calcul de la résistance des pièces soudées est illustré par les exemples 4.3 et 4.4 (sous-sections 4.6.3 et 4.6.4)[[31]](#footnote-31).

# Mode de mise hors service par plastification ou fracture (états limites ultimes)

## Diapositive 81 :

**4.5 Modes de mise hors service**

Une pièce en aluminium travaillant en traction peut être mise hors service par plastification de la section ou par fracture de la pièce (états limites ultimes). C’est en traction pure que les pièces en aluminium sont utilisées le plus efficacement. Ces pièces sont donc relativement petites, élancées et sensibles aux vibrations et aux battements (états limites d’utilisation).

Les états limites d’utilisation ont été examinés à la section 3.7[[32]](#footnote-32). Il convient toutefois de rappeler que pour les pièces en traction, il faut s’assurer que les déformations axiales ne soient pas trop grandes et que la limite d’élancement donnée par l’équation (3.31) ne soit pas dépassée.

En ce qui a trait aux états limites ultimes, il suffit de s’assurer que la résistance pondérée en traction est égale ou supérieure à l’effort de traction pondéré appliqué sur la pièce (Tr>Tf).

Pour le calcul de la résistance pondérée de la pièce, la référence (4.7) propose une série d’équations basées sur la plastification de la section brute et la fracture de la pièce. Ces équations tiennent compte des divers phénomènes étudiés à la section 4.4. On choisit la plus petite valeur de Tr.

Les pièces comportant des trous ont une section nette inférieure à la section brute. Par conséquent, la plastification se produit d’abord à la section nette lorsque l’effort de traction est égal à An\*Fy. Cette plastification ne produit pas un allongement important de la pièce parce que la zone plastifiée est limitée à la région des trous, qui n’occupent qu’une très faible portion de la longueur.

C’est également la section nette qui atteint en premier la contrainte de rupture (Fu). De façon à obtenir une rupture ductile, il est préférable que la section brute atteigne la limite élastique avant que la section nette atteigne la contrainte de rupture. En effet, la section brute occupe la majeure partie de la longueur de la pièce et si elle se plastifie avant que la section nette se fracture, on a un bon allongement avant la rupture. Cependant, dans les charpentes d’aluminium, ce n’est pas toujours le cas.

La charge qui produit la plastification de la section brute est égale à Ag\*Fy. La valeur de Tr pour cet état limite est donc donnée par l’équation suivante, où φy = 0.9 :

$T\_{r}= Φ\_{y}A\_{g}F\_{y}$ (4.26)

Pour tenir compte des contraintes supplémentaires de flexion dans les pièces avec assemblage excentriques, l’équation suivante est utilisé avec l’aire brute réduite (Age) fournie par l’équation (4.12) :

$T\_{r}=Φ\_{y}A\_{ge}F\_{y}$ (4.27)

La rupture de la pièce au droit de l’assemblage est moins souhaitable que la plastification de la pièce puisqu’elle est catastrophique et qu’elle se produit parfois sans avertissement. C’est pour cette raison que l’on impose une marge de sécurité plus élevée dans les équations qui prédisent la fracture de la pièce. Le coefficient de pondération φu=0.75, utilisé dans l’équation (4.28) tient compte du fait qu’au-delà de la fracture, il n’y a plus aucune réserve de capacité.

Pour les assemblages boulonnés, il faut vérifier l’équation suivante dans laquelle l’aire de la section nette (An) est évaluée à l’aide de l’équation (4.6) :

$T\_{r}=Φ\_{u}A\_{n}F\_{u}$ (4.28)

Pour tenir compte de la perte de résistance induite par les excentricités des assemblages boulonnées, on utilise l’équation suivante dans laquelle l’aire nette effective (Ame) est évaluée à l’aide de l’une ou l’autre des équations (4.13) et (4.15 à (4.19) :

$T\_{r}=Φ\_{u}A\_{ne}F\_{u}$ (4.29)

Pour le calcul de la résistance des pièces soudées, il faut faire la distinction entre les soudures transversales et les soudures longitudinales.

Une soudure transversale, comme nous l’avons vu, affecte la pièce localement en réduisant de façon parfois significative la limite élastique (Fy) et la résistance ultime (Fu) du métal de base. Dans la zone affectée thermiquement (figures 4.14 – voir acétate 71 et 4.15 – voir acétate 72), ces résistances deviennent Fwy et Fwu dont les valeurs de calcul sont données dans les tableaux 2.8 et 2.9 (voir acétate 69) pour quelques alliages courants.

Il convient donc, pour les pièces soudées transversalement, de vérifier la résistance de la zone affectée thermiquement (équation 4.30), ainsi que la résistance du métal de base (équations 4.26).

$T\_{r}=Φ\_{u}A\_{g}F\_{wu}$ (4.30)

En utilisant Ag dans cette équation, on considère que les soudures à rainure et les soudures d’angle développent la pleine capacité de la section dans la zone affectée thermiquement. Il convient de noter que les soudures à rainure à pénétration partielle ne sont généralement pas recommandées dans les charpentes d’aluminium. Au besoin, il est toujours possible de consulter la référence (4.17[[33]](#footnote-33)). Le calcul détaillé des soudures, y compris celui des soudures à pénétration partielle, sera présenté dans le chapitre VIII.

## Diapositive 82 et 83 :

Les soudures dont l’angle θ, mesuré entre la ligne de la soudure et une droite perpendiculaire à l’axe de chargement, n’excède pas 45°, sont considérées comme des soudures transversales (figure 4.17 – voir acétate 82). Au-delà de 45°, la résistance à la plastification de la section brute de la pièce en traction augmente et peut être calculée en considérant la soudure comme si elle était disposée longitudinalement, selon l’équation (4.31) ci-après.

Le calcul de la résistance des pièces comportant des soudures longitudinales peut être effectué à l’aide de l‘équation (4.31) dans laquelle Am est l’aire effective de la section soudée en considérant les épaisseurs de plaques réduites selon l’équation (4.20) ou en utilisant directement l’équation (4.23).

$T\_{r}=Φ\_{y}A\_{m}F\_{y}$ (4.31)

Comme alternative à l’utilisation de l’équation (4.31), il est possible d’employer l’équation (4.26), mais avec Fy réduit selon l’équation (4.24).

Les équations introduites dans la section 4.5 sont appliquées dans les exemples qui suivent (section 4.6).

**Figure 4.17 – Soudure à rainure oblique sollicitée en traction**

1. Les Presses d’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes en aluminium,* Denis Beaulieu, pp499-688 [↑](#footnote-ref-1)
2. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes en aluminium*, Denis Beaulieu, 239 [↑](#footnote-ref-2)
3. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, p69 [↑](#footnote-ref-3)
4. Les Presse de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, p276 [↑](#footnote-ref-4)
5. Les Presse de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, p242 [↑](#footnote-ref-5)
6. Les Presse de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, p254 [↑](#footnote-ref-6)
7. Les Presse de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, p71 [↑](#footnote-ref-7)
8. Les Presse de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, p241 [↑](#footnote-ref-8)
9. Les Presse de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, p75 [↑](#footnote-ref-9)
10. Les Presse de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, p276 [↑](#footnote-ref-10)
11. Les Presse de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, p243 [↑](#footnote-ref-11)
12. Les Presse de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, p276 [↑](#footnote-ref-12)
13. Les Presse de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, p242 [↑](#footnote-ref-13)
14. Les Presse de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, p276 [↑](#footnote-ref-14)
15. Les Presse de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, p276 [↑](#footnote-ref-15)
16. Les Presse de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, p260 [↑](#footnote-ref-16)
17. Les Presse de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, p276 [↑](#footnote-ref-17)
18. Les Presse de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, p251 [↑](#footnote-ref-18)
19. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, Denis Beaulieu, p30 [↑](#footnote-ref-19)
20. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, Denis Beaulieu, 41 [↑](#footnote-ref-20)
21. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, Denis Beaulieu, p43 [↑](#footnote-ref-21)
22. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, Denis Beaulieu, p40 [↑](#footnote-ref-22)
23. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, Denis Beaulieu, p17 [↑](#footnote-ref-23)
24. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, Denis Beaulieu, p18 [↑](#footnote-ref-24)
25. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, Denis Beaulieu, p23 [↑](#footnote-ref-25)
26. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, Denis Beaulieu, p48 [↑](#footnote-ref-26)
27. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, Denis Beaulieu, p38 [↑](#footnote-ref-27)
28. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, p276 [↑](#footnote-ref-28)
29. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, p260 [↑](#footnote-ref-29)
30. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, p276 [↑](#footnote-ref-30)
31. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, pp265-276 [↑](#footnote-ref-31)
32. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, p137 [↑](#footnote-ref-32)
33. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, p276 [↑](#footnote-ref-33)