Document de support à la présentation :

Conception des charpentes d’aluminium

Module 3 – Propriétés de l’aluminium

Contenu développé par :

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

Professeur au Département des sciences appliquées de l’UQAC

Table des matières

[Note 6](#_Toc126859596)

[A- Propriétés physiques 7](#_Toc126859597)

[Diapositive 6 : 7](#_Toc126859598)

[Diapositive 7 : 9](#_Toc126859599)

[Diapositive 8 : 12](#_Toc126859600)

[Diapositive 9 : 13](#_Toc126859601)

[Diapositive 10 : 13](#_Toc126859602)

[B- Propriétés mécaniques 15](#_Toc126859603)

[Diapositive 13 : 15](#_Toc126859604)

[Diapositive 14 : 17](#_Toc126859605)

[Diapositive 15 : 18](#_Toc126859606)

[Diapositive 16 : 18](#_Toc126859607)

[Diapositive 17 et 18 : 19](#_Toc126859608)

[Diapositive 19 : 21](#_Toc126859609)

[Diapositive 20 : 21](#_Toc126859610)

[Diapositive 21 : 22](#_Toc126859611)

[Diapositive 22 : 22](#_Toc126859612)

[Diapositive 23 : 24](#_Toc126859613)

[Diapositive 24 : 26](#_Toc126859614)

[Diapositive 26 : 27](#_Toc126859615)

[Diapositive 27 : 29](#_Toc126859616)

[Diapositive 29 : 30](#_Toc126859617)

[Diapositive 30 : 32](#_Toc126859618)

[Diapositive 31 : 33](#_Toc126859619)

[Diapositive 32 : 34](#_Toc126859620)

[Diapositive 33 : 35](#_Toc126859621)

[Diapositive 34 : 35](#_Toc126859622)

[Diapositive 35 : 36](#_Toc126859623)

[Diapositive 36 et 37 : 37](#_Toc126859624)

[Diapositive 39 et 40 : 38](#_Toc126859625)

[Diapositive 41 : 39](#_Toc126859626)

[Diapositive 42 et 43: 39](#_Toc126859627)

[Diapositive 44 : 40](#_Toc126859628)

[Diapositive 45 : 42](#_Toc126859629)

[Diapositive 47 : 43](#_Toc126859630)

[C- Soudabilité 44](#_Toc126859631)

[Diapositive 50 : 44](#_Toc126859632)

[Diapositive 51 : 48](#_Toc126859633)

[Diapositive 52 : 49](#_Toc126859634)

[Diapositive 53 : 52](#_Toc126859635)

[Diapositive 54 : 53](#_Toc126859636)

[Diapositive 55 : 54](#_Toc126859637)

[Diapositive 56 et 57 : 55](#_Toc126859638)

[Diapositive 58 : 56](#_Toc126859639)

[Diapositive 59 : 58](#_Toc126859640)

[Diapositive 60 : 59](#_Toc126859641)

[Diapositive 61 : 59](#_Toc126859642)

[Diapositive 62 et 63 : 60](#_Toc126859643)

[Diapositive 64 : 61](#_Toc126859644)

[Diapositive 65 : 61](#_Toc126859645)

[Diapositive 66 : 61](#_Toc126859646)

[Diapositive 67 : 62](#_Toc126859647)

[Diapositive 68 : 62](#_Toc126859648)

[Diapositive 69 : 62](#_Toc126859649)

[Diapositive 70 et 71 : 64](#_Toc126859650)

[Diapositive 72 : 64](#_Toc126859651)

[Diapositive 73 : 66](#_Toc126859652)

[Diapositive 74 : 67](#_Toc126859653)

[Diapositive 75 : 68](#_Toc126859654)

[Diapositive 76 : 69](#_Toc126859655)

[Diapositive 77 : 69](#_Toc126859656)

[Diapositive 78 : 70](#_Toc126859657)

[Diapositive 79 : 72](#_Toc126859658)

[D- Tenue à la corrosion 73](#_Toc126859659)

[Diapositive 82 : 73](#_Toc126859660)

[Diapositive 83 : 76](#_Toc126859661)

[Diapositive 84 : 77](#_Toc126859662)

[Diapositive 85 : 78](#_Toc126859663)

[Diapositive 87 : 79](#_Toc126859664)

[Diapositive 88 : 80](#_Toc126859665)

[Diapositive 89 : 81](#_Toc126859666)

[Diapositive 90 : 82](#_Toc126859667)

[Diapositive 91 : 83](#_Toc126859668)

[Diapositive 92 : 84](#_Toc126859669)

[Diapositive 93 : 84](#_Toc126859670)

[Diapositive 94 : 85](#_Toc126859671)

[Diapositive 95 : 85](#_Toc126859672)

[Diapositive 96 : 86](#_Toc126859673)

[Diapositive 97 : 86](#_Toc126859674)

[Diapositive 98 : 87](#_Toc126859675)

[Diapositive 99 : 88](#_Toc126859676)

[Diapositive 100 : 88](#_Toc126859677)

[Diapositive 101 : 88](#_Toc126859678)

[Diapositive 102 : 89](#_Toc126859679)

[Diapositive 103 : 89](#_Toc126859680)

[Diapositive 104 : 91](#_Toc126859681)

[Diapositive 105 : 92](#_Toc126859682)

[Diapositive 106 : 93](#_Toc126859683)

[Diapositive 107 : 95](#_Toc126859684)

[Diapositive 109 : 95](#_Toc126859685)

[Diapositive 110 : 96](#_Toc126859686)

[Diapositive 111 : 96](#_Toc126859687)

[Diapositive 112 : 97](#_Toc126859688)

[Diapositive 113 : 98](#_Toc126859689)

[Diapositive 114 : 99](#_Toc126859690)

[Diapositive 115 : 99](#_Toc126859691)

[Diapositive 116 : 100](#_Toc126859692)

[Diapositive 117 : 101](#_Toc126859693)

[E- Autres propriétés et caractéristiques 102](#_Toc126859694)

[Diapositive 120 : 102](#_Toc126859695)

[Diapositive 122 : 105](#_Toc126859696)

[Diapositive 123 : 106](#_Toc126859697)

[Diapositive 124 : 107](#_Toc126859698)

# 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.

# Propriétés physiques

### Diapositive 6 :

L’aluminium, comme tous les autres métaux, possède une multitude de propriétés que l’on peut regrouper en catégories plus ou moins cloisonnées : propriétés physiques, propriétés mécaniques, propriétés chimiques, etc. Il est essentiel que le concepteur ait une bonne connaissance des propriétés des métaux ou des autres matériaux qu’il utilise, puisqu’elles régissent de façon déterminante le comportement des ouvrages structuraux ainsi que leur utilisation sécuritaire.

Les propriétés physiques d’un métal sont plus ou moins constantes. Dans le cas de l’aluminium, elles varient quelque peu en fonction des alliages, mais pour les fins de calcul, les normes proposent l’utilisation de valeurs moyennes ou nominales (**typiques, quantités approximatives**). On trouve dans cette catégorie, à titre d’exemple, la masse volumique, le coefficient de dilatation thermique et le module d’élasticité.

**10.2 Densité**

La densité de l’aluminium à 20°C est environ le tiers de celle de l’acier. La masse volumique (ρ) varie de 2600 à 2800 kg/m3, mais la valeur retenue pour les calculs est la valeur moyenne, soit 2700 kg/m3. Cette propriété est une des plus importantes de l’aluminium sur le plan structural puisque c’est généralement pour sa légèreté que l’aluminium est choisi comme matériau dans les charpentes.

L’expérience montre que l’allègement obtenu avec une structure en alliage d’aluminium peut atteindre 50 % par rapport à une structure équivalente en acier ordinaire ou en acier inoxydable. Cela est possible en tenant compte du module d’élasticité (voir plus bas) et des limites de fatigue des assemblages soudés ou boulonnés en alliage d’aluminium. Pour cela, il ne faut pas faire une simple transposition de l’acier à l’aluminium, mais intégrer les propriétés spécifiques de l’aluminium. La légèreté n’est pas seulement un atout pour l’application. Elle a aussi des conséquences sur le fonctionnement des ateliers et les conditions de travail. Ainsi, la manutention des produits et des objets en aluminium est plus facile. Cela peut se traduire par un coût d’investissement moindre pour les équipements de manutention.

**10.3 Coefficient de dilatation thermique**

Le coefficient de dilatation thermique de l’aluminium, ou encore, le coefficient d’expansion linéaire (α) est égal à 24,0 X 10-6/°C. Il est environ deux fois plus élevé que celui de l’acier.

Du point de vue structural, les conséquences d’un coefficient de dilatation thermique élevé pour l’aluminium sont moins néfastes qu’on ne pourrait l’imaginer à prime abord. En effet, les charpentes métalliques sont généralement conçues pour permettre aux dilatations thermiques de se produire librement. Aucune contrainte significative n'est alors induite dans les structures d’aluminium bien que celles-ci se déforment linéairement deux fois plus que celles en acier. Lorsque les dilatations ne sont pas libres de se produire, les contraintes thermiques induites ne sont égales qu’aux deux-tiers de celles qui se développent dans une structure d’acier dans les mêmes conditions, en raison de la différence entre les modules d’élasticité (voir plus bas). De plus, puisque le point de fusion de l’aluminium est environ la moitié de celui de l'acier, les déformations des pièces d’aluminium au soudage sont du même ordre de grandeur que celles de l'acier. Il convient de rappeler que le point de fusion de l’aluminium est de 660°C, alors que celui de l'acier est de l’ordre de 1500°C.

Enfin, même si le coefficient de dilatation thermique de l’aluminium est le double de celui de l’acier, **les contraintes générées** par les variations de température dans un élément de construction fixe en aluminium ne seront égales qu’aux deux-tiers de celles induites dans une structure similaire en acier, en raison de la différence qui existe entre les modules d’élasticité.

$$σ=E ε\_{th}=E α ∆T=\left({E\_{acier}}/{3}\right)\left(2 α\_{acier}\right) ∆T=\frac{2}{3}σ\_{acier}$$

De plus, puisque le point de fusion de l’aluminium est environ la moitié de celui de l'acier, les déformations des pièces d’aluminium au soudage sont du même ordre de grandeur que celles de l'acier. Il convient de rappeler que le point de fusion de l’aluminium est de 660°C, alors que celui de l'acier est de l’ordre de 1500°C.

$$ε\_{th\\_aluminium}=α\_{aluminium} ∆T\_{aluminium} =2α\_{acier} \frac{1}{2}∆T\_{acier}=ε\_{th\\_acier}$$

### Diapositive 7 :

**10.4 Conductibilité thermique**

La conductibilité thermique de l’aluminium (λ) est nettement plus élevée que celle de l’acier. La conductibilité thermique est exprimée en Watt par mètre-degré Celsius. Dans le cas de l’aluminium, elle est égale à $185 {W}/{m∙ ℃}$.

Cette propriété oblige le soudeur à utiliser de grands apports de chaleur pour bien fusionner le métal d’apport avec le métal sous-jacent. Toutefois, la grande conductibilité thermique de l’aluminium est en partie compensée par le fait que le point de fusion est bas (**660** $℃$ **; celui de l’acier dur (0.40 à 0.70% de carbone) est 2500** $℃$) . La conductibilité thermique, combinée au grand coefficient d’expansion linéaire (coefficient de dilatation thermique) et aux apports de chaleur appréciables requis pour le soudage, tend à créer des déformations importantes au soudage. Toutefois, les grandes vitesses d’arc possibles avec les méthodes de soudage modernes contrebalancent cet effet.

<https://energieplus-lesite.be/theories/enveloppe9/comportement-des-materiaux4/conductivite-thermique-d-un-materiau/>

**La conductivité thermique** (**λ**) (ou *conductibilité thermique*) est une caractéristique propre à chaque matériau. Elle indique la quantité de chaleur qui se propage par conduction thermique :

* en 1 seconde,
* à travers 1 m² d’un matériau,
* épais d’un 1 m,
* lorsque la différence de température entre les deux faces est de 1 K (1 K = 1 °C).

La conductivité thermique s’exprime en **W/mK**.

Plus la conductivité thermique est élevée, plus le matériau est conducteur de chaleur. Plus elle est faible, plus le produit est isolant.

Ce coefficient n’est valable que pour les matériaux homogènes. Il n’a pas de sens pour les matériaux hétérogènes au travers desquels la chaleur se propage en même temps par conduction, convection et rayonnement.

Le **soudage à l'arc à l'électrode enrobée** (SAEE), soudage manuel ou soudage à la baguette, est l'un des procédés de soudage les plus utilisés.

Lorsque l'on approche l'électrode enrobée des pièces à assembler, il se crée un arc électrique qui dégage un fort pouvoir calorifique qui provoque la fusion de l'électrode

L'électrode enrobée, ou baguette de soudage, est constituée d'une âme métallique et d'un enrobage.

**10.5 Capacité thermique massique**

La capacité thermique massique (Cp) est une propriété des matériaux utilisée dans les calculs de résistance au feu. Pour l’aluminium, elle est de l’ordre de 900 J/kg °C (23).

<http://www.alloprof.qc.ca/BV/pages/oc1025.aspx>

La **capacité thermique** (aussi nommée chaleur massique ou capacité thermique massique) d’une substance, désignée par la lettre **c**, est une propriété caractéristique. Elle donne la capacité précise de cette substance d’absorber ou de dégager de la chaleur.
Elle est déterminée par la quantité d’énergie à apporter pour élever d’un degré la température de l’unité de masse d’une substance.

En d’autres mots, la capacité thermique massique est la quantité de chaleur qu’un kilogramme d'une substance doit absorber pour que sa température s’élève d’un degré Celsius. Il peut s’agir aussi de la quantité de chaleur qu’un kilogramme de cette substance doit perdre pour que sa température baisse d’un degré Celsius.

$$Q=m\*c\*∆ t$$

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Capacit%C3%A9_thermique_massique>

La **capacité thermique massique** (symbole [*c*](https://fr.wikipedia.org/wiki/C_%28lettre%29) ou [*s*](https://fr.wikipedia.org/wiki/S_%28lettre%29)), anciennement appelée **chaleur massique** ou **chaleur spécifique**[1](https://fr.wikipedia.org/wiki/Capacit%C3%A9_thermique_massique), reflète la capacité d'un matériau à accumuler de l'énergie sous forme thermique, pour une masse donnée, quand sa température augmente. Une grande capacité thermique signifiera qu'une grande quantité d'énergie peut être stockée moyennant une augmentation relativement faible de la température.

La **capacité thermique** (ou **capacité calorifique**) d'un corps est une grandeur permettant de quantifier la possibilité qu'a un corps d'absorber ou restituer de l'énergie par [échange thermique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Transfert_thermique) au cours d'une transformation pendant laquelle sa [température](https://fr.wikipedia.org/wiki/Temp%C3%A9rature) varie.

La capacité thermique est l'énergie qu'il faut apporter à un corps pour augmenter sa température d'un [kelvin](https://fr.wikipedia.org/wiki/Kelvin). Elle s'exprime en [joule](https://fr.wikipedia.org/wiki/Joule) par [kelvin](https://fr.wikipedia.org/wiki/Kelvin) (J/K). C'est une [grandeur extensive](https://fr.wikipedia.org/wiki/Extensivit%C3%A9_et_intensivit%C3%A9_%28physique%29) : plus la quantité de matière est importante plus la capacité thermique est grande. Toutes choses étant égales par ailleurs, plus la capacité thermique d'un corps est grande, plus grande sera la quantité d'énergie échangée au cours d'une transformation s'accompagnant d'une variation de la température de ce corps.

Capacité thermique massique (J·kg−1·K−1)

[Asphalte](https://fr.wikipedia.org/wiki/Asphalte) 1 021; [Brique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Brique_%28mat%C3%A9riau%29) 840; [Béton](https://fr.wikipedia.org/wiki/B%C3%A9ton) 880; [Granite](https://fr.wikipedia.org/wiki/Granite) 790; [Gypse](https://fr.wikipedia.org/wiki/Gypse) 1 090; [Marbre](https://fr.wikipedia.org/wiki/Marbre) 880; [Sable](https://fr.wikipedia.org/wiki/Sable) 835; [Verre](https://fr.wikipedia.org/wiki/Verre) 720; [Bois](https://fr.wikipedia.org/wiki/Bois) ≈ 1200-2700

**10.6 Conductivité électrique**

La conductivité électrique de l’aluminium varie entre 34 et 36 m/(Ω.mm2) et sa résistivité est de 2,83μΩ cm. La conductivité électrique de l’aluminium est six fois meilleure que celle de l’acier et égale à 60 % de celle du cuivre. Même si l’aluminium est moins conducteur que le cuivre, il est, par contre, moins pesant, ce qui le rend compétitif pour la fabrication de câbles électriques. L’ajout d’éléments d’alliage réduit la conductivité électrique de l’aluminium.

La **conductivité électrique** est l'aptitude d'un matériau à laisser les charges électriques se déplacer librement, autrement dit à permettre le passage du courant électrique.

La conductivité électrique est l'[inverse](https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Inverse.html) de la [résistivité](https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Resistivite.html). Elle correspond à la conductance d'une portion de [matériau](https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Materiau.html) de 1 m de [longueur](https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Longueur.html) et de 1 m2 de section.

Parmi les meilleurs conducteurs, il y a les métaux pour lesquels les porteurs de [charge](https://www.techno-science.net/definition/2663.html) sont les " électrons libres " et, les solutions d'électrolytes (ayant des ions en solution). Pour ces dernières, la valeur de la conductivité dépend de la nature des ions présents dans la solution et de leurs concentrations[[1]](https://www.techno-science.net/definition/1719.html). La conductivité d'une solution peut être mesurée à l'aide d'un [conductimètre](https://www.techno-science.net/definition/3134.html).

Certains [matériaux](https://www.techno-science.net/definition/4596.html), comme les semi-conducteurs, ont une conductivité qui dépend d'autres conditions physiques, comme la [température](https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Temperature.html) ou l'exposition à la [lumière](https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Lumiere.html), etc. Ces propriétés sont de plus en plus mise à profit pour réaliser des [capteurs](https://www.techno-science.net/definition/3690.html).

La **résistivité** d'un matériau, généralement symbolisée par la lettre grecque ρ, représente sa capacité à s'opposer à la circulation du courant électrique

La résistivité est la grandeur inverse de la [conductivité](https://fr.wikipedia.org/wiki/Conductivit%C3%A9_%C3%A9lectrique) (symbole : *σ*) : ρ = 1/ σ

Nom du métal Résistivité à 300 K(Ω⋅m): [Argent](https://fr.wikipedia.org/wiki/Argent)[1](https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9sistivit%C3%A9)16 × 10−9 ; [Cuivre](https://fr.wikipedia.org/wiki/Cuivre)[1](https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9sistivit%C3%A9) 17 × 10−9 ;[Or](https://fr.wikipedia.org/wiki/Or)[1](https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9sistivit%C3%A9) 22 × 10−9 ;[Aluminium](https://fr.wikipedia.org/wiki/Aluminium)[1](https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9sistivit%C3%A9) 28 × 10−9 ;[Magnésium](https://fr.wikipedia.org/wiki/Magn%C3%A9sium)[1](https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9sistivit%C3%A9) 43 × 10−9 ;[Bronze](https://fr.wikipedia.org/wiki/Bronze) 55 × 10−9 ;[Zinc](https://fr.wikipedia.org/wiki/Zinc)[1](https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9sistivit%C3%A9) 61 × 10−9 ;[Laiton](https://fr.wikipedia.org/wiki/Laiton)[1](https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9sistivit%C3%A9) 71 × 10−9 ;[Cadmium](https://fr.wikipedia.org/wiki/Cadmium)[1](https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9sistivit%C3%A9) 76 × 10−9 ;[Nickel](https://fr.wikipedia.org/wiki/Nickel)[1](https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9sistivit%C3%A9) 87 × 10−9 ;[Fer](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fer)[1](https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9sistivit%C3%A9) 100 × 10−9 ;[Platine](https://fr.wikipedia.org/wiki/Platine)[1](https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9sistivit%C3%A9) 111 × 10−9 ;[Étain](https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89tain)[1](https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9sistivit%C3%A9) 120 × 10−9 ;[Plomb](https://fr.wikipedia.org/wiki/Plomb)[1](https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9sistivit%C3%A9) 208 × 10−9 ;[Constantan](https://fr.wikipedia.org/wiki/Constantan) 500 × 10−9 ;[Mercure](https://fr.wikipedia.org/wiki/Mercure_%28chimie%29)[1](https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9sistivit%C3%A9) 941 × 10−9 ;[Nichrome](https://fr.wikipedia.org/wiki/Nichrome) 1 000 × 10−9

### Diapositive 8 :

**10.7 Module d’élasticité**

Le module d’élasticité (E), aussi appelé module de Young, est obtenu à partir de la courbe contrainte-déformation (σ – ε) d’une éprouvette d’aluminium soumise à un essai de traction (voir acétate). Le module élastique est, en fait, la pente de la droite lorsque la déformation de l’éprouvette (ε = ΔL/L) est directement proportionnelle à la contrainte. Le module élastique de l'aluminium varie entre 69 000 et 75 000 MPa et la valeur recommandée pour les calculs est 70 000 MPa. Le module d’élasticité de l’aluminium est donc trois fois moins élevé que celui de l’acier, ce qui est un aspect non négligeable pour le concepteur de charpentes qui doit non seulement tenir compte de la résistance des matériaux dans ses calculs, mais aussi de leur rigidité. Puisque l’aluminium est trois fois plus souple que l’acier pour un même niveau de sollicitation, il faut, à titre d’exemple, compenser en augmentant l’aire de la section (A) lorsqu'une pièce est sollicitée axialement (EA) ou en augmentant le moment d’inertie (I) lorsque la pièce est sollicitée en flexion (EI).

Le faible module d’élasticité de l’aluminium peut s’avérer avantageux dans certains cas, comme dans la construction de véhicules. **En effet, le mauvais état des routes cause des distorsions dans la charpente d’une voiture, ce qui engendre des contraintes. Ces dernières sont trois fois moins élevées dans une charpente de voiture en aluminium que dans une charpente équivalente en acier. Ceci empêche non seulement les déformations permanentes prématurées, mais influence aussi, de façon favorable, la durabilité du véhicule (fatigue).** Pour illustrer ce phénomène, une longue remorque en aluminium se renversa, à la suite d’un accident, et se tordit sur toute sa longueur. Les experts appelés sur les lieux, habitués à examiner de tels véhicules fabriqués en acier, étaient d’avis que la remorque était déformée de façon permanente. Cependant, ils furent étonnés de constater que le véhicule retrouva sa forme originale sans dommages lorsqu’il fut remis sur ses roues, puisque la structure d’aluminium peut se déformer élastiquement trois fois plus qu’une structure équivalente en acier.

Enfin, même si le coefficient de dilatation thermique de l’aluminium est le double de celui de l’acier, **les contraintes générées** par les variations de température dans un élément de construction fixe en aluminium ne seront égales qu’aux deux-tiers de celles induites dans une structure similaire en acier, en raison de la différence qui existe entre les modules d’élasticité.

### Diapositive 9 :

**10.8 Coefficient de Poisson**

Au cours d’un essai de traction, l’allongement longitudinal de l’éprouvette s’accompagne d’une réduction des dimensions transversales. C’est l’effet de Poisson. Le coefficient de Poisson (ν) est égal au rapport de la contraction transversale sur la déformation longitudinale (ν = ε’/ε). Dans le domaine élastique, ce rapport est égal à 0,33 pour l’aluminium.

**10.9 Module de Coulomb**

La courbe cisaillement-distorsion de l’aluminium (τ – $γ$) est analogue à la courbe σ – ε obtenue en traction. La pente du tronçon rectiligne de la phase élastique s’appelle le module d’élasticité transversale ou module de cisaillement, ou module de Coulomb (G). Pour un matériau isotrope tel que l’aluminium, on peut démontrer l’existence de la relation suivante entre les modules de Young et de Coulomb :

$$G = \frac{E}{2(1 + v)} $$

Dans le domaine élastique, la valeur du module de Coulomb de l’aluminium est donc égale à 26 000 MPa.

### Diapositive 10 :

**10.10 Résumé des propriétés physiques**

Les principales propriétés physiques de l’aluminium à la température de la pièce sont comparées à celles de l’acier structural et de l’acier inoxydable dans le tableau 6.

La **capacité thermique massique** (symbole [*c*](https://fr.wikipedia.org/wiki/C_%28lettre%29) ou [*s*](https://fr.wikipedia.org/wiki/S_%28lettre%29)), anciennement appelée **chaleur massique** ou **chaleur spécifique**[1](https://fr.wikipedia.org/wiki/Capacit%C3%A9_thermique_massique), reflète la capacité d'un matériau à accumuler de l'énergie sous forme thermique, pour une masse donnée, quand sa température augmente. Une grande capacité thermique signifiera qu'une grande quantité d'énergie peut être stockée moyennant une augmentation relativement faible de la température.

La **capacité thermique** (ou **capacité calorifique**) d'un corps est une grandeur permettant de quantifier la possibilité qu'a un corps d'absorber ou restituer de l'énergie par [échange thermique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Transfert_thermique) au cours d'une transformation pendant laquelle sa [température](https://fr.wikipedia.org/wiki/Temp%C3%A9rature) varie.

La capacité thermique est l'énergie qu'il faut apporter à un corps pour augmenter sa température d'un [kelvin](https://fr.wikipedia.org/wiki/Kelvin). Elle s'exprime en [joule](https://fr.wikipedia.org/wiki/Joule) par [kelvin](https://fr.wikipedia.org/wiki/Kelvin) (J/K). C'est une [grandeur extensive](https://fr.wikipedia.org/wiki/Extensivit%C3%A9_et_intensivit%C3%A9_%28physique%29) : plus la quantité de matière est importante plus la capacité thermique est grande. Toutes choses étant égales par ailleurs, plus la capacité thermique d'un corps est grande, plus grande sera la quantité d'énergie échangée au cours d'une transformation s'accompagnant d'une variation de la température de ce corps.

# Propriétés mécaniques

### Diapositive 13 :

**11.1 Introduction**

**Les propriétés mécaniques**, contrairement aux propriétés physiques, sont très variables d’un alliage à l’autre. Le concepteur doit avoir recours à des tableaux de données préalablement compilées et obtenues à la suite de nombreux essais normalisés sur les échantillons. Les propriétés mécaniques utilisées pour le calcul des charpentes sont la résistance à divers types de sollicitations et la résistance à la fatigue. **Les valeurs de résistance recommandées par les normes sont rarement des valeurs moyennes ou typiques, mais plutôt des valeurs garanties (nominales)** qu’il suffit de pondérer à l’aide de coefficients de tenue appropriés.

**11.2 Résistance en traction et ductilité**

Du point de vue structural, les principales propriétés mécaniques de l’aluminium sont la résistance en traction et la ductilité. La résistance mécanique est définie, à la base, par deux contraintes, soit la contrainte de rupture et la limite élastique définie comme la contrainte au-dessus de laquelle l’aluminium subit des déformations permanentes. **La ductilité est la capacité pour un métal de subir de grandes déformations avant la rupture**.

On mesure la résistance en traction et la ductilité d’un alliage d’aluminium à l’aide d’un essai de traction exécuté dans des conditions définies par les normes. Cet essai consiste à solliciter en traction une éprouvette de dimensions normalisées entre les mâchoires d’une machine de traction et à mesurer, à la température de la pièce, la force appliquée et l’allongement de l’éprouvette (ΔL) sur une longueur prédéterminée (L). Cet essai permet d’évaluer la limite élastique de l’alliage (Fy), la contrainte ultime (Fu) et le pourcentage d’allongement à la rupture (εT = ΔL/L), qui est une mesure de la ductilité. On obtient une courbe contrainte-déformation comme celle montrée sur la figure 30. La courbe contrainte-déformation d’un alliage d’aluminium prend l’allure d’une courbe continue sous fluage.

On distingue toutefois, dans le comportement d’une éprouvette d’alliage d’aluminium soumise à un essai de traction, trois phases successives. Il y a d’abord la phase élastique où la déformation de l’éprouvette est directement proportionnelle à la contrainte. La courbe représentative de cette phase est une droite reliant l’origine au point A sur la figure 30 (voir acétate). La pente de cette droite est définie comme le module d’élasticité ou module de Young (E) défini plus haut. Si la force est relâchée avant que la déformation atteigne cette valeur, l’éprouvette reprend sa longueur initiale (L).

Puisque la courbe contrainte-déformation des alliages d’aluminium ne comporte pas de plateau plastique bien défini, comme c’est le cas pour l’acier, il a été convenu de retenir comme valeur de la limite élastique pour les calculs, la contrainte correspondant à une déformation résiduelle de 0,2 % (5, 10). La limite élastique est un paramètre très important, car le début de la phase plastique est souvent associé à un état limite ultime. Autrement dit, dans les calculs, la limite élastique est souvent considérée comme la limite au-delà de laquelle on ne peut faire travailler sous charge les alliages d’aluminium.

Si la déformation excède la valeur correspondant à celle du point A ou, à la rigueur, à celle du point B, on entre dans la phase plastique, c’est-à-dire que l’éprouvette conservera une déformation permanente ou déformation plastique si la force est relâchée. Par exemple, lorsqu'on atteint un niveau quelconque entre les points A et C, soit e ou f sur la courbe de la figure 30, avant de relâcher la force, la contrainte revient à zéro en suivant une droite de pente E, c’est-à-dire parallèle à la droite de la phase élastique. La déformation permanente est alors mesurée sur l’ace des abscisses entre l’origine et le point e’ ou f’. Si on augmente à nouveau la force, on suit la même pente jusqu’au point e ou f sur la courbe contrainte-déformation pour ensuite suivre cette courbe en direction du point C. Les alliages d’aluminium se comportent donc élastiquement selon e – e’ ou f – f’, mais en conservant une déformation permanente. Ainsi, la déformation plastique qui se produit entre le début du chargement et le point C rend le matériau plus résistant et plus dur, c’est-à-dire moins ductile. Le matériau est en fait travaillé à froid par étirage ou écroui, tel que décrit à la sous-section 7.4[[1]](#footnote-1).

Lorsque la contrainte a atteint sa valeur maximale (fu), appelée contrainte ou résistance ultime en traction, ou tout simplement résistance en traction, c’est le début de la phase de rupture caractérisée par la striction de la section, c’est-à-dire une réduction visible et très localisée de la section de l’éprouvette à l’endroit où va se produire la cassure. Dans cette phase, la contrainte diminue, mais cette diminution est purement mathématique, car on calcule la contrainte en divisant la force appliquée par l’aire initiale de la section de l’éprouvette. Si on tenait compte de la réduction de l’aire de la section, la contrainte augmenterait jusqu’à la rupture. Jusqu’au point C, la déformation était uniforme sur toute la longueur de l’éprouvette. Passé ce point, elle est plutôt localisée à cause de l’effet de striction.

Durant l’essai de traction, après chaque accroissement de charge, on mesure l’allongement entre deux repères préalablement tracés sur l’éprouvette et distants d’une longueur qui peut varier en fonction de la grosseur des éprouvettes, de leur forme, ou des circonstances. L’allongement à la rupture s’obtient en rejoignant les deux morceaux après la rupture et en mesurant la longueur entre les deux repères. Cette mesure permet de déterminer si la ductilité de l’alliage d’aluminium répond aux exigences des normes en fonction des applications. Dans l’exemple de la figure 30, la déformation totale (εt) à la rupture est de l’ordre de 9,5 % (point sur la figure). La déformation totale dépend de la forme de l’échantillon alors que la déformation uniforme en est indépendante. En général, la distance entre les repères d’échantillons circulaires est égales à quatre ou cinq fois le diamètre de l’échantillon. La déformation totale est alors identifiée par ε4 ou ε5, selon le cas. Toutefois, un écart fixe entre les repères, égal à 2 pouces (ε2), 50 mm (ε50) ou 80 mm (ε80), est utilisé pour tester les produits plats de moins de 10 mm d’épaisseur.

Dans les tableaux présentés à la Section 5 de la référence (2[[2]](#footnote-2)), on constate que la ductilité des alliages de corroyage varie entre 4 et 45 % mais qu’elle est beaucoup plus faible pour les alliages de fonderie, alors qu’elle varie entre 1,0 et 8,0 % pour les alliages courants. La ductilité ne fait pas l’objet de considérations particulières dans la norme canadienne puisque les alliages recommandés possèdent une ductilité suffisante pour être utilisés dans toutes les méthodes de calcul en régime plastique (S157).

### Diapositive 14 :

Avant de présenter les propriétés mécaniques des alliages d’aluminium couramment utilisés en construction, il convient d’examiner un peu plus en détail les différences de comportement entre l’acier et l’aluminium dans le domaine élastique, à partir des courbes contrainte-déformation tracées sur la figure 31 (voir acétate). On reconnaît en effet que l’acier présente un plateau plastique, à l’exception des aciers à très haute résistance, et que l’aluminium n’en a pas. La différence la plus fondamentale réside dans le fait que la pente de la courbe contrainte-déformation de l’acier est trois fois plus raide que celle de l’aluminium dans le domaine élastique. À un niveau de contrainte donné (niveau A sur la figure, par exemple), un alliage d’aluminium est ainsi trois plus déformé que l’acier. À un niveau de déformation B, toutefois, un alliage d’aluminium peut encore être dans le domaine élastique alors que l’acier est déjà déformé plastiquement. On note, de plus, que la limite élastique d’un alliage d’aluminium à haute résistance peut être supérieure à celle d’un acier structural d’usage courant (300-350MPa).

### Diapositive 15 :

Deux exemples simples illustreront les différences de comportement entre l’acier et l’aluminium à contraintes égales et à déformations égales.

Lorsque deux pièces de section rectangulaire de mêmes dimensions sont sollicitées en flexion, tel qu’illustré que la figure 32a (voir acétate), la pièce en aluminium fléchit trois fois plus que la pièce en acier en raison de la différence des modules d’élasticité (niveau A sur la figure 31). Les contraintes dans les sections sont toutefois les mêmes lorsque les pièces se déforment élastiquement. Le concepteur de l’aluminium cherchera donc à compenser pour le faible module d’élasticité de l’aluminium en augmentant le moment d’inertie de la section d’aluminium de façon à obtenir une flèche acceptable, sinon comparable à celle de la section d’acier. Il aura tout intérêt à tirer profit de l’avantage que confèrent les extrusions à l’aluminium en choisissant une section de dimensions et de forme optimales (figure 6a[[3]](#footnote-3)). L’acier est trois fois plus lourd que l’aluminium pour une section de même dimension. En augmentant le moment d’inertie de la section en aluminium, le concepteur ne tire pas pleinement avantage de la faible densité de l’aluminium. Dans la plupart des cas, toutefois, une économie de poids de l’ordre de 50 % peut être réalisée lorsque l’aluminium remplace l’acier.

Pour fins d’illustration, augmentons la profondeur de la section rectangulaire de la pièce en aluminium montrée sur la figure 32a, de façon à ce que la rigidité flexionnelle *EI* de cette dernière soit égale à celle de la pièce d’acier. Les flèches des poutres fléchies seront alors égales dans le domaine élastique. L’économie de poids ainsi réalisée est de l’ordre de 50%, tel que démontré sur la figure 2.32b (voir acétate 15). Il convient de rappeler que la solution optimale n’est pas obtenue en augmentant la profondeur de la section pleine, mais en tirant profit de la facilité de fabrication de l’aluminium (extrusions) pour obtenir une géométrie de section plus convenable en flexion.

### Diapositive 16 :

Selon les situations, l’aluminium peut s’avérer un choix intéressant lorsqu’une déformation donnée dans une structure doit être maintenue dans le domaine élastique. L’aluminium est alors supérieur à l’acier, même à sections égales, puisqu'un alliage d’aluminium possédant une limite élastique équivalente à une nuance d’acier donnée est en mesure d’absorber une déformation trois fois plus grande que celle de l’acier avant de se plastifier. On peut observer le phénomène en suivant la droite hachurée dont l’origine est le point B, sur la figure 31. À une élongation correspondant à celle du point B, l’acier est déformé plastiquement alors que l’aluminium se comporte encore élastiquement. Une structure en aluminium est donc moins sensible à une déformation imposée aussi longtemps que la structure demeure dans le domaine élastique. Si les deux poutres de la figure 32a (voir acétate 14) étaient chargées de façon à obtenir une flèche égale à celle correspondant au point B sur la figure 31 et que les charges étaient ensuite enlevées, la poutre d’aluminium retournerait à sa position de départ alors que la poutre d’acier demeurerait déformée en permanence (voir acétate).

### Diapositive 17 et 18 :

**11.3 Résistances nominales**

Les propriétés mécaniques minimales ou nominales recommandées par les normes pour le calcul des charpentes en alliages d’aluminium sont obtenues à partir d’essais de traction standards semblables à ceux décrits plus haut. Les valeurs de Fy, Fu et de Et sont à la base de toutes les valeurs de résistance utilisées dans les calculs pour chacun des alliages d’aluminium. Les propriétés mécaniques des alliages non soudés sont établies à des valeurs que 99 % des alliages sont susceptibles d’égaler ou de dépasser avec un niveau de confiance de 0,95. Le niveau de confiance pour les alliages soudés est de 0,75.

La résistance ultime en compression n’existe pas pour l’aluminium puisqu’elle n’a pas de signification précise. En raison de sa ductilité, l’aluminium sollicité en compression finit par s’écraser longtemps après avoir passé la déformation élastique. Seule la limite élastique en compression est utilisée dans les calculs, pour la plupart des alliages. Dans la norme canadienne, elle est considérée égale à la limite élastique de traction pour les plaques en alliages traités thermiquement et les extrusions.

$$F\_{cy} = F\_{ty} = F\_{y}$$

C’est aussi le cas pour les alliages traités à froid, même si la limite élastique en compression est légèrement inférieure à la valeur équivalente en traction. La différence ne devrait pas affecter les calculs de façon significative. Dans une édition antérieure de la norme canadienne, la limite élastique en compression des alliages non traitables thermiquement était considérée égale à 90 % de la limite élastique en traction. C’est aussi dans le but de simplifier les calculs qu’on ne fait pas de distinction entre les valeurs de résistance en traction pour les contraintes calculées dans le sens longitudinal ou transversal des plaques laminées.

Les valeurs de résistance en cisaillement (Fsy, Fsu) et de résistance à la pression diamétrale (Fbu) sont évaluées à partir des valeurs obtenues des essais de traction. Pour le cisaillement élastique, la résistance est considérée égale à $0,6 F\_{y}$. La constante 0,6 est une valeur arrondie de $1 / \sqrt{3}$ qui découle du critère de rupture de Von Mises-Hencky.

$$F\_{sy} = 0,6 F\_{y}$$

En théorie, il n’est pas justifié d’utiliser le critère de von Mises à la résistance ultime puisqu’il ne s’applique que dans le domaine élastique. Les résultats obtenus sont toutefois satisfaisants puisqu’ils varient entre – 10 % et +5 % des valeurs mesurées. La résistance ultime en cisaillement ou à l’effort tranchant est donc évaluée à l’aide de l’équation suivante, à moins qu’une valeur plus précise ne soit obtenue expérimentalement :

$$F\_{su} = 0,6 F\_{u}$$

[ $\sqrt{σ\_{x}^{2}+3τ^{2}}\leq f\_{y}$ avec $σ\_{x}=0⟹τ\leq \frac{f\_{y}}{\sqrt{3}}    (τ\leq  0.58f\_{y})$ ]

La résistance à la pression diamétrale (Fbu) n’est exprimée qu’en fonction de la résistance ultime en traction dans les assemblages boulonnés (29). Pour une pince longitudinale variant entre 1,5 et 2,0 d, la résistance à la pression diamétrale est gouvernée par le cisaillement des pièces assemblées. Au-delà de deux fois le diamètre (d) du boulon, la résistance demeure constante et est égale à 2 Fu.

$$F\_{bu} = 2 F\_{u}$$

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Pression_diam%C3%A9trale>

La **pression diamétrale** est un modèle décrivant la [pression de contact](https://fr.wikipedia.org/wiki/Pression_de_contact) entre deux pièces en [liaison mécanique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Liaison_m%C3%A9canique) de type [pivot glissant](https://fr.wikipedia.org/wiki/Liaison_pivot_glissant), [pivot](https://fr.wikipedia.org/wiki/Liaison_pivot) ou [rotule](https://fr.wikipedia.org/wiki/Liaison_rotule). Le terme vient du fait que les forces surfaciques sont radiales, dirigées selon un diamètre, contrairement au modèle de la [pression de Hertz](https://fr.wikipedia.org/wiki/Pression_de_Hertz) pour lequel les forces sont orientées selon l'effort presseur.

La pression diamétrale est bien adaptée au cas où les diamètres de la pièce mâle et de la pièce femelle sont très proches. Si les diamètres sont très différents, le modèle de Hertz est mieux adapté.

Si la pression diamétrale est excessive, cela provoque du [matage](https://fr.wikipedia.org/wiki/Matage_%28m%C3%A9canique%29).

La résistance à la pression diamétrale calculée à partir de la limite élastique en traction n’a pas d’utilité puisque les déformations sont petites et qu’elles ne correspondent pas vraiment à un état limite.

Il convient enfin de souligner que les tableaux 3.3-1M et 3.3-2M de la Partie 1-A de la référence (2.4[[4]](#footnote-4)) contiennent des valeurs plus précises des différentes caractéristiques mécaniques définies plus haut pour la plupart des alliages de corroyage.

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.

### Diapositive 19 :

Les alliages et produits les plus susceptibles d’être utilisés dans les charpentes, au Canada et en Amérique, sont présentés dans le tableau ci-contre (voir acétate). Le concepteur n’est toutefois pas limité qu’à ces seuls alliages puisque la norme canadienne n’interdit pas l’utilisation des alliages répertoriés dans les références (2[[5]](#footnote-5)) et (12[[6]](#footnote-6)).

### Diapositive 20 :

Les valeurs nominales de résistance en traction (Fu et Fy) recommandées par la norme canadienne pour les alliages du tableau 7 (voir acétate 18), sont présentées dans le tableau 8 (voir acétate). Bien que la résistance en traction varie quelque peu selon les produits et les épaisseurs, une seule valeur caractéristique est proposée dans le but de faciliter les calculs. Le lecteur pourra, au besoin, obtenir des données plus complètes dans la littérature.

Le tableau 8 contient aussi les valeurs de la limite élastique (Fwy) du métal dans les zones affectées par le soudage ou, si l’on préfère, affectées thermiquement (ZAT). Tel que démontré dans la sous-section 2.6.1[[7]](#footnote-7), le soudage a pour effet de diminuer, de façon parfois très marquée, la résistance mécanique des alliages d’aluminium, à l’exception, peut-être, de certains alliages de la série 5000. Lorsque les propriétés mécaniques des alliages dans les zones affectées par le soudage ne sont pas connues, il est recommandé d’utiliser celles correspondant à l’état de mise en solution et trempe (état T4 ; figure 27[[8]](#footnote-8)) pour les alliages traités thermiquement (séries 2000, 6000 et 7000) et celles correspondant à la condition de recuit (état O ; figure 25[[9]](#footnote-9)) pour les alliages non traitables thermiquement (séries 3000 et 5000).

### Diapositive 21 :

La résistance ultime (Fwu) de quelques alliages, utilisés comme métal de base, en combinaison avec les alliages 4043 et 5356, utilisés comme métal d’apport pour le soudage, est présentée dans le tableau 9 (voir acétate). Une liste plus exhaustive d’alliages compatibles pour le soudage et les valeurs correspondantes de résistance en traction peuvent être trouvées dans la littérature spécialisée.

### Diapositive 22 :

**11.3 Résistances nominales**

Les propriétés mécaniques minimales ou nominales recommandées par les normes pour le calcul des charpentes en alliages d’aluminium sont obtenues à partir d’essais de traction standards semblables à ceux décrits plus haut. Les valeurs de Fy, Fu et de εt sont à la base de toutes les valeurs de résistance utilisées dans les calculs pour chacun des alliages d’aluminium. Les propriétés mécaniques des alliages non soudés sont établies à des valeurs que 99 % des alliages sont susceptibles d’égaler ou de dépasser avec un niveau de confiance de 0,95. Le niveau de confiance pour les alliages soudés est de 0,75.

La résistance ultime en compression n’existe pas pour l’aluminium puisqu’elle n’a pas de signification précise. En raison de sa ductilité, l’aluminium sollicité en compression finit par s’écraser longtemps après avoir passé la déformation élastique. Seule la limite élastique en compression est utilisée dans les calculs, pour la plupart des alliages. Dans la norme canadienne, elle est considérée égale à la limite élastique de traction pour les plaques en alliages et les extrusions.

$$F\_{cy} = F\_{ty} = F\_{y}$$

C’est aussi le cas pour les alliages traités à froid, même si la limite élastique en compression est légèrement inférieure à la valeur équivalente en traction. La différence ne devrait pas affecter les calculs de façon significative. Dans une édition antérieure de la norme canadienne, la limite élastique en compression des alliages non traitables thermiquement était considérée égale à 90 % de la limite élastique en traction. C’est aussi dans le but de simplifier les calculs qu’on ne fait pas de distinction entre les valeurs de résistance en traction pour les contraintes calculées dans le sens longitudinal ou transversal des plaques laminées.

Les valeurs de résistance en cisaillement (Fsy, Fsu) et de résistance à la pression diamétrale (Fbu) sont évaluées à partir des valeurs obtenues des essais de traction. Pour le cisaillement élastique, la résistance est considérée égale $0,6 F\_{y}$. La constante 0,6 est une valeur arrondie de 1 / $\sqrt{3}$ qui découle du critère de rupture de von Mises-Hencky.

$$F\_{sy} = 0,6 F\_{y}$$

En théorie, il n’est pas justifié d’utiliser le critère de von Mises à la résistance ultime puisqu’il ne s’applique que dans le domaine élastique. Les résultats obtenus sont toutefois satisfaisants puisqu’ils varient entre – 10 % et +5 % des valeurs mesurées. La résistance ultime en cisaillement ou à l’effort tranchant est donc évaluée à l’aide de l’équation suivante, à moins qu’une valeur plus précise ne soit obtenue expérimentalement :

$$F\_{su} = 0,6 F\_{u}$$

La résistance à la pression diamétrale (Fbu) n’est exprimée qu’en fonction de la résistance ultime en traction dans les assemblages boulonnés. Pour une pince longitudinale variant entre 1,5 et 2,0 d, la résistance à la pression diamétrale est gouvernée par le cisaillement des pièces assemblées. Au-delà de deux fois le diamètre (d) du boulon, la résistance demeure constante et est égale à 2 Fu.

$$F\_{bu} = 2 F\_{u}$$

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Pression_diam%C3%A9trale>

La **pression diamétrale** est un modèle décrivant la [pression de contact](https://fr.wikipedia.org/wiki/Pression_de_contact) entre deux pièces en [liaison mécanique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Liaison_m%C3%A9canique) de type [pivot glissant](https://fr.wikipedia.org/wiki/Liaison_pivot_glissant), [pivot](https://fr.wikipedia.org/wiki/Liaison_pivot) ou [rotule](https://fr.wikipedia.org/wiki/Liaison_rotule). Le terme vient du fait que les forces surfaciques sont radiales, dirigées selon un diamètre, contrairement au modèle de la [pression de Hertz](https://fr.wikipedia.org/wiki/Pression_de_Hertz) pour lequel les forces sont orientées selon l'effort presseur.

La pression diamétrale est bien adaptée au cas où les diamètres de la pièce mâle et de la pièce femelle sont très proches. Si les diamètres sont très différents, le modèle de Hertz est mieux adapté.

Si la pression diamétrale est excessive, cela provoque du [matage](https://fr.wikipedia.org/wiki/Matage_%28m%C3%A9canique%29).

La résistance à la pression diamétrale calculée à partir de la limite élastique en traction n’a pas d’utilité puisque les déformations sont petites et qu’elles ne correspondent pas vraiment à un état limite.

Il convient enfin de souligner que les tableaux 3.3-1M et 3.3-2M de la Partie 1-A de la référence (2.4) contiennent des valeurs plus précises des différentes caractéristiques mécaniques définies plus haut pour la plupart des alliages de corroyage.

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.

### Diapositive 23 :

Nous avons vu, sur la figure 30[[10]](#footnote-10), que lorsqu’une pièce en aluminium est sollicitée au-delà de la limite élastique, elle se déforme plastiquement et se durcit, et que lorsque la charge est appliquée de façon répétitive, la pièce d’aluminium se déforme élastiquement jusqu’à la nouvelle limite élastique. Des mesures très précises de la déformation démontrent que **chaque déchargement dans le domaine élastique** entraîne une petite **contraction plastique** et que chaque chargement entraîne une petite extension plastique, principalement aux endroits où il y a **concentration de contraintes**. Si la contrainte induite est suffisamment grande et que le nombre de cycles de chargement et de déchargement est suffisant, **le durcissement s’accroît**, en raison de l’alternance des petites déformations plastiques. Éventuellement, la plasticité du métal est épuisée à un endroit donné et une fissure microscopique se forme. La fissure croît graduellement avec les cycles de chargement pour, finalement, entraîner la rupture de la pièce. Ainsi, des pièces en alliages d’aluminium soumises à des cycles répétés de charges peuvent se fissurer de façon inattendue à des niveaux de contraintes inférieurs à la limite élastique. Ce phénomène est appelé rupture par fatigue.

**La résistance d’une pièce à la fatigue** est définie comme **le nombre de cycles de chargement avant la rupture (N)** pour une différence de contrainte (Δσ) donnée. On définit la différence des contraintes cycliques comme la différence algébrique entre la contrainte maximale (σmax) et la contrainte minimale (σmin).

$$Δσ = σ\_{max} – σ\_{min}$$

Selon la convention établie, on considère les contraintes de traction positives et les contraintes de compression négatives.

La résistance à la fatigue des pièces et des assemblages s’exprime sous la forme de courbes qui relient la différence de contraintes appliquée ($S=Δσ$) au nombre de cycles de chargement uniforme (N) conduisant à la rupture. Ces courbes, communément appelées courbes S-N de résistance à la fatigue, s’appuient sur de très nombreux résultats d’essais, sous variations de contraintes d’amplitude constante, réalisés sur des éléments de structure en aluminium comportant un détail particulier. Les résultats d’essais de fatigue marquant la ruine de la pièce sont portés sur un **diagramme bi-logarithmique**, identique à celui de la figure 33 (voir acétate) avec, en abscisse, le logarithme du nombre de cycles et, en ordonnée, le logarithme de la différence des contraintes.

**Figure 33 – Exemple de courbe de résistance à la fatigue (courbe S-N)**

Pour chaque détail structural, et par conséquent pour chaque courbe de résistance, il existe une différence des contraintes pour laquelle on ne peut avoir de rupture par fatigue, même après un nombre infini de répétitions du chargement cyclique si l’amplitude est gardée constante. C’est-ce qu’on appelle la **limite d’endurance ou la limite de fatigue**. La limite d’endurance est représentée par le segment horizontal de la courbe de résistance à la fatigue sur la figure 33. **Pour l’aluminium, la limite d’endurance est généralement établie à 5 X 106 cycles**. Lorsque le spectre de chargement n’est pas constant, la courbe S-N se prolonge au-delà de ce point **avec une pente égale ou moins prononcée jusqu’à une nouvelle limite d’endurance établie à 108 cycles ou plus**, selon les normes. **Les courbes S-N ne sont pas fonction des types d’alliages, de corroyage. Toutefois chaque alliage possède sa propre limite d’endurance**, évaluée dans la référence (2[[11]](#footnote-11)) à 5 X 108 cycles sur des éprouvettes rondes polies. Des valeurs indicatives de limites d’endurance, lesquelles ne sont pas recommandées pour les calculs, sont présentées dans la Partie V de la référence (2) pour la plupart des alliages de corroyage. Le tableau 10 (voir acétate 24) donne des valeurs de la limite d’endurance extraites de la référence (2) pour quelques alliages courants.

Dans la conception et le calcul des structures, il est important de minimiser les concentrations de contraintes. Ces dernières sont inévitables et se trouvent le plus souvent dans les assemblages et là où la section présente des changements brusques. Dans le matériel lui-même, les contraintes se concentrent autour des vides, des inclusions et autres imperfections. Les soudures sont une cause majeure de rupture par fatigue.

**Tableau 10 – Limite d’endurance en fatigue pour quelques alliages courants (basée sur 5 X 108 cycles et σmax /σmin = -1**

* **La limite d'endurance théorique** : limite supérieure de la contrainte périodique pouvant être appliquée indéfiniment sans amener de rupture.
* **La limite conventionnelle** : valeur maxi de la contrainte qui n'entraîne pas la rupture avant un nombre de cycles donné

### Diapositive 24 :

**Tableau 10 – Limite d’endurance en fatigue pour quelques alliages courants (basée sur 5 X 108 cycles et σmax /σmin = -1**

Pour chaque détail structural, et par conséquent pour chaque courbe de résistance, il existe une différence des contraintes pour laquelle on ne peut avoir de rupture par fatigue, même après un nombre infini de répétitions du chargement cyclique si l’amplitude est gardée constante. C’est-ce qu’on appelle la **limite d’endurance ou la limite de fatigue**. La limite d’endurance est représentée par le segment horizontal de la courbe de résistance à la fatigue sur la figure 33. **Pour l’aluminium, la limite d’endurance est généralement établie à 5 X 106 cycles**. Lorsque le spectre de chargement n’est pas constant, la courbe S-N se prolonge au-delà de ce point **avec une pente égale ou moins prononcée jusqu’à une nouvelle limite d’endurance établie à 108 cycles ou plus**, selon les normes. **Les courbes S-N ne sont pas fonction des types d’alliages, de corroyage. Toutefois, chaque alliage possède sa propre limite d’endurance**, évaluée dans la référence (2) à 5 X 108 cycles sur des éprouvettes rondes polies. Des valeurs indicatives de limites d’endurance, lesquelles ne sont pas recommandées pour les calculs, sont présentées dans la Partie V de la référence (2) pour la plupart des alliages de corroyage. Le tableau 10 donne des valeurs de la limite d’endurance extraites de la référence (2) pour quelques alliages courants.

Dans la conception et le calcul des structures, il est important de minimiser les concentrations de contraintes. Ces dernières sont inévitables et se trouvent le plus souvent dans les assemblages et là où la section présente des changements brusques. Dans le matériel lui-même, les contraintes se concentrent autour des vides, des inclusions et autres imperfections. Les soudures sont une cause majeure de rupture par fatigue.

**Tableau 10 – Limite d’endurance en fatigue pour quelques alliages courants (basée sur 5 X 10 8 cycles et σmax /σmin = -1**

* **La limite d'endurance théorique** : limite supérieure de la contrainte périodique pouvant être appliquée indéfiniment sans amener de rupture.
* **La limite conventionnelle** : valeur maximale de la contrainte qui n'entraîne pas la rupture avant un nombre de cycles donné

### Diapositive 26 :

**11.5 Dureté**

On a vu, à la sous-section 6.2[[12]](#footnote-12), que la dureté des alliages d’aluminium pouvait varier en fonction des divers traitements métallurgiques que l’on fait subir aux alliages. Ainsi, à titre d’exemple, un alliage dans l’état H18 (Dur) est nettement plus résistant à la déformation qu’un alliage à l’état O (recuit). La dureté de l’aluminium est généralement en relation directe avec la contrainte ultime en traction (Fu) de l’alliage. Elle peut être mesurée à l’aide de l’essai Brinell, Rockwell ou Vickers. Pour l’aluminium, l’essai Brinell est de loin le plus fréquemment utilisé.

L’essai consiste à mesurer le diamètre de l’empreinte laissé par une bille d’acier qui, sous l’action d’un poids ou d’une presse hydraulique, agit sur la surface d’une pièce en aluminium pendant une période de temps prédéterminée. Ainsi, une bille de 2,5 mm de diamètre peut être soumise à l’action d’une force constante et égale à 153 Newton pendant 30 secondes, pour mesurer la dureté d’une pièce d’aluminium. Plus le matériau est mou, plus le diamètre de l’empreinte est grand. Les mesures de dureté donnent un estimé rapide et approximatif de la résistance mécanique relative d’un alliage d’aluminium, mais l’information obtenue sur le comportement de l’alliage demeure très limitée. Il n’y a pas, comme pour l’acier, de corrélation assez fiable entre la dureté et la contrainte de rupture de l’aluminium.

**L'essai de dureté Brinell**

* L'essai de dureté Brinell **est utilisé pour les grands échantillons à structure granulaire grossière ou non homogène**. L'essai de dureté Brinell (HBW) laisse une empreinte relativement grande faite avec une bille de **carbure de tungstène**. La taille de l'empreinte est lue **par mesure optique**.
* Utilisé pour les matériaux à structure granulaire grossière ou non homogène.
* Utilisé pour les grands échantillons
* Convient pour les pièces forgées ou en fonte dont les motifs structurels sont de taille importante

**Essai de dureté Vickers**

* **L'essai de dureté Vickers convient à tous les matériaux solides y compris métalliques**. La dureté Vickers (HV) est calculée en mesurant, à une charge donnée, les longueurs des 2 diagonales d’une empreinte laissée dans le matériau de l'échantillon par l’introduction d’un pénétrateur **diamant pyramidal**. Les diagonales de l’empreinte sont lues **de manière optique** afin de déterminer la dureté à partir d'une table ou formule.
* Utilisé pour les essais de dureté sur tous les matériaux solides y compris métalliques
* Adapté à une vaste gamme d’applications
* Comprend un sous-groupe d'essai de dureté des soudures

**L'essai de dureté Rockwell**

* La méthode d'essai de dureté Rockwell **est rapide** ; développée **pour le contrôle de production**, elle permet la lecture directe des résultats ; **surtout utilisée pour les matériaux métalliques**. La dureté Rockwell (HR) est calculée en mesurant, à une charge donnée, la profondeur de l’empreinte laissée par l’enfoncement d’un pénétrateur dans le matériau de l’échantillon.
* Généralement utilisée pour les échantillons de grande taille
* Un « essai rapide » principalement utilisé pour les matériaux métalliques
* Est également mise en œuvre pour des essais plus poussés, tels que l’essai Jominy (essai de trempabilité - HRC)

### Diapositive 27 :

**11.6 Résilience**

**On appelle résilience, la capacité d’un matériau de se déformer plastiquement plutôt que de se fissurer et de se fracturer**, surtout en présence de micro- ou de macro-fissures ou entailles qui engendrent des concentrations de contraintes. **La résilience est en fait une mesure de la ductilité d’un matériau ou, encore, de sa capacité de résister aux chocs**.

On mesure la résilience de métaux à l’aide de l’essai Charpy. Au cours de cet essai, une éprouvette de dimensions normalisées, présentant une entaille en v, est soumise à une charge d’impact à l’aide d’un mouton-pendule. En faisant varier la température et en utilisant plusieurs éprouvettes fabriquées avec le même alliage, on peut tracer une courbe donnant **l’énergie absorbée par chaque spécimen en fonction de la température de l’essai**. Avec cette courbe, **on peut déterminer une température de transition sous laquelle la rupture est considérée comme fragile, c’est-à-dire que l’énergie absorbée avant la rupture est inférieure à la valeur minimale recommandée**. Un métal donné ne peut être utilisé à une température inférieure à sa température de transition, particulièrement si des effets dynamiques sont à prévoir.

<http://www.utc.fr/M6_fr/PLOTS/KCCA2.html>

**L'essai de Charpy (ou essai de résilience)**

Un essai permet, en effet, d'obtenir l'énergie nécessaire à la rupture d'un matériau et de caractériser sa résistance aux chocs : c'est l'essai de Charpy.

On utilise une éprouvette parallélépipédique munie d'une entaille en U ou en V. On donne une certaine position de départ au marteau qui accumule alors de l'énergie potentielle de pesanteur. On lâche le marteau qui vient briser l'éprouvette et arrive à son point mort haut.

Il suffit de lire la position du marteau après le choc pour connaître son énergie cinétique après rupture de l'éprouvette. La différence de ces deux énergies (initiale et finale) donne directement l'énergie nécessaire à la rupture de l'éprouvette.

L'énergie de rupture n'est cependant pas directement un paramètre du matériau. On peut cependant rapprocher l'énergie de rupture mesurée par l'essai de Charpy (CVN) à la ténacité (KIc). La ténacité est le facteur d'intensité de contrainte qui définit la taille critique d'une fissure qui mène à la rupture brutale du matériau.

**Relation énergie-ténacité :**  De nombreuses formules empiriques reliant CVN à KIc existent mais on peut les définir généralement de la façon suivante :

KIc =alpha(CVN)^1/2

La ténacité, qui est un paramètre caractéristique de chaque matériau, est proportionnelle à la racine carrée de l'énergie de rupture.

### Diapositive 29 :

À la lumière de l’information présentée dans les sections 6 à 8[[13]](#footnote-13), il est possible d’entrevoir que les caractéristiques de l'aluminium seront grandement affectées par la température. Jusqu’à maintenant, les propriétés présentées pour les alliages d’aluminium ont été mesurées à la température de la pièce, soit environ 24°C.

En général, les propriétés structurales de l'aluminium s’améliorent progressivement (par rapport à celles mesurées à la température de la pièce, soit environ 24°C.) lorsque la température baisse, et se détériorent progressivement, lorsque la température augmente. La figure 34 (voir acétate) illustre assez bien le comportement de divers alliages pour des températures variant entre – 200 et + 400°C (8). On constate une augmentation sensible pour Fy et très marquée pour Fu, à des températures inférieures à – 100°C. La déformation, par ailleurs, augmente légèrement pour les alliages non traitables thermiquement (séries 3000 et 5000). L’aluminium demeure donc résilient à basses températures, comme nous l’avons vu dans la sous-section précédente.

Les propriétés mécaniques des métaux diminuent progressivement au fur et à mesure que la température augmente. Leur malléabilité, par contre, augmente. Ces phénomènes caractérisent particulièrement **l’aluminium en raison de son point de fusion peu élevé (660°C)**. La malléabilité de l’aluminium apparaît toutefois comme un avantage puisqu’elle permet le laminage à chaud, l’extrusion et le forgeage des alliages à basse température.

**Il est clair, sur la figure 34, que la résistance des alliages d’aluminium se dégrade de façon significative à des températures au-delà de 100°C.** Entre 50 et 150°C, les variations sont toutefois bien différentes d’une famille d’alliages à l’autre. La perte de résistance en traction est minimale pour les alliages non traitables thermiquement (séries 1000, 3000 et 5000) et plus importante pour les alliages traités thermiquement (séries 2000, 6000 et 7000). Il est important de savoir que les alliages contenant plus de 2,5 % de magnésium (5083, 5086, 5154 et 5456, par exemple) ne doivent pas être utilisés à des températures supérieures à 60°C sans risque de corrosion sous contrainte. Lorsqu'ils sont chauffés à cette température, et plus particulièrement à plus de 80°C, le magnésium super-saturé précipite aux joints de grains. Ce phénomène a pour effet de diminuer considérablement la résistance mécanique du métal. Les couches ainsi formées sont plus réactives électro chimiquement que le reste du métal, ce qui accélère la corrosion sur les joints de grains.

**16.10 La corrosion sous contrainte**

Cette forme de corrosion résulte de l’action combinée d’une contrainte mécanique (flexion, traction, contraintes internes résiduelles dues à la trempe) et d’un milieu corrosif (environnement humide plus ou moins chargé de chlorures). Chacun des paramètres, contrainte et milieu corrosif, agissant seul, n’aurait pas des effets aussi importants, voire pas d’effet du tout, sur la tenue du métal. La corrosion sous contrainte peut aboutir à des ruptures de pièces en service.

Les mécanismes de la corrosion sous contrainte ont fait l’objet de nombreuses études, étant donné l’importance du phénomène. Ils sont si complexes qu’une théorie générale semble difficile, sinon impossible à établir.

La propagation des fissures de corrosion sous contrainte se fait toujours le long des joints de grains. On considère qu’il y a deux mécanismes possibles pour expliquer la corrosion sous contrainte des alliages d’aluminium : la propagation électrochimique et la fragilisation par l’hydrogène. La figure 55[[14]](#footnote-14) présente un exemple de fissure de corrosion sous contrainte résultant de la propagation électrochimique.

Les alliages à hautes caractéristiques mécaniques, notamment ceux des séries 2000 et 7000, peuvent être sensibles à la corrosion sous contrainte. L’influence des traitements thermiques est importante. La vitesse de trempe, par exemple, doit être aussi élevée que possible.

**Acier : 550 perte de résistance**

<http://www.lemoniteur.fr/article/incendies-le-comportement-du-beton-8450688>

**Béton :**

* A partir d’une température de l’ordre de 300°C, la chute de la résistance à la compression commence à être importante. Cette chute est en relation avec des transformations microstructurales et minéralogiques qui ont lieu au sein du matériau :
* jusqu’à 100 °C : déshydratation de l’ettringite et partiellement des silicates de calcium hydratés (C-S-H)
* à partir d’environ 300°C : transformation de la pâte de ciment qui commence à être importante (microfissuration, décohésions pâte-granulats…)
* vers 500°C : déshydratation de la portlandite (Ca(OH)2)
* vers 575°C : transformation du quartz « a » en quartz « b »
* entre 700°C et 900°C : décarbonatation des carbonates (CaCO3)
* à partir de 1200 °C et jusqu’à 1300 °C : début de fusion des composés silicatés du béton.

**Figure 34 – Influence de la température sur les propriétés d’alliages d’aluminium**

### Diapositive 30 :

Les valeurs de résistance en traction recommandées par les normes de calcul des structures peuvent être utilisées pour des températures ne dépassant pas 100°C. Les applications de l’aluminium à des températures supérieures à 150°C, mais généralement inférieures à 300°C, existent dans l’aérospatiale et surtout dans le moulage de pièces pour l’industrie automobile. Certains alliages à base de particules de céramique, qui sont produits à l’aide de procédés thermomécaniques, sont très résistants et passablement ductiles à des températures aussi élevées que 500°C (5).

Température de la pièce est d’environ 24°C.

La référence (2[[15]](#footnote-15)) présente des tableaux semblables au tableau 11, qui donnent les variations de résistance en traction et de ductilité de plusieurs alliages en fonction de la température. Il s’agit de valeurs moyennes non garanties, qui ne sont présentées qu’à titre indicatif. Le concepteur n’est pas autorisé à les utiliser directement dans ses calculs.

**Tableau 11 – Influence de la température sur la résistance en traction de l’alliage 6061-T6**

<https://constellation.uqac.ca/301/>

Les composites à matrices métalliques (CMM) ont intéressé l'industrie de l'aluminium (Al- AI2O3, Al-SiC) à cause de la supériorité de leurs propriétés mécaniques comparées à celles d'alliage d'aluminium. Les composites d'aluminium-BziC (CMM) sont devenue importantes pour l'industrie de l'aluminium à cause de leurs utilisations dans des applications de haute performance telles que le stockage de rejets nucléaires radioactifs, les avions et les structures aérospatiales, dues à leur capacité d'absorber des neutrons, leur légèreté, leur haute résistance et leur rigidité. La production des matrices métalliques (CMM) de B4C- aluminium n'est pas une tâche facile à cause de la faible mouillabilité de B4C par l'aluminium. De plus, B4C n'est pas stable quand il est en contact avec l'aluminium. Les analyses de l'interface basées sur la microscopie optique et la microscopie électronique à balayage ont indiqué la formation des particules d'A^BC et d'AlB2 autour de la particule de B4C. Cette réaction est incessante et elle a comme conséquence l'épuisement de la concentration de B4C, la diminution de la fluidité de la fonte et la détérioration de ses propriétés mécaniques et physiques. Pour empêcher la perte de B4C, le Ti est ajouté à l'aluminium. Le Ti a de l'affinité à réagir avec B4C et forme une couche protectrice autour de la particule.

<https://www.lequotidien.com/actualites/personnalite-du-mois/ceradyne-na-pas-de-frontieres-b056ec113a97f549086f1903dd612329>

Entreprise ceradyne canada – Produit boral (Les produits sont vendus sous forme de plaques d'aluminium ou de produits chimiques, qui contiennent un ingrédient à base de bore. « Le bore est un produit naturel, qu'on retrouve sous forme de bore 10 ou de bore 11. Lorsqu'un neutron veut aller rencontrer un autre neutron et qu'il y a notre produit entre les deux, le bore 10 va absorber le neutron, se transformer en bore 11 et empêcher une réaction en chaîne. Il va empêcher les combustibles de réagir entre eux et de causer un incident nucléaire », explique Mme Giasso)

### Diapositive 31 :

104 heures = un an

Les résistances obtenues d’essais de traction à haute température ne dépendent pas seulement de la température du spécimen lors de l’essai, mais aussi de la durée pendant laquelle le spécimen a été maintenu à cette température avant et pendant l’essai. **La figure 35, sur laquelle la résistance ultime en traction est exprimée en fonction de la température de recuit pour une très courte et une très longue période de temps, démontre bien le phénomène pour différents alliages**. Les courbes en traits discontinus représentent la perte de résistance en traction causée par une élévation de température après une courte période d’exposition à la chaleur. Les pertes sont, de toute évidence, plus significatives pour les alliages traités thermiquement (2017-T4 et 6082-T6).

Les courbes en trait continu démontrent que la perte de résistance en traction est encore plus prononcée lorsque les alliages sont exposés à la chaleur pendant une longue période de temps. Une fois de plus, l’effet est plus marqué pour les alliages traités thermiquement. Selon les alliages et les différents traitements qu’ils ont subis, la perte de résistance en traction est attribuable au survieillissement (figure 19[[16]](#footnote-16)) ou à une recristallisation (figure 20[[17]](#footnote-17)) et l’état final équivaut à un recuit.

**Figure 35 – Résistance ultime en traction d’alliages d’aluminium à haute température**

### Diapositive 32 :

La résistance mécanique des alliages traitables thermiquement est améliorée tout d’abord par les éléments d’alliage. Ces éléments étant plus solubles dans l’aluminium solide à haute température qu’à basse température, il est possible d’effectuer des traitements thermiques qui améliorent davantage les propriétés mécaniques. Les alliages traités thermiquement, comme on vient de le voir, sont plus résistants que les alliages non traitables thermiquement mais écrouis, et ils conservent une meilleure ductilité. Il y a certains alliages qui peuvent atteindre une limite ultime aussi élevée que 700 MPa.

La perte de résistance en traction est minimale pour les alliages non traitables thermiquement (séries 1000, 3000 et 5000) et plus importante pour les alliages traités thermiquement (séries 2000, 6000 et 7000). Il est important de savoir que les alliages contenant plus de 2,5 % de magnésium (5083, 5086, 5154 et 5456, par exemple) ne doivent pas être utilisés à des températures supérieures à 60°C sans risque de corrosion sous contrainte. Lorsqu'ils sont chauffés à cette température, et plus particulièrement à plus de 80°C, le magnésium super-saturé précipite aux joints de grains. Ce phénomène a pour effet de diminuer considérablement la résistance mécanique du métal. Les couches ainsi formées sont plus réactives électro-chimiquement que le reste du métal, ce qui accélère la corrosion sur les joints de grains.

### Diapositive 33 :

**d) Vieillissement artificiel (revenu)**

Le vieillissement artificiel consiste à amener la pièce de l’état (3) à l’état (4[[18]](#footnote-18)) en chauffant pendant 12 heures à 190°C, puis à refroidir en ramenant la pièce à l’état.Des précipités se forment dans toute la structure et les propriétés maximales sont obtenues (figure 18d[[19]](#footnote-19)). En fait, il s’agit de l’état T6 (« mis en solution et vieilli artificiellement »), et l’alliage ainsi obtenu est le 2024-T6 dont la limite ultime est égale à 485 MPa.

revenu : vieillissement artificiel (chauffage à $190 °C$, maintien et refroidissement )

<http://www.sttm.fr/traitement-thermique-aluminium/>

**3- Vieillissement naturel (maturation) ou artificiel (revenu):** juste après la trempe (état de trempe fraîche), l’alliage est dans un état très malléable pendant une courte durée. Au cours de cette période, nous procédons alors à des opérations de remise en conformité géométrique (redressage) de la pièce. Le durcissement structural (formation de précipités) intervient ensuite,

* soit à température ambiante pendant une longue période (c’est à dire plusieurs jours), nous réalisons ainsi un vieillissement naturel
* soit dans un four à température et temps contrôlés, nous procédons alors à un vieillissement artificiel, celui-ci ne dure donc que quelques heures.

### Diapositive 34 :

**e) Survieillissement**

**Si on prolonge indûment le traitement à 190°C**, les précipités migrent aux joints de grains. Les propriétés sont alors les mêmes qu’à l’état recuit (figure 18e[[20]](#footnote-20) ou 18b[[21]](#footnote-21)). On dit qu’il y a survieillissement. La limite ultime de l’alliage est donc de retour à 184 MPa. C’est aussi un état qui peut être crée par le soudage d’un alliage T6, comme on le verra à la section suivante. Il convient de souligner, à ce point-ci, que les produits dans l’état T4 sont moins disponibles que les produits dans l’état T6 parce qu’ils vieillissent lors de leur entreposage et que leurs propriétés changent avec le temps. Le vieillissement rend les alliages de moins en moins malléables. Par conséquent, il est préférable de déformer les produits, si possible, après la trempe ou dans l’état lorsqu’ils sont jeunes. Ces produits sont généralement disponibles lorsqu’ils sont commandés en grande quantité.

**f) Vieillissement et survieillissement**

La figure 19 illustre assez bien ce qui se produit dans le temps lorsqu’un traitement de vieillissement (artificiel) est appliqué à une température donnée, à un alliage quelconque. Après une période d’incubation très courte, les propriétés augmentent à la suite de l’obtention d’une dispersion et d’une grosseur optimale des précipités (figure 18d[[22]](#footnote-22)). C’est dans cet état que les précipités empêcheront le plus le glissement des plans d’atomes et que les résistances à la traction seront les meilleures. Au bout d’un certain temps, variable en fonction des alliages, les précipités deviennent trop gros, il n’y en a plus assez et ils ont tendance à migrer aux joints de grains (figure 18e) : c’est le survieillissement. Les propriétés diminuent et deviennent équivalentes à celles de l’état recuit (figure 18b).

On a démontré qu’il faut 100 000 heures (-11,5 ans) de vieillissement à la température de la pièce pour augmenter les propriétés de l’alliage 6061 de 170 à 280 MPa. C’est pourquoi il est souvent nécessaire d’effectuer ce traitement à une température supérieure pour le faire en des temps raisonnables. Toutefois, plus la température de vieillissement augmente, moins les propriétés que l’on peut obtenir sont élevées. Pour l’alliage 6061, la durée du traitement de vieillissement est de 18 heures à une température de 155 à 165°C ou de 8 heures à une température de 170 à 180°C, selon les produits que l’on désire obtenir. Il existe, dans la littérature spécialisée, des tableaux de temps et de températures pour différents traitements thermiques.

### Diapositive 35 :

**7.8 Recristallisation**

La recristallisation **est la formation d’une nouvelle structure cristalline** obtenue **par chauffage**, à la suite d’un écrouissage. **Ce traitement (le chauffage)** s’accompagne d’un adoucissement des propriétés mécaniques. La recristallisation peut se produire, car les distorsions créées dans le réseau cristallin par l’écrouissage engendrent des contraintes dans le métal (figure 12[[23]](#footnote-23)). Si on élève la température suffisamment, les atomes accumulent de l’énergie et ils ont tendance à se réorganiser en un nouveau jeu de blocs légo. Il s’ensuit une disparition des contraintes résiduelles existantes et une structure totalement régénérée, plus douce que la structure écrouie originale. On utilise l’écrouissage suivi de la recristallisation, pour contrôler la grosseur des grains. Le processus de recristallisation est illustré sur la figure 20 (voir acétate).

**Figure 20 – Procédé de recristallisation**

### Diapositive 36 et 37 :

Jusqu’à présent, l’influence de la température sur la résistance en traction des alliages d’aluminium n’a été mesurée qu’à partir d’essais de traction standards au cours desquels la charge croissait régulièrement jusqu’à la rupture du spécimen. Si une charge constante était appliquée pendant une certaine période (heures, jours ou mois), on observerait que le métal se déforme lentement, particulièrement à haute température. Ce phénomène est appelé fluage et est illustré à la figure 36 (voir acétate) pour l’alliage 6061-T6 soumis à une contrainte de 180 MPa à la température de 130°C. Le taux de déformation initial est élevé mais il diminue pour demeurer pratiquement constant jusqu’à l’approche du point de rupture à partir duquel il augmente très rapidement.

**Figure 36 – Fluage de l’alliage 6061-T6**

Les changements microstructuraux en jeu peuvent être interprétés qualitativement par l’interaction de deux phénomènes qui entrent en compétition : le durcissement du métal par écrouissage et l’adoucissement sous l’action de la chaleur. Au début, c’est le **durcissement** (diminution de la déformation) de l’aluminium qui prédomine, puis un équilibre s’établit lorsque les effets se contrebalancent. Au bout d’un certain temps, les **imperfections apparaissent dans le métal et ont pour effet d’accélérer la perte de résistance**, d’augmenter le taux de déformation et de conduire à la ruine du spécimen.

Plus la température et la charge sont élevées, plus le métal se déforme rapidement et plus tôt se produit la rupture. Des essais à long terme sont donc requis pour établir la relation entre la contrainte, la température et le temps jusqu’à la rupture pour chaque alliage. La figure 37 (voir acétate 36) montre les résultats de tels essais sur l’alliage recuit 5083-O.

Des courbes semblables à celle montrée sur la figure 37 (voir acétate 36) sont utilisées pour calculer la résistance des alliages d’aluminium dans des applications structurales où la température et le fluage sont susceptibles de jouer un rôle. Les réservoirs sous pression et autres équipements pour l’industrie chimique, faits d’alliages des séries 1000 et 5000, sont souvent calculés pour une durée de vie de plus de dix ans. Dans l’industrie aérospatiale, on utilise des alliages spéciaux démontrant à la fois une bonne résistance en traction à des températures élevées et une résistance améliorée au fluage. Certaines applications structurales ou mécaniques, tels les pipelines non enfouis pour le gaz, les câbles suspendus et les cylindres pour les gaz comprimés ou les freins hydrauliques, nécessitent un bon contrôle du fluage.

**Figure 37 – Résultats d’essais de fluage pour l’alliage 5083-O**

### Diapositive 39 et 40 :

**13 Tenue au feu**

**13.1 Introduction**

Actuellement, il existe peu d’information sur la tenue au feu de l’aluminium dans les structures. Les normes canadienne et américaine n’y font aucunement référence, si ce n’est quelques brefs commentaires dans la Partie III de la référence (2[[24]](#footnote-24)). Seule la norme européenne présente des recommandations assez détaillées pour permettre au concepteur d’évaluer le comportement au feu des charpentes d’aluminium. Des tableaux et des équations y sont présentés pour évaluer les propriétés de certains alliages à des températures variant entre 20 et 550°C. Les dispositions de la norme sur la tenue au feu s'appliquent aux alliages 5052, 5083, 5054, 6061, 6063 et 6082.

La baisse des caractéristiques mécaniques de l’aluminium à haute température a pour effet de réduire sa capacité portante si la structure exposée à l’échauffement est sous charge (voir la figure 34[[25]](#footnote-25)).

Comme pour l’acier, quand il faut garantir une tenue mécanique de longue durée sous charge lors d’incendie, il est obligatoire de ménager une isolation thermique adéquate en accord avec les normes appropriées. C’est particulièrement vrai pour les cloisons coupe-feu en aluminium, lesquelles doivent être protégées pour résister à un feu pendant un temps donné.

En cas d’un échauffement suffisamment prolongé des alliages traités thermiquement (séries 2000, 6000 et 7000), il y a lieu de vérifier que leurs caractéristiques mécaniques n’ont pas été modifiées sous l’effet du chauffage. L’aluminium ayant une bonne conductibilité thermique, la chaleur diffuse plus facilement qu’avec d’autres matériaux, ce qui a pour effet d’éviter les points chauds localisés. La diffusion de la chaleur s’accompagne de déformations appréciables, du fait du coefficient de dilatation élevé de l’aluminium.

### Diapositive 41 :

**13.2 Limite élastique**

Selon la référence (32[[26]](#footnote-26)), la limite élastique de certains alliages d’aluminium, pour une exposition au feu d’une durée maximale de deux heures, est obtenue en multipliant la valeur de donnée dans le tableau 8 [[27]](#footnote-27)par le coefficient tiré du tableau 12 (voir acétate). Il est possible d’interpoler linéairement dans le tableau pour obtenir les coefficients correspondant à des valeurs intermédiaires de température. Si on compare les valeurs de Fy pour l’alliage 6061-T6 du tableau 12 à celles du tableau 11[[28]](#footnote-28), tirées de la référence (2), la norme européenne apparaît plus libérale.

**Tableau 12 – Coefficient ko applicable à la limite élastique Fy, d’alliages d’aluminium, pour une exposition au feu d’une durée ne dépassant pas deux heures**

Il est important de retenir que la plupart des alliages d’aluminium ont perdu environ 50 % de leur capacité mécanique originale à une température oscillant autour de 250°C.

### Diapositive 42 et 43:

**13.3 Module d’élasticité**

Le module d’élasticité de tous les alliages d’aluminium, après une exposition de près de deux heures à des températures élevées, prend les valeurs présentes dans le tableau 13 (voir acétate 4) (voir aussi la figure 34d[[29]](#footnote-29)). Ces valeurs sont réversibles.

**Tableau 13 – Module d’élasticité des alliages d’aluminium après une exposition de près de deux heures à des températures élevées**

Le tracé des courbes contrainte-déformation à divers niveaux de température, pour un alliage donné, donne le résultat présenté sur la figure 38 (voir acétate 42).

**Figure 38 – Courbes contrainte-déformation d’un alliage quelconque à divers niveaux de température**

### Diapositive 44 :

**13.4 Dilatation thermique**

Toujours selon la référence (32[[30]](#footnote-30)), la dilatation thermique, ${∆l}/{l}= f(θ)$, des alliages d’aluminium suit la règle suivante pour les valeurs de θ comprises entre 0 et 500°C. Dans l’équation (7), l est la longueur de la pièce à la température de 20°C et θ est la température de la pièce.

${∆l}/{l}=0.1\*10^{-7}\*θ^{2}+22.5\*10^{-6}\*θ-4.5\*10^{-4}$ (7)

La courbe obtenue de cette équation suit de près celle obtenue en considérant l’équation (8), tirée du tableau 6.

${∆l}/{l}= α\left(∆θ\right)=24.0\*10^{-6}\*(θ-20)$ (8)

**13.5 Capacité thermique massique**

La capacité thermique massique de l’aluminium augmente linéairement en fonction de la température pour des valeurs de θ se situant entre 0 et 500°C.

$Cp = 0,41 θ + 903 (J/kg . °C)$ (9)

La valeur obtenue de l’équation (9) à 24°C diffère légèrement de la valeur présentée dans le tableau 6[[31]](#footnote-31).

**10.5 Capacité thermique massique**

La capacité thermique massique (Cp) est une propriété des matériaux utilisée dans les calculs de résistance au feu. Pour l’aluminium, elle est de l’ordre de 900 J/kg °C.

<http://www.alloprof.qc.ca/BV/pages/oc1025.aspx>

La **capacité thermique** (aussi nommée chaleur massique ou capacité thermique massique) d’une substance, désignée par la lettre **c**, est une [propriété caractéristique](http://www.alloprof.qc.ca/BV/Pages/s1013.aspx). Elle donne la capacité précise de cette substance d’absorber ou de dégager de la [chaleur](http://www.alloprof.qc.ca/BV/Pages/s1006.aspx).
Elle est déterminée par la quantité d’énergie à apporter pour élever d’un degré la température de l’unité de masse d’une substance.

En d’autres mots, la capacité thermique massique est la quantité de chaleur qu’un kilogramme d'une substance doit absorber pour que sa température s’élève d’un degré Celsius. Il peut s’agir aussi de la quantité de chaleur qu’un kilogramme de cette substance doit perdre pour que sa température baisse d’un degré Celsius.

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Capacit%C3%A9_thermique_massique>

La **capacité thermique massique** (symbole [c](https://fr.wikipedia.org/wiki/C_%28lettre%29) ou [s](https://fr.wikipedia.org/wiki/S_%28lettre%29)), anciennement appelée **chaleur massique** ou **chaleur spécifique**[1](https://fr.wikipedia.org/wiki/Capacit%C3%A9_thermique_massique), reflète la capacité d'un matériau à accumuler de l'énergie sous forme thermique, pour une masse donnée, quand sa température augmente. Une grande capacité thermique signifiera qu'une grande quantité d'énergie peut être stockée moyennant une augmentation relativement faible de la température.

La **capacité thermique** (ou **capacité calorifique**) d'un corps est une grandeur permettant de quantifier la possibilité qu'a un corps d'absorber ou restituer de l'énergie par [échange thermique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Transfert_thermique) au cours d'une transformation pendant laquelle sa [température](https://fr.wikipedia.org/wiki/Temp%C3%A9rature) varie.

La capacité thermique est l'énergie qu'il faut apporter à un corps pour augmenter sa température d'un [kelvin](https://fr.wikipedia.org/wiki/Kelvin). Elle s'exprime en [joule](https://fr.wikipedia.org/wiki/Joule) par [kelvin](https://fr.wikipedia.org/wiki/Kelvin) (J/K). C'est une [grandeur extensive](https://fr.wikipedia.org/wiki/Extensivit%C3%A9_et_intensivit%C3%A9_%28physique%29) : plus la quantité de matière est importante plus la capacité thermique est grande. Toutes choses étant égales par ailleurs, plus la capacité thermique d'un corps est grande, plus grande sera la quantité d'énergie échangée au cours d'une transformation s'accompagnant d'une variation de la température de ce corps.

**13.6 Conductibilité thermique**

La référence (32) présente deux équations pour le calcul de la conductibilité thermique de l’aluminium en fonction de la température, pour des valeurs de θ se situant entre 0 et 400°C. Pour les alliages des séries 1000, 3000 et 6000.

$λ = 0,07 θ + 190 (W/m . °C)$ (10)

Pour les alliages des séries 2000, 4000, 5000 et 7000,

$λ = 0,1 θ + 140 (W/m . °C)$ (11)

Il convient de signaler que les valeurs obtenues de l’équation (11) à la température de la pièce sont nettement inférieures à celle présentée dans le tableau 6.

**10.4 Conductibilité thermique**

La conductibilité thermique de l’aluminium (λ) est nettement plus élevée que celle de l’acier. La conductibilité thermique est exprimée en Watt par mètre-degré Celsius. Dans le cas de l’aluminium, elle est égale à 185 W/m°C.

Cette propriété oblige le soudeur à utiliser de grands apports de chaleur pour bien fusionner le métal d’apport avec le métal sous-jacent. Toutefois, la grande conductibilité thermique de l’aluminium est en partie compensée par le fait que le point de fusion est bas. La conductibilité thermique, combinée au grand coefficient d’expansion linéaire (coefficient de dilatation thermique) et aux apports de chaleur appréciables requis pour le soudage, tend à créer des déformations importantes au soudage. Toutefois, les grandes vitesses d’arc possibles avec les méthodes de soudage modernes contrebalancent cet effet.)

### Diapositive 45 :

**13.7 Autres considérations**

La température d’ignition de l’aluminium est supérieure à 1000°C alors que sa température de fusion, rappelons-le, est de 660°C. L’aluminium ne s’enflamme donc pas même s’il est reconnu que la poudre d’aluminium a des applications pyrotechniques et qu’on l’utilise comme combustible solide des moteurs d’appoint des lanceurs (Ariane, etc.). Il est étonnant de constater que la température d’ignition de l’aluminium est plus élevée que celle de l’acier, laquelle se situe à 930°C. L’ordre des températures d’ignition n’est pas dépendant de celui des températures de fusion. La difficulté d’enflammer l’aluminium tient au fait que le film d’oxyde naturel freine la réaction du métal avec l’air ou l’oxygène, en enfermant le métal liquide dans une enveloppe plus ou moins étanche au milieu extérieur.

L’aluminium ne produit pas d’étincelle au choc. C’est la raison pour laquelle les véhicules de lutte contre l’incendie peuvent être équipés d’accessoires en aluminium. Par contre, il est connu qu’une fine poudre d’aluminium mise en présence d’hydroxyde de fer (rouille) peut s’enflammer en produisant une intense chaleur. Dans une atmosphère de gaz inflammable comme une mine de charbon, il faut donc éviter d’entrechoquer des outils d’aluminium et des outils d’acier rouillé pour ne pas créer d’étincelles qui produiraient une explosion. Ces cas sont toutefois très rares et peuvent être évités en gardant les outils en aluminium séparés des outils en acier rouillé ou en les recouvrant d’une couche protectrice adéquate. Ces considérations ont toutefois entraîné le retrait d’outils d’aluminium de certaines mines de charbon.

**Dans un contexte d’incendie, les alliages d’aluminium ont parfois mauvaise réputation. On leur reproche de n’avoir qu’une faible résistance au feu**. Cette opinion n’est pas fondée, car il est démontré qu’une structure en alliage d’aluminium convenablement étudiée et protégée, présente le même degré de sécurité que toute autre construction métallique. Il peut aussi être démontré que l’interaction entre la masse volumique et la capacité thermique massique de l’aluminium et de l’acier, fait en sorte que, lorsqu’on compare des structures réelles, des éléments comparables en acier et en aluminium vont se réchauffer à peu près au même taux lors d’un incendie.

Le **point d'inflammation** (**ignition)** est la [température](https://fr.wikipedia.org/wiki/Temp%C3%A9rature) la plus basse à laquelle un [liquide](https://fr.wikipedia.org/wiki/Liquide) émet suffisamment de [vapeurs](https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89tat_de_la_mati%C3%A8re) pour former avec l’air ambiant un [mélange inflammable](https://fr.wikipedia.org/wiki/Limite_d%27explosivit%C3%A9) dont la [combustion](https://fr.wikipedia.org/wiki/Combustion) une fois débutée puisse s’entretenir d’elle-même après retrait de la source d’allumage. Il est supérieur au [point d'éclair](https://fr.wikipedia.org/wiki/Point_d%27%C3%A9clair) (ou point d'inflammabilité) de quelques degrés et inférieur au [point d'auto-inflammation](https://fr.wikipedia.org/wiki/Point_d%27auto-inflammation). Entre le point d’éclair et le point d’inflammation, les vapeurs s’enflamment mais ne peuvent continuer à brûler sans apport extérieur d’énergie.

### Diapositive 47 :

**14. Influence de la vitesse d’application des contraintes sur les propriétés mécaniques**

Les propriétés mécaniques des alliages d’aluminium varient de façon plus ou moins marquée en fonction du taux d’application des déformations. La résistance ultime en traction et la limite élastique ont tendance à être plus élevées lorsque le taux d’application des déformations augmente, tel qu’illustré sur la figure 39 (acétate). Cette figure résume, de façon grossière, les résultats d’essais effectués sur différents alliages d’aluminium et publiés dans la littérature.

Dans la plupart des applications, il est raisonnable et sécuritaire de ne pas tenir compte de ce phénomène et d’utiliser les valeurs de résistance mécanique et de déformation correspondant à des essais de chargement statique.

**Figure 39 – Variation des propriétés en fonction du taux d’application des déformations.**

# Soudabilité

### Diapositive 50 :

<https://cqrda.ca/wp-content/uploads/2022/11/feuillard11-soudage.pdf>

**La métallurgie du soudage**

Le soudage des alliages d’aluminium n’est pas une simple équation. Même les spécialistes ne sont pas toujours d’accord sur la réponse des différents alliages au soudage et l’impact sur leurs propriétés mécaniques. Ici, nous nous efforcerons donc de donner des informations générales utiles et quantifiables.

Le soudage de l’aluminium crée systématiquement une zone affectée thermiquement (ZAT) dans laquelle les propriétés mécaniques peuvent être réduites jusqu’à 50 % par rapport aux valeurs nominales, dépendant de l’alliage soudé et du procédé utilisé. Généralement, pour le calcul de structures, il est entendu d’étendre cette zone à 2,5cm de chaque côté du joint, à moins de pouvoir traiter thermiquement la pièce après soudage. La conception de la pièce doit donc prendre en considération cette réalité.

Les alliages à durcissement par écrouissage, les alliages traitables thermiquement et les alliages de fonderie ne réagissent pas de la même façon au soudage. De plus, ce ne sont pas tous les alliages d’aluminium qui sont soudables. Le tableau I montre la facilité relative avec laquelle il est possible de souder différents alliages.

**Soudage des alliages à durcissement par écrouissage**

Les alliages à durcissement par écrouissage sont ceux des séries 1000, 3000 et 5000 (voir Feuillard technique No 4[[32]](#footnote-32)). Une fois soudées par des procédés standard, les ZAT des pièces fabriquées dans ces alliages ont des propriétés mécaniques semblables à celles du métal recuit (état O). Donc, plus l’état d’écrouissage et le durcissement sont importants, plus la perte relative des propriétés est grande. Par exemple, une pièce de 5052-H11 possède une résistance à la traction (tensile ultimate strength) minimale de 172 MPa (25 ksi), tandis qu’une autre pièce fabriquée de 5052-H32 a une résistance à la traction (tensile ultimate strength) minimale de 213 MPa (31 ksi). Une fois soudée, les deux pièces auront une résistance à la traction semblable de 170 – 172 MPa (25 ksi) dans leur ZAT.

**Soudage des alliages à durcissement structural**

Les alliages à durcissement structural sont ceux des séries 2000, 4000, 6000 et 7000. Le soudage de ces alliages ramène leurs propriétés mécaniques un peu au-dessus de celles de l’état recuit (état O). Toutefois, comme les gains de propriétés sont souvent beaucoup plus importants pour ce type d’alliages, les pertes de propriétés sont plus importantes. Par exemple, une pièce de 6061-T6 possède une résistance à la traction minimale de 260 MPa (38 ksi). Après soudage, la ZAT de cette même pièce est de 165 MPa (24 ksi), tandis que le même alliage à l’état recuit possède une résistance à la traction de l’ordre de 150 MPa (22 ksi).

**Soudage des alliages de fonderie**

Il a été mentionné dans les Feuillards techniques numéros 9[[33]](#footnote-33) et 10 que certains procédés de fonderie généraient des pièces impossibles à souder, généralement en raison de leur trop grande porosité. De plus, la teneur en hydrogène plus élevée des pièces moulées et les défauts internes ou externes sont sources de soufflures [Bulle de gaz] dans les soudures. En contrepartie, les alliages de fonderie sont habituellement plus alliés, ce qui les rend moins sensibles à la fissuration à chaud.

Les problèmes de réduction des propriétés mécaniques se retrouvent également lors du soudage des pièces moulées. Néanmoins, certains alliages de fonderie se soudent relativement bien; comme par exemple : le 214, le 319, le 333, le 355, le C355, le 356, le 413, le 443 A612, C612 et D612.

**Quelques stratégies pour réduire l’impact des** **soudures**

Voici quelques moyens de limiter la réduction des propriétés mécaniques causée par la soudure et/ou de corriger ses conséquences.

1. Localiser les soudures à des endroits où les contraintes sont faibles;
2. Utiliser des méthodes constructives pour compenser les pertes (surépaisseur dans la zone soudée);
3. Retraiter thermiquement l’assemblage soudé (pour les alliages traitables thermiquement).
4. Limiter l’apport de la chaleur et souder rapidement;
5. Augmenter le taux de refroidissement.

**15.1 Introduction**

Du point de vue structural, la soudabilité des alliages d’aluminium, tout comme la résistance à la corrosion qui sera abordée dans la section suivante, sont deux propriétés chimiques ou physico-chimiques que l’on peut qualifier de fondamentales. Il importe donc que le concepteur possède une assez bonne connaissance de ces propriétés. La présente section, sans être un traité sur la soudabilité des alliages d’aluminium, devrait permettre au lecteur de bien saisir le phénomène, de recevoir des conseils pratiques et de procéder à un choix judicieux du métal d’apport pour relier des pièces en alliage d’aluminium.

**La soudabilité peut être définie comme la plus ou moins grande facilité d’établir la continuité métallique entre deux pièces tout en produisant un lien exempt de défauts physiques et, dans la mesure du possible, aussi résistant que le métal de base.**

En raison de la couche d’oxyde réfractaire (un **matériau réfractaire** est un matériau qui a une forte résistance à un facteur (physique, chimique, biologique) susceptible de le dégrader, le plus souvent la chaleur. Par exemple, un four à pain peut être fait de briques) qui le recouvre, l’aluminium était, à l’origine, non soudable. Puis, l’utilisation d’un flux permettant d’éliminer d’alumine a permis de soudage au gaz des alliages d’aluminium. Enfin, le décapage électronique de l’aluminium a rendu possible le soudage de l’aluminium par les procédés GMAW et GTAW (voir la sous-section 8.4[[34]](#footnote-34)). Il existe aujourd’hui d’autres procédés dont certains font encore l’objet de développements : le soudage par résistance, le soudage au laser et le soudage par friction avec toupie.

**Principe de soudage par résistance**

Les deux tôles sont placées l’une sur l’autre, puis fortement maintenues sous pression par la machine de soudage, entre deux électrodes, avant qu’un fort courant ne les traverse permettant après une brève pause, afin de refroidir le point de fusion, le relâchement des deux tôles unies pour toujours par soudure.

Il n’y a donc pour ce mode de soudage aucun métal d’apport (soudage autogène), il est exécuté sous pression avec comme chauffage par un fort courant électrique.

La loi qui explique ce phénomène est l'[effet Joule](https://fr.wikipedia.org/wiki/Effet_Joule): $W=RI² t$

Le **soudage MIG-MAG** (respectivement 131 ou 132/133, et 135 ou 136/138 suivant la norme EN [ISO](https://fr.wikipedia.org/wiki/Organisation_internationale_de_normalisation) 4063-2011), ou encore *GMAW* selon les normes américaines, est un procédé de [soudage](https://fr.wikipedia.org/wiki/Soudage) semi-automatique. La fusion des métaux est obtenue par l’énergie calorifique dégagée par un [arc électrique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Arc_%C3%A9lectrique) qui éclate dans une atmosphère de protection entre un fil électrode fusible et les pièces à assembler.

Le **soudage TIG** est un procédé de [soudage](https://fr.wikipedia.org/wiki/Soudage) à l'[arc](https://fr.wikipedia.org/wiki/Arc_%C3%A9lectrique) avec une électrode non fusible, en présence d'un métal d'apport si besoin. TIG est un acronyme de *Tungsten Inert Gas*, où *Tungsten* ([Tungstène](https://fr.wikipedia.org/wiki/Tungst%C3%A8ne)) désigne l'[électrode](https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89lectrode) et *Inert Gas* (Gaz inerte) le type de gaz [plasmagène](https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89tat_plasma) utilisé. L'[arc électrique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Arc_%C3%A9lectrique) se crée entre l'électrode et la pièce à souder qui est protégée par un gaz ou un mélange de [gaz rares](https://fr.wikipedia.org/wiki/Gaz_rare) tels que l'[argon](https://fr.wikipedia.org/wiki/Argon) et l'[hélium](https://fr.wikipedia.org/wiki/H%C3%A9lium). De fait, l’arc électrique remplace la flamme du chalumeau traditionnel. La soudure à l’arc s’appuie sur l’élévation de la température des pièces à assembler jusqu'au point de fusion grâce au passage d’un courant électrique [alternatif](https://fr.wikipedia.org/wiki/Courant_alternatif) ou [continu](https://fr.wikipedia.org/wiki/Courant_continu)[1](https://fr.wikipedia.org/wiki/Soudage_TIG).

Le soudage s'effectue le plus souvent en polarité directe (pôle - du générateur relié à l'électrode) pour les métaux et alliages ([aciers](https://fr.wikipedia.org/wiki/Acier), inox, cuivreux, [titane](https://fr.wikipedia.org/wiki/Titane), [nickel](https://fr.wikipedia.org/wiki/Nickel)...) sauf dans le cas des alliages légers d'[aluminium](https://fr.wikipedia.org/wiki/Aluminium) ou du [magnésium](https://fr.wikipedia.org/wiki/Magn%C3%A9sium), où l'on soude en polarité alternée. Il n'est pas possible de souder en polarité inverse (pôle + relié à l'électrode) car cela détruirait cette électrode en la faisant fondre.

Pour souder l’aluminium et ses alliages, il faut utiliser des moyens de chauffe puissants et très localisés dans le but de limiter les déformations, les manques de fusion, les pertes de chaleur et l’effondrement du bain de fusion. De plus, il faut souder rapidement avec un ampérage élevé. C’est la raison pour laquelle le procédé de soudage **GMAW est généralement préféré pour assembler les charpentes ou structures d’aluminium**.

### Diapositive 51 :

Couche d’oxyde : Très avide d’oxygène, l’aluminium possède une couche naturelle d’alumine d’épaisseur de 0.1 à 0.01 µm.

**15.2 Couche d’oxyde**

Comme on l’a vu à la section 2.7[[35]](#footnote-35), une couche d’oxyde, l’alumine, recouvre l’aluminium. Cette couche fond à plus de 2000°C, en comparaison de l’aluminium dont le point de fusion est de 660°C. Aussitôt qu’on l’enlève, elle se reforme et, **en quelques heures**, elle redevient aussi épaisse qu’avant.

La présence de cette couche a deux conséquences :

1. Puisqu’elle est **poreuse**, elle peut absorber de la graisse et de l’humidité et, au soudage, l’hydrogène contenu dans ces substances crée de la porosité.

La raison pour laquelle l’hydrogène capté par la couche d’oxyde crée de la porosité est que l’hydrogène monoatomique qui va dans le métal fondu est beaucoup **moins** soluble lorsque le bain de fusion se solidifie. Il s’ensuit qu’il essaie de s’échapper sous forme gazeuse. Puisque l’aluminium refroidit très rapidement, beaucoup de bulles restent captives dans le métal qui se solidifie, car elles n’ont pas le temps d’être évacuées. Les autres sources d’hydrogène qui risquent de créer de la porosité sont identifiées sur la figure 40 (voir acétate).

1. En raison de son **point de fusion élevé**, la couche d’oxyde crée des manques de fusion, tel qu’illustré sur la figure 41c[[36]](#footnote-36).

**Figure 40 – Sources d’hydrogène pouvant créer de la porosité dans les soudures**

Il faut donc enlever la couche d’oxyde avant le soudage. On y parvient à l’aide de procédés chimiques ou mécaniques. Lorsque nécessaire, les pièces doivent être dégraissées avant l’enlèvement de la couche d’oxyde par des moyens mécaniques, car ces procédés peuvent incruster les saletés dans l’aluminium. À cet effet, on utilise généralement des produits volatiles comme l’acétone ou l’alcool. Le décapage mécanique doit être effectué à l’aide d’outils qui tournent à de grandes vitesses, pour éviter les engorgements.

Le décapage chimique, qui permet d’éliminer les couches épaisses, peut être effectué à l’aide de soude caustique et d’acide nitrique concentré, et en procédant à diverses opérations de rinçage à l’eau froide et à l’eau chaude.

On doit souder le plus vite possible après la préparation des plaques. Il n’est pas recommandé de souder si plus de six heures se sont écoulées depuis l’enlèvement de la couche d’oxyde.

Pour éviter qu’ils ne soient contaminés, les pièces à souder de même que le matériel d’apport nécessitent des soins particuliers lors de l’entreposage. Dans certains types de joints soudés, la surface du métal d’apport requis pour remplir le joint peut être plusieurs fois supérieure à celle du métal de base. L’état de surface du métal d’apport est donc très important. Il faut entreposer les fils ou les électrodes dans des pièces chauffées par éviter la condensation, ne pas les garder trop longtemps et les recouvrir dans l’usine.

La référence (34[[37]](#footnote-37)) fournit beaucoup plus de détails sur les étapes à franchir avant le soudage de pièces d’aluminium.

**Soudage des alliages de fonderie**

Il a été mentionné dans les Feuillards techniques numéros 9 et 10 que certains procédés de fonderie généraient des pièces impossibles à souder, généralement en raison de leur trop grande porosité. **De plus, la teneur en hydrogène plus élevée des pièces** **moulées et les défauts internes ou externes sont sources de** **soufflures [Bulle de gaz] dans les soudures**. En contrepartie, les alliages de fonderie sont habituellement plus alliés, ce qui les rend moins sensibles à la fissuration à chaud.

### Diapositive 52 :

1. En raison de son point de fusion élevé, la couche d’oxyde crée des manques de fusion, tel qu’illustré sur la figure 41c.

**Figure 40 – Sources d’hydrogène pouvant créer de la porosité dans les soudures**

Il faut donc enlever la couche d’oxyde avant le soudage. On y parvient à l’aide de procédés chimiques ou mécaniques. Lorsque nécessaire, les pièces doivent être dégraissées avant l’enlèvement de la couche d’oxyde par des moyens mécaniques, car ces procédés peuvent incruster les saletés dans l’aluminium. À cet effet, on utilise généralement des produits volatiles comme l’acétone ou l’alcool. Le décapage mécanique doit être effectué à l’aide d’outils qui tournent à de grandes vitesses, pour éviter les engorgements.

Le décapage chimique, qui permet d’éliminer les couches épaisses, peut être effectué à l’aide de soude caustique et d’acide nitrique concentré, et en procédant à diverses opérations de rinçage à l’eau froide et à l’eau chaude.

On doit souder le plus vite possible après la préparation des plaques. Il n’est pas recommandé de souder si plus de six heures se sont écoulées depuis l’enlèvement de la couche d’oxyde.

Pour éviter qu’ils ne soient contaminés, les pièces à souder, de même que le matériel d’apport, nécessitent des soins particuliers lors de l’entreposage. Dans certains types de joints soudés, la surface du métal d’apport requis pour remplir le joint peut être plusieurs fois supérieure à celle du métal de base. L’état de surface du métal d’apport est donc très important. Il faut entreposer les fils ou les électrodes dans des pièces chauffées pour éviter la condensation, ne pas les garder trop longtemps et les recouvrir dans l’usine.

La référence (34) fournit beaucoup plus de détails sur les étapes à franchir avant le soudage de pièces d’aluminium.

<https://www.soudeurs.com/soudage-et-brasage-de-l-aluminium-et-alliages/17864-decaper-un-traitement-de-surface-extra-pour-l-aluminium.html>

**Le processus de décapage**

Très souvent l’aluminium est décapé afin de nettoyer la surface et de réaliser une passivation complète. En outre il peut y avoir d’autres motifs pour un traitement de surface de l’aluminium. Des raison d’ordre esthétique pour l’enlèvement des décolorations de soudures et pour la réalisation d’un aspect extérieur uniforme.
Une application du décapage peut être la préparation de l’aluminium avant application d’une couche de conversion. Il est primordial de partir d’une peau d’oxyde propre avant d’appliquer la couche de conversion, de chromater ou de coller. Des souillures sur la surface diminuent l’adhérence entre l’aluminium et la couche de conversion et peuvent provoquer la corrosion. Après le décapage l’on rince à l’eau déminéralisée pour réduire la pollution de l’écaillage et pour obtenir une passivation optimale.

En résumé: par un traitement moyennant dégraissage, décapage, rinçage et oxydation à l’air:
1) on peut enlever des souillures comme graisses, huiles, et souillures atmosphériques (ultra clean);

2) on peut enlever des décolorations de soudures;

3) l’aluminium est passivé et est apte à être travaillé et appliqué aussi sans une couche de conversion;

4) la surface convient pour l’application de la couche de conversion;

5) on obtient un aspect extérieur lisse, mat ou semi-mat.

**Quel est le déroulement du processus de décapage ?**

L’aluminium est un métal amphotère, ce qui veut dire que le métal se dissout aussi bien en milieu acide qu’alcalin. Le processus de décapage peut être exécuté par immersion, circulation (système conduites) aspersion (e.a. réservoirs) ou frottement (local).

**Décapage alcalin**

Des nettoyants alcalins sont divisés en nettoyants oxydants et nettoyants non- ou à peine oxydants Une plus grande concentration de lessive et une température plus élevée accélèrent le processus de décapage, mais rendent la surface décapée plus rugueuse.
Des nettoyants fort oxydants, souvent à base de lessive de soude caustique, sont utilisés en cas d’un écaillage épais ou en cas d’un dégraissage consistant. Il s’agit ici d’un décapage rapide qui donne très vite un aspect extérieur mat. Des nettoyants non- ou à peine oxydants, à base de silicates et carbonates, sont utilisés en cas de présence minimale de graisses ou d’huiles sur la surface en aluminium.

**Décapage acide**

Processus de décapage à base d’acide nitrique.

1. une restriction au décapage alcalin peut être la présence d’un dépôt gris ou noir, qui peut être difficilement rincé sur les alliages d’aluminium contenant du cuivre ou du zinc. Pour enlever ce dépôt les alliages sont ensuite immergés dans l’acide nitrique.

2. L’aluminium est très peu attaqué par l’acide nitrique. A température ambiante on peut décaper pendant quelques heures à condition que la concentration en acide nitrique ne soit pas trop élevée. Ce processus a comme grand avantage qu’un système de conduites peut être nettoyé en circulation.

**Processus de décapage à base d’acide nitrique–acide fluorhydrique:** il s’agit d’un processus de décapage qui égalise rapidement et qui donne un aspect lisse et mat. Ce processus est appliqué à température ambiante pendant 5-15 minutes. Même si l’aluminium contient du silicium comme élément d’alliage, ce processus est indiqué.

**Processus de décapage à base d’acide phosphorique:**  ce moyen de décapage n’est effectif que si l’écaillage est très mince. Des écaillages plus gros nécessitent l’ajout de fluorides à la solution phosphorique. Par le décapage en acide phosphorique une couche de phosphates se forme qui peut servir de fond à une couche de laque ou de peinture. La couche de phosphates est une couche de conversion avec des qualités d’adhérence améliorées. Dans le secteur de l’énergie nucléaire et le secteur pharmaceutique, les exigences dans le domaine du nettoyage, décapage et passivation de l’aluminium sont élevées.

### Diapositive 53 :

**15.3 Problèmes de fusion**

Pour que la soudure soit acceptable sur le plan de la résistance, il faut éviter les problèmes de fusion. Il suffit de prendre quelques précautions, ce qui n’exclut pas l’importance de l’habileté ou de l’expérience du soudeur.

L’aluminium conduit la chaleur rapidement, c’est-à-dire que la chaleur produite au point de fusion est soutirée rapidement par les plaques, tel qu’illustré sur la figure 41a (voir acétate). Il est donc difficile d’induire assez de chaleur pour fusionner la racine d’un cordon de soudure, surtout pour les plaques d’aluminium épaisses (figure 41b – voir acétate). Il est important de fournir rapidement de grandes quantités de chaleur. L’ampérage requis doit donc être élevé, quitte à utiliser de grandes vitesses d’arc.

**Figure 41 – Problème de fusion lors du soudage (voir acétate)**

Pour vérifier la pénétration d’une soudure d’angle, il est recommandé de procéder à des essais de rupture sur de petits échantillons de même grade et de même épaisseur, et soudés de la même façon qu’en production. **Lorsque la racine est non pénétrée, la soudure brise facilement puisque l’aluminium est sensible aux entailles**. Lorsque la pénétration est adéquate, la cassure survient à travers la zone affectée par la chaleur. Un manque de fusion est une indication qu’il y a des corrections à apporter à la préparation des plaques ou à la procédure de soudage.

### Diapositive 54 :

L’apport de chaleur est déterminé par les paramètres électriques et la vitesse d’arc. Pour une vitesse d’arc, un ampérage et un voltage donnés, des chanfreins avec des angles d’ouverture plus ou moins grands créent les dépôts illustrés sur la figure 42a (voir acétate). On constate que la **quantité de métal de base devant être fondu dans le cas de petits angles d’ouverture est beaucoup plus grande**. Ce phénomène, combiné au fait que la quantité de chaleur à fournir à l’aluminium est grande, puisqu’elle est évacuée rapidement dans les plaques (surface d’évacuation plus grande pour le cas des petits angles d’ouverture que pour les grands angles d’ouverture), implique qu’on devra favoriser de plus grands angles d’ouverture lors de la préparation des plaques d’aluminium, comparativement à l’acier. De grands angles sont aussi requis pour permettre un bon accès avec le procédé GMAW, car les buses sont assez volumineuses.

Si un angle d’ouverture de 45o est acceptable pour l’acier, un angle d’ouverture de 60° est préférable pour l’aluminium (figure 42b – voir acétate). Pour des plaques de 12 mm et plus, des angles de 60° sont un minimum. Ils peuvent être aussi élevés que 75 ou 80o, selon le procédé. Pour des plaques très épaisses, on peut aussi utiliser **le préchauffage**, mais avec précaution, comme on le verra plus loin.

**Figure 42 – Influence de l’angle d’ouverture des chanfreins**

Pour vérifier la pénétration d’une soudure d’angle, il est recommandé de procéder à des essais de rupture sur de petits échantillons de même grade et de même épaisseur, et soudés de la même façon qu’en production. Lorsque la racine est non pénétrée, la soudure brise facilement puisque l’aluminium est sensible aux entailles. Lorsque la pénétration est adéquate, la cassure survient à travers la zone affectée par la chaleur. Un manque de fusion est une indication qu’il y a des corrections à apporter à la préparation des plaques ou à la procédure de soudage.

<https://wiklou.org/wiki/Soudage_%C3%A0_l%27%C3%A9lectrode_enrob%C3%A9e#Vitesse_de_d.C3.A9placement>

**Vitesse de déplacement**

La vitesse de déplacement de l'électrode conditionne la qualité et la finition du cordon de soudure, mais aussi le degré de pénétration et la déformation des pièces (plus on passe du temps à souder, plus les pièces se dilatent et se rétractent). Il faut avoir une vitesse régulière (indescriptible théoriquement …). La largeur du cordon est un bon indicateur. La régularité de son aspect après piquage du laitier témoigne de cette régularité.

### Diapositive 55 :

<https://www.sodel.com/medias/iw/fissuration-a-froid-des-soudures-sodel.pdf>

Du point de vue métallurgique, les fissures qui prennent naissance lors du soudage peuvent être regroupées dans deux catégories à savoir la fissuration à froid et la fissuration à chaud. La différenciation de ce type de fissures revient d’abord à reconnaître **leur disposition** **privilégiée** d’une part et à indiquer **le moment de leur** **apparition** d’autre part.

La fissuration à **chaud ou de solidification** ne tarde pas à se manifester, elle **apparait lors du dernier stade de** **solidification** avant que le métal ne soit complètement solidifié. Quant à la fissuration à froid, souvent appelée fissuration par **l’hydrogène** ou **fissuration différée**, elle intervient quand la soudure est pratiquement froide.

Cette dernière est assez répandue **dans les aciers** de structures (A36, A516, etc.) et les aciers faiblement alliés (8620, 4130, 4340, etc.). En fait, elle survient quand la température commence à baisser à partir d’environ 190 °C (375 °F) mais le phénomène surgit souvent à la température ambiante, et peut prendre jusqu’à 24 heures après le refroidissement complet de la soudure pour se manifester. C’est pour cette raison que certains codes de contrôle recommandent des délais d’attente de 24 à 48 heures avant de procéder à l’inspection des soudures.

<http://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/pedagogiques/8367/8367-les-principaux-defauts-et-risques-lies-au-soudage-ensps.pdf>

Les fissures dans un métal sont divisées en deux catégories selon **l'endroit** où elles apparaissent :

 Dans le métal fondu (au milieu de la soudure) ; elles dépendent alors de la nature du métal d'apport et des conditions d'exécution de la soudure.

 Dans le métal de base, dans la zone de liaison; ces dernières sont généralement reliées à une plus faible soudabilité du métal.

**15.4 Fissuration à chaud**

L’aluminium perd toutes ses propriétés plastiques à la température de fusion (660°C) ou près de cette température. Au refroidissement, des fissures peuvent survenir au milieu de la soudure ou dans la zone de liaison adjacente à la soudure, tel qu’illustré sur la figure 43 (voir acétate 55).

Les causes de la fissuration à chaud sont :

* la composition chimique du matériau de base et de la soudure ;
* le temps dans la gemme de températures critiques ;
* le niveau des contraintes lors du refroidissement ;
* le profil de la soudure.

**Figure 43 – Fissuration à chaud**

La cause la plus importante est la première. C’est aussi la plus fondamentale puisque c’est celle qui régit le choix du métal d’apport en fonction des alliages à relier. Ainsi, on comprendra pourquoi les alliages 1050, 1100, 3003, 3004, 5454 et 5083, par exemple, sont facilement soudables, alors que les alliages 6063, 6101, 6351, 6061, 5052 et 7004, bien que soudables, sont très susceptibles à la fissuration.

### Diapositive 56 et 57 :

<http://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/pedagogiques/8367/8367-les-principaux-defauts-et-risques-lies-au-soudage-ensps.pdf>

Les fissures dans un métal sont divisées en deux catégories selon **l'endroit** où elles apparaissent :

* Dans le métal fondu (au milieu de la soudure) ; elles dépendent alors de la nature du métal d'apport et des conditions d'exécution de la soudure.
* Dans le métal de base, **dans la zone de liaison**; ces dernières sont généralement reliées à une plus faible soudabilité du métal.

**15.4 Fissuration à chaud**

L’aluminium perd toutes ses propriétés plastiques à la température de fusion (660°C) ou près de cette température. Au refroidissement, des fissures peuvent survenir au milieu de la soudure ou dans la zone de liaison adjacente à la soudure, tel qu’illustré sur la figure 43.

Les causes de la fissuration à chaud sont :

* la composition chimique du matériau de base et de la soudure ;
* le temps dans la gamme de températures critiques ;
* le niveau des contraintes lors du refroidissement ;
* le profil de la soudure.

**Figure 43 – Fissuration à chaud**

**La cause la plus importante est la première**. C’est aussi la plus fondamentale puisque c’est celle qui régit le choix du métal d’apport en fonction des alliages à relier. Ainsi, on comprendra pourquoi les alliages 1050, 1100, 3003, 3004, 5454 et 5083, par exemple, sont facilement soudables, alors que les alliages 6063, 6101, 6351, 6061, 5052 et 7004, bien que soudables, sont très susceptibles à la fissuration.

### Diapositive 58 :

**7.7.1 Diagramme de phase**

Un diagramme de phase définit, pour un métal et un élément d’alliage donnés, les **différentes phases formées à différentes températures pour différents pourcentages d’alliage** dans des conditions de refroidissement lent. Le diagramme de phase du cuivre dans l’aluminium, qui caractérise la série 2000, est montré à la figure 15 (voir acétate). On comprendra l’utilité d’un tel diagramme en examinant ce qui arrive à l’aluminium pur (0 % de cuivre) lorsqu’il passe de l’état de métal en fusion à l’état solide, c’est-à-dire en suivant les étapes 1, 2 et 3, et en examinant le comportement de l’alliage 2024 (4,4 % de cuivre) lorsqu’il se refroidit, en suivant les étapes A, B, C et D.

**Figure 15 – Diagramme de phase du cuivre dans l’aluminium (série 2000)**

**Pour l’aluminium pur**, donc :

Étape 1 – À 670°C, l’aluminium est liquide, le point de fusion étant de 660°C.

Étape 2 – À 515°C, l’aluminium est totalement solidifié sous la forme cubique à faces centrées (Al). En fait, cet état a débuté à 660°C.

Étage 3 – À 20°C, la structure cristalline est toujours la même qu’elle était à 515°C. Il en sera ainsi jusqu’à 200°C.

**Pour l’alliage 2024 :**

Étape A – Le mélange Al-Cu est liquide (L) comme un mélange de sucre et café chaud.

Étape B – À partir de 630°C, le mélange liquide a commencé à se solidifier. Il est à la fois liquide et solide (Al + L). La solidification se poursuivra jusqu’à 575°C. Il convient de noter que la gamme des températures de solidification (entre 575 et 630°C) créera des problèmes de fissuration à chaud lors d’opération de soudage.

Étape C – À 575°C, le métal est totalement solidifié. Il y a toujours une solution de cuivre dans l’aluminium, comme à l’étape A, mais au lieu d’avoir une solution liquide, il y a une solution solide et ce, jusqu'à 510°C.

Étape D – Lorsque la température passe sous les 510°C, une partie du cuivre devient insoluble dans l’aluminium et a tendance à diffuser pour créer des précipités de Al-Cu (CuAl2), de la même façon qu’un précipité de sucre se forme si on en met trop dans le café. À mesure que la température baisse, la solubilité du cuivre baisse et davantage de précipités se forment. Dans le cas du café, le sucre précipite dans le fond du café. Pour ce qui est du cuivre dans l’aluminium, il précipite aux joints de grains, si le refroidissement se fait lentement.

On remarquera, sur la figure 15 (voir acétate), que la quantité de cuivre excédant 5.65 % n’est pas soluble à l’état solide à quelque température que ce soit.

**15.4.1 Composition chimique**

On a vu, à la sous-section 7.7[[38]](#footnote-38), que chaque série d’alliage possède un diagramme de phase et que chaque alliage a un intervalle de température de solidification qui le caractérise. Comme on peut l’observer sur la figure 15, l’alliage 2024, qui contient 4,4 % de cuivre, possède un intervalle de température de solidification de 55°C (630-575°C). L’étape de la solidification est celle pendant laquelle l’aluminium est à la fois partiellement solide et partiellement liquide. Il s’agit de la zone identifiée par (Al + L) sur la figure 15[[39]](#footnote-39) et des zones identifiées par (AL + L) sur les figures 16[[40]](#footnote-40) et 17[[41]](#footnote-41).

Certains alliages, comme le 2024, possèdent un intervalle de température de solidification élevé. Or, dans cet intervalle, la partie encore liquide fait que l’alliage **n’offre pratiquement aucune résistance aux forces de retrait de la solidification**. L’endroit où il reste du liquide, juste avant que la solidification soit complète, est le milieu du cordon de soudure, tel qu’indiqué sur la figure 43 (voir acétate 61). Cette région, qui n’a pas de résistance à la déformation, se fissure sous les contraintes imposées par le métal qui se contracte de chaque côté, en refroidissant. Il convient de rappeler que l’aluminium se contracte deux fois plus que l’acier pour une même chute de température. De plus, les contraintes venant du bridage des plaques ou de l’extérieur peuvent s’ajouter.

**En règle générale, plus la gamme des temps de solidification est grande, plus le risque de fissuration à chaud augmente**, puisque la quantité de retrait est proportionnelle à l’amplitude de la chute de température entre le moment où le liquide commence à se solidifier et celui où la solidification est complète.

Dans la zone de liaison, une partie du métal de base est fondue entre les grains. Le même processus que celui décrit précédemment survient, mais la fissure apparaît dans le métal de base, très près de la soudure, tel qu'illustré sur la figure 43.

### Diapositive 59 :

La figure 44 (voir acétate) indique la susceptibilité à la fissuration à chaud de différents groupes d’alliages. Il suffit de consulter les diagrammes de phase de ces systèmes d’alliages pour noter que là où la gamme de température de solidification est grande, la soudabilité est faible et vice-versa.

**Figure 44 – Susceptibilité relative à la fissuration à chaud de séries d’alliages**

Parce que plusieurs alliages d’aluminium sont susceptibles de se fissurer à chaud, on utilise souvent des matériaux d'apport ayant une composition chimique différente de celles des plaques à souder. Il est ainsi possible d’améliorer la soudabilité de certains alliages en réduisant l'intervalle de température de solidification par un choix judicieux de métal d'apport. La susceptibilité à la fissuration à chaud dépend alors de la composition chimique de la soudure, qui inclut des éléments du métal d’apport et du métal de base. Pour éviter les fissures à chaud, il est donc tout à fait approprié d’utiliser les électrodes recommandées par les normes.

Pour réduire le risque de fissuration, on utilise souvent des matériaux d'apport ayant une composition chimique différente de celles des plaques à souder.

### Diapositive 60 :

Parce que plusieurs alliages d’aluminium sont susceptibles de se fissurer à chaud, on utilise souvent des matériaux d'apport ayant une composition chimique différente de celles des plaques à souder. Il est ainsi possible d’améliorer la soudabilité de certains alliages en réduisant l'intervalle de température de solidification par un choix judicieux de métal d'apport. La susceptibilité à la fissuration à chaud dépend alors de la composition chimique de la soudure, qui inclut des éléments du métal d’apport et du métal de base. **Pour éviter les fissures à chaud, il est donc tout à fait approprié d’utiliser les électrodes recommandées par les normes**.

Dans le cas illustré sur la figure 45 (voir acétate), pour améliorer la soudabilité de l’alliage 5052, il faut utiliser des matériaux d’apport qui ont plus, ou moins, de magnésium que le 5052. Généralement, les matériaux d’apport suggérés contiennent plus d’éléments d’alliages que les matériaux de base.

**Figure 45 – Choix de matériaux d’apport pour le soudage**

### Diapositive 61 :

Le taux de dilution, c’est-à-dire le pourcentage de métal de base que l’on trouve dans la soudure, a une influence sur la composition chimique de cette dernière. Dans l’exemple précédent, si on soude l’alliage 5052 avec un taux de dilution de 80 %, on obtient un bain de fusion dont la susceptibilité à la fissuration est près de celle du 5052. La géométrie du joint et les paramètres de soudage utilisés ont donc une grande influence sur le résultat final, surtout pour les alliages qui ont une moins bonne soudabilité. On a avantage à garder le taux de dilution au minimum pour profiter de la plus faible gamme de solidifications des matériaux d’apport, relativement à celle des matériaux de base. La figure 46 (voir acétate) présente quelques exemples de joints soudés avec différents taux de dilution.

**Figure 46 – Taux de dilution du métal de base pour différents joints soudés**

### Diapositive 62 et 63 :

<http://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/pedagogiques/8367/8367-les-principaux-defauts-et-risques-lies-au-soudage-ensps.pdf>

Les fissures dans un métal sont divisées en deux catégories selon **l'endroit** où elles apparaissent :

* Dans le métal fondu (au milieu de la soudure) ; elles dépendent alors de la nature du métal d'apport et des conditions d'exécution de la soudure.
* Dans le métal de base, **dans la zone de liaison**; ces dernières sont généralement reliées à une plus faible soudabilité du métal.

Pour réduire les risques de fissuration dans la zone de liaison, on ne peut jouer sur la composition chimique, car il s’agit de la composition des plaques que l'on doit souder. Pour contourner le problème, on utilise des matériaux d'apport avec un haut taux d’éléments d’alliage, comme le 4043 (5 % de silicium), ce qui a pour effet de réduire le point de fusion. Par conséquent, la zone de liaison a le temps de se solidifier en bonne partie et d’avoir suffisamment de résistance mécanique avant que la soudure, qui a un plus bas point de fusion, se solidifie et impose des contraintes de retrait.

En terminant cette présentation sur l’influence de la composition chimique sur la fissuration à chaud, il importe de faire quelques mises en garde en présentant des combinaisons d’alliages à proscrire pour le soudage.

* Il faut éviter d’utiliser l'alliage 4043 comme métal d’apport avec l’alliage 1100 et 80 % de dilution. Il en résulte une soudure très sensible à la fissuration avec seulement 1 % de Si.
* On doit faire attention de ne pas utiliser le métal d’apport 4043 avec les alliages qui contiennent plus de 2,5 % de magnésium comme les 5083, 5086 et 5456, car des composés de MgxSiy peuvent se former. Ces composés réduisent la ductilité et augmentent le risque de fissuration (voir les sous-sections 15.9[[42]](#footnote-42) et 16.17[[43]](#footnote-43)).
* Il faut éviter les combinaisons reconnues pour être sujettes à la fissuration comme les alliages contenant du magnésium et du cuivre. Il ne faut donc pas souder du 2000 avec du métal d’apport 5000 et du 5000 avec du métal d’apport 2000. L’alliage 5052 (2,5 % de Mg), soudé avec un métal d’apport en alliage 5554 (2,7 % Mg), crée une soudure fissurante, car à 2,6 % de Mg, l’intervalle de solidification est très grand.

### Diapositive 64 :

**15.4.2 Temps dans la gamme de températures critiques**

Il faut utiliser un ampérage élevé et les vitesses d’arc les plus grandes possible. Cela est primordial pour le soudage de l’aluminium afin d’avoir un bon rendement thermique et, ainsi, éviter que la chaleur ne soit soutirée trop rapidement sans permettre la fusion du métal de base. Les grandes vitesses réduisent le temps pendant lequel la soudure demeure dans la zone critique et réduit la tendance à la fissuration. De plus, de grandes vitesses de soudage réduisent l’étendue de la zone affectée thermiquement et, du même coup, le retrait du métal de base. Il y a donc moins de contraintes appliquées sur la soudure lors du refroidissement et moins de chances de fissuration.

### Diapositive 65 :

**15.4.3 Niveau de contraintes lors du refroidissement**

Lorsque cela est possible, il faut chercher à réduire le niveau des contraintes dans les pièces assemblées. On peut parfois mettre l'assemblage en compression. Il est préférable, tel que déjà mentionné, de faire les soudures lorsque les plaques ne sont pas fixées ailleurs, dans le but de réduire le bridage.

À cause du phénomène de retrait à la solidification qui provoquent des déformations des pièces ainsi que des contraintes résiduelles (tensions internes à la matière). On essaie de limiter la déformation.

### Diapositive 66 :

**15.4.4 Profil de la soudure**

Les profils de soudure concaves sont à éviter, car plus de contraintes de retrait passent par le centre de la surface de la soudure, et c’est précisément à cet endroit que l’alliage reste liquide le plus longtemps (figure 47a - voir acétate). Il est préférable d’avoir une réserve de métal dans la convexité pour reprendre les contraintes.

**Figure 47 – Moyens d’éviter la fissuration à chaud**

### Diapositive 67 :

Un des problèmes du soudage de l’aluminium est la présence de cratères, si on n’a pas de bonnes techniques d’arrêt. Les cratères ont un profil concave et, de plus, ils refroidissent très rapidement étant donné que le régime de chaleur est interrompu. Il se produit souvent des fissures de cratère. Pour contourner cette difficulté, il faut éviter les soudures discontinues qui ont pour effet de multiplier les cratères et, dans la mesure du possible, utiliser des appendices de départ et d’arrivée, tels que ceux montrés sur la figure 47b (voir acétate 67), pour faire les départs et les arrêts en dehors du joint. Enfin, il faut éviter les soudures verticales descendantes parce qu’elles ont tendance à former des profils concaves.

<https://www.rocdacier.com/defauts-des-soudures/#7_Defauts_retassures_et_criques>

Lorsque le métal se refroidit, il est possible que le cordon ne se referme pas de façon uniforme en fin de soudure. **Le creux formé est appelé retassure**. Les retassures de cratère sont des défauts dus à une **mauvaise reprise de passes** ou à un **arrêt trop brusque de l’arc électrique**. Les criques sont des défauts non visibles.

### Diapositive 68 :

Un des problèmes du soudage de l’aluminium est la présence de cratères, si on n’a pas de bonnes techniques d’arrêt. Les cratères ont un profil concave et, de plus, ils refroidissent très rapidement étant donné que le régime de chaleur est interrompu. Il se produit souvent des fissures de cratère. Pour contourner cette difficulté, il faut éviter des soudures discontinues qui ont pour effet de multiplier les cratères et, dans la mesure du possible, utiliser des appendices de départ et d’arrivée, tels ceux montrés sur la figure 47b, pour faire les départs et les arrêts en dehors du joint. Enfin, il faut éviter les soudures verticales descendantes parce qu’elles ont tendance à former des profils concaves.

### Diapositive 69 :

**15.5 Conséquences de la conductibilité thermique**

Le soudage des petites pièces entraîne en réchauffement rapide de toute la pièce, ce qui n’est généralement pas désirable. Pour pallier à cette difficulté, on peut réduire l’apport de chaleur à mesure que la soudure progresse. Il suffit d’augmenter la vitesse d’arc, si on utilise le procédé GMAW. Il est aussi possible d’interrompre le soudage et de laisser refroidir avant de reprendre.

Le soudage de grosses pièces entraîne aussi son lot de difficultés. Pour remplacer la chaleur évacuée rapidement dans les plaques, il faut augmenter le courant. On peut aussi penser à utiliser un mélange argon-hélium ou de l’hélium pur au lieu de l’argon pur. L’hélium permet de transférer plus de chaleur dans la plaque. Il est aussi possible de préchauffer les pièces, mais avec précaution et en tenant compte de certaines restrictions (voir la sous-section 15.9).

Si on soude deux alliages différents, il faut préchauffer le plus conducteur ou, encore mieux, équilibrer la chaleur de façon appropriée. Dans l’exemple de la figure 48 (voir acétate), la torche est orientée davantage vers la plaque en alliage 6061, plus conducteur que l’alliage 5083.

**Figure 48 – Compensation de chaleur pour l’assemblage de pièces en alliages d’aluminium**

Le **soudage MIG-MAG** (respectivement 131 ou 132/133, et 135 ou 136/138 suivant la norme EN [ISO](https://fr.wikipedia.org/wiki/Organisation_internationale_de_normalisation) 4063-2011), ou encore *GMAW* selon les normes américaines, est un procédé de [soudage](https://fr.wikipedia.org/wiki/Soudage) semi-automatique. La fusion des métaux est obtenue par l’énergie calorifique dégagée par un [arc électrique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Arc_%C3%A9lectrique) qui éclate dans une atmosphère de protection entre un fil électrode fusible et les pièces à assembler.

Le **soudage TIG** est un procédé de [soudage](https://fr.wikipedia.org/wiki/Soudage) à l'[arc](https://fr.wikipedia.org/wiki/Arc_%C3%A9lectrique) avec une électrode non fusible, en présence d'un métal d'apport si besoin. TIG est un acronyme de *Tungsten Inert Gas*, où *Tungsten* ([Tungstène](https://fr.wikipedia.org/wiki/Tungst%C3%A8ne)) désigne l'[électrode](https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89lectrode) et *Inert Gas* (Gaz inerte) le type de gaz [plasmagène](https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89tat_plasma) utilisé. L'[arc électrique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Arc_%C3%A9lectrique) se crée entre l'électrode et la pièce à souder qui est protégée par un gaz ou un mélange de [gaz rares](https://fr.wikipedia.org/wiki/Gaz_rare) tels que l'[argon](https://fr.wikipedia.org/wiki/Argon) et l'[hélium](https://fr.wikipedia.org/wiki/H%C3%A9lium). De fait, l’arc électrique remplace la flamme du chalumeau traditionnel. La soudure à l’arc s’appuie sur l’élévation de la température des pièces à assembler jusqu'au point de fusion grâce au passage d’un courant électrique [alternatif](https://fr.wikipedia.org/wiki/Courant_alternatif) ou [continu](https://fr.wikipedia.org/wiki/Courant_continu)[1](https://fr.wikipedia.org/wiki/Soudage_TIG).

Le soudage s'effectue le plus souvent en polarité directe (pôle - du générateur relié à l'électrode) pour les métaux et alliages ([aciers](https://fr.wikipedia.org/wiki/Acier), inox, cuivreux, [titane](https://fr.wikipedia.org/wiki/Titane), [nickel](https://fr.wikipedia.org/wiki/Nickel)...) sauf dans le cas des alliages légers d'[aluminium](https://fr.wikipedia.org/wiki/Aluminium) ou du [magnésium](https://fr.wikipedia.org/wiki/Magn%C3%A9sium), où l'on soude en polarité alternée. Il n'est pas possible de souder en polarité inverse (pôle + relié à l'électrode) car cela détruirait cette électrode en la faisant fondre.

### Diapositive 70 et 71 :

**15.6 Déformations**

Les caractéristiques influençant la quantité de retrait, donc, la quantité de déformation des assemblages d’aluminium, sont comparées à celles de l’acier dans le tableau 14 (voir acétate 69).

Le résultat net de cette comparaison est que les déformations totales des pièces en aluminium sont, à toutes fins pratiques, équivalentes à celles des pièces en acier.

Pour contrer les effets des déformations, plusieurs mesures peuvent être prises :

* Adopter une séquence de soudage optimisant la répartition thermique de part et d’autre du joint, en tirant profit du fait que l’aluminium est léger et qu’il est plus facilement manœuvrable ;
* Utiliser les gabarits pour maintenir les assemblages en place ;
* Concevoir des joints minimisant la déformation. Dans les soudures sur préparation, par exemple, utiliser des préparations doubles plutôt que simples, ou des préparations de joints nécessitant moins de métal d’apport.

On comprendra que certaines de ces recommandations peuvent entrer en conflit avec celles qui ont été formulées précédemment pour contrer la fissuration à chaud. Il faut trouver le juste équilibre.

**Tableau 14 – Comparaison de l’aluminium avec l’acier pour les quantités de déformation induite par le soudage**

### Diapositive 72 :

**15.7 Soudage par groupe d’alliages**

Les familles d’aluminium les plus faciles à souder sont celles qui ne sont pas traitées thermiquement, soit les séries 1000, 3000 et 5000. Ces dernières sont livrées écrouies et les seuls effets du cycle thermique sont de provoquer une recristallisation dans la zone thermiquement affectée. La famille 6000 peut être soudée facilement, mais le soudage s’accompagne d’un adoucissement des propriétés mécaniques (voir les sous-sections 8.2 et 8.3[[44]](#footnote-44)).

Les séries 4000 et 2000, à résistance élevée, sont soudables à la condition de prendre des précautions particulières. Dans la famille 7000, seuls les alliages 7005 et 7039 sont soudables. De plus, les soudures vieillissent naturellement et retrouvent 70 à 90 % de la résistance mécanique antérieure dans les 30 à 90 jours suivant le soudage.

Les alliages de corroyage suivants sont facilement soudables à l’aide des procédés GMAW et GTAW : l’aluminium pur, 1350, 1060, 1100, 2219, 3003, 3004, 5005, 5050, 5052, 5083, 5086, 5154, 5254, 5454, 5456, 5652, 6010, 6061, 6063, 6101, 6151, 7007 et 7039.

Les alliages suivants sont soudables, la plupart du temps : 2014, 2036, 2038, 4032. L’alliage 2024 a une soudabilité limitée, alors que les alliages suivants sont réputés non soudables : 7021, 7029, 7050, 7075, 7079, 7129, 7150, 7178 et 7475.

Les alliages de fonderie suivants sont facilement soudables : 356.0, 443.0, 413.0, 514.0, A514.0.

Les alliages suivants sont soudables, la plupart du temps : 208.0, 308.0, 319.0, 333.0, 355.0, C355.0, 511.0, 512.0, 710.0, 711.0 et 712.0.

Les alliages suivants présentent une soudabilité limitée : 222.0, 238.0, 295f.0, 296.0 et 520.0. L’alliage 242.0, quant à lui est non soudable.

**Soudage des alliages de fonderie**

Il a été mentionné dans les Feuillards techniques numéros 9 et 10 que certains procédés de fonderie généraient des pièces impossibles à souder, généralement en raison de leur trop grande porosité. De plus, la teneur en hydrogène plus élevée des pièces moulées et les défauts internes ou externes sont sources de soufflures dans les soudures. En contrepartie, les alliages de fonderie sont habituellement plus alliés, ce qui les rend moins sensibles à la fissuration à chaud.

Les problèmes de réduction des propriétés mécaniques se retrouvent également lors du soudage des pièces moulées.

Néanmoins, certains alliages de fonderie se soudent relativement bien; comme par exemple : le 214, le 319, le 333, le 355, le C355, le 356, le 413, le 443 A612, C612 et D612.

### Diapositive 73 :

**15.8 Matériaux d’apport**

Le système de classification des matériaux d’apport est le même que celui des alliages de corroyage ou de fonderie, les chiffres étant précédés d’une lettre ou de deux lettres :

* E pour l’électrode (fil continu),
* R pour la baguette enrobée,
* ER si le produit peut être utilisé comme électrode ou comme baguette.

**Série ER1000** – L’électrode ER1100 peut être utilisée pour tous les alliages de la série 1000 ainsi que pour les alliages 3003 et 5005. La résistance à la traction et la ductilité sont acceptables. La conductivité électrique ainsi que la résistance à la corrosion sont excellentes.

Pour les applications chimiques, il faut choisir une **série ER2000** – L’électrode ER2219 peut être utilisée pour souder les alliages 2219 et 2014 ainsi que les alliages de fonderie à base de cuivre. Elle est traitable thermiquement et permet d’obtenir de grandes résistances mécaniques et une bonne ductilité pour les alliages de fonderie Al-Cu.

**Série ER4000** – Les électrode ER4043 et ER4047 peuvent être utilisées pour souder une grande variété de matériaux de base, tels les alliages 2014, 2219, 5005, 5050, tous les alliages des séries 1000, 3000 et 6000, ainsi que les alliages de fonderie à base de Al-Si ou Al-Si-Mg (série 400.0 46 300.0).

L’électrode ER4043 est une des deux électrodes les plus utilisées pour des applications structurales (voir le tableau 9). Les ER4043 et ER4047 résistent bien à la fissuration à chaud. Elles ont une résistance mécanique passable et elles résistent bien à la corrosion. La grande quantité de silicium que ces alliages contiennent fait qu’ils n’ont pas une ductilité aussi bonne que les ER1000, ER2000 ou ER5000. De plus, à l’anodisation, le silicium demeure emprisonné dans la couche d’oxyde, ce qui donne à l’aluminium une surface gris foncé. Si les plaques doivent être anodisées après soudage, il est préférable d’opter pour des fils de la série ER5000, car ils ne contiennent pas de silicium.

Ces deux alliages d’apport ne répondent pas aux traitement thermiques. Par contre, le ER4145, qui est peu sensible à la fissuration à chaud pour souder les alliages de la série 2000 ou les alliages de coulée à base d’Al-Cu ou Al-Si-Cu, répond, lui, aux traitements thermiques. Le ER4145 peut remplacer le ER4043 ou le ER4047 pour plusieurs applications, mais les joints auront une moins grande ductilité.

**Série ER5000** – Les matériaux d’apport de cette série sont ceux qui ont les meilleures propriétés mécaniques. L’électrode ER5356, qui appartient à cette série, est très largement utilisée dans les applications structurales (tableau 9 – voir acétate 73).

Les électrodes de la série ER5000 ont une meilleure ductilité que les ER2000 et ER4000. Elles peuvent être utilisées pour souder les alliages des séries 5000 et 6000, ainsi que l’alliage 7005. La résistance mécanique et la résistance à la fissuration à chaud augmente avec la quantité de magnésium. Le préchauffage et la température, entre chaque passe, doivent toutefois demeurer sous les 65°C pour éviter la sensibilisation à la corrosion sous tension. Les électrodes de cette série génèrent moins d’ozone que l’électrode ER4043.

**Alliages R242.0, R295.0 et R355.0** – Ces alliages sont utilisés pour la réparation des alliages de fonderie.

Le métal d’apport doit être au moins aussi pur que le métal de base pour éviter la corrosion.

### Diapositive 74 :

**Série ER5000** – Les matériaux d’apport de cette série sont ceux qui ont les meilleures propriétés mécaniques. L’électrode ER5356, qui appartient à cette série, est très largement utilisée dans les applications structurales (tableau 9).

Les électrodes de la série ER5000 ont une meilleure ductilité que les ER2000 et ER4000. Elles peuvent être utilisées pour souder les alliages des séries 5000 et 6000, ainsi que l’alliage 7005. La résistance mécanique et à la fissuration à chaud augmente avec la quantité de magnésium. Le préchauffage et la température, entre chaque passe, doivent toutefois demeurer sous les 65°C pour éviter la sensibilisation à la corrosion sous tension. Les électrodes de cette série génèrent moins d’ozone que l’électrode ER4043.

**Alliages R242.0, R295.0 et R355.0** – Ces alliages sont utilisés pour la réparation des alliages de fonderie.

Il faut que le métal d’apport soit au moins aussi pur que le métal de base pour éviter la corrosion.

Comme on l’a vu à la section 8, l’assemblage soudé a des propriétés moindres que les plaques avant soudage.

### Diapositive 75 :

Le matériau d’apport est par conséquent élaboré pour avoir une bonne ductilité et pour réduire la susceptibilité à la fissuration à chaud. Le tableau 15 (voir acétate) donne la liste des matériaux d’apport les plus susceptibles de répondre à certaines attentes pour quelques alliages courants.

**Tableau 15 – Recommandation de matériaux d’apport pour l’obtention de certaines caractéristiques**

<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjk_92ytc_uAhWnUt8KHRKtCPAQFjAFegQIARAC&url=https%3A%2F%2Fwww.cqrda.ca%2Fwp-content%2Fuploads%2F2017%2F07%2Ffeuillard_alliages-durcissement-par-%25C3%25A9crouissage.pdf&usg=AOvVaw2Knoz5bkbaAfsRQoA72kyH>

**Ductilité :**

* Propriété d'un matériau qui peut subir une déformation permanente sans rupture ni fissure, sous l'effet d'un effort de traction.
* Propriété d'un matériau de se laisser déformer facilement sous certaines conditions de température, de pression et de vitesse des sollicitations ; en particulier d'un métal de se laisser étirer facilement.

**Dureté :** résistance qu'oppose un matériau à la déformation plastique locale et superficielle. On mesure les déformations permanentes produites soit par rayure au moyen d'une pointe en diamant, soit par impression d'une bille en acier, d'un cône ou d'une pyramide en diamant sous une charge statique.

**Écrouissage :** augmentation de dureté et de résistance produites par une déformation plastique effectuée au-dessous de la température de recristallisation. On se sert généralement de la diminution relative des sections initiales et finales pour caractériser la manière dont un corps a été écroui dans tel ou tel procédé d'usinage.

**Laminage :** procédé de transformation rapide des métaux, à chaud ou à froid, par passage entre deux cylindres lisses ou cannelés, tournant en sens inverse. En raison de ce mouvement de rotation et des forces générées entre les cylindres, il se produit un écoulement du métal vers l'avant. Le potentiel d’allongement et de réduction de section qui en résulte est entre autres fonction de la température du métal laminé et du diamètre des cylindres.

**Malléabilité :** désigne spécifiquement la capacité d'un métal à se réduire en feuilles, par forgeage ou laminage (déformation en compression).

**Recuit de restauration:** traitement thermique ayant pour but de modifier la structure d'un métal ou d'un alliage en vue d’atténuer ou de détruire l'effet de traitements mécaniques antérieurs (écrouissage), d'adoucir la matière

### Diapositive 76 :

La plupart des normes et des manuels de calcul qui traitent des assemblages soudés en aluminium, présentent un tableau semblable au tableau 16 (voir acétate), lequel permet au concepteur de faire un choix éclairé de matériaux d’apport pour plusieurs combinaisons d’alliages. Les tableaux peuvent différer d’une norme à l’autre, selon les usages. Dans le cas présent, celui qui a été retenu reflète la pratique canadienne, voire nord-américaine, de calcul des charpentes d’aluminium.

**Tableau 16 – Matériaux d’apport pour soudage des alliages de corroyage, selon les procédés GMAW et GTAW35**

Si on utilise des matériaux d’apport autres que ceux identifiés dans le tableau 16, on risque d’obtenir des joints fissurés ou fragiles.

### Diapositive 77 :

**15.9 Préchauffage et application de la chaleur**

Le préchauffage ne devrait être utilisé que lorsqu’il n’existe aucune autre solution. Le préchauffage augmente la largeur de la zone affectée thermiquement des assemblages soudés et, par conséquent, réduit les propriétés mécaniques.

Les cas pouvant justifier un préchauffage sont les suivants :

* Les plaques épaisses, car plus une plaque est épaisse, plus la chaleur au point de soudage est évacuée rapidement ;
* La répartition de la chaleur entre une plaque mince et une plaque épaisse, en préchauffant la plaque la plus épaisse ;
* L’enlèvement de l’humidité en surface ;
* La réduction des contraintes de refroidissement des alliages de coulée, car ils sont plus susceptibles à la fissuration à chaud ;
* Les départs des cordons de soudure qu’il faut éviter d’effectuer lorsque le métal est froid, car on risque d’obtenir de la porosité ou des manques de fusion ou de pénétration ;
* La réduction des contraintes résiduelles ;
* La réduction des distorsions au refroidissement.

Dans tous les cas, il faut éviter de maintenir la température élevée.

Pour les alliages qui contiennent de 2,5 à 5,0 % de Mg, on ne doit pas préchauffer à une température supérieure à 120°C et la température, entre les passes de soudure, ne doit pas excéder 150°C. Si ces alliages sont maintenus à une température entre 150 et 200°C pendant de courtes périodes, leur résistance à la corrosion sous contrainte en est affectée.

On peut aussi vouloir appliquer de la chaleur à des assemblages avant de corriger les distorsions causées par la soudure. Là encore, il faut faire attention de ne pas trop changer les propriétés des alliages; et, ce ne sont pas tous les alliages qui peuvent subir un tel traitement. La référence (36[[45]](#footnote-45)) fournit un tableau à ce sujet pour guider le concepteur. Il faut respecter les recommandations du tableau 17 (voir acétate 77) pour préserver les propriétés des alliages.

### Diapositive 78 :

NR : non recommandé

Les durées maximales à une certaine température, pour le groupe 1 du tableau 17 servent **à prévenir un survieillissement**.

Le groupe 3 est composé de deux catégories. Les alliages qui contiennent peu de magnésium sont relativement insensibles à la température s’ils sont à l’état recuit. Ceux qui, comme on vient de le voir, contiennent de 2,5 à 5,0 % de magnésium sont sensibilisés à la corrosion sous tension lorsque maintenus pendant de courtes périodes à des températures se situant entre 150 et 300°C. C’est pourquoi il n’est pas recommandé de les maintenir à ces températures (voir la sous-section 16.17[[46]](#footnote-46)).

Les alliages du groupe 4 sont vieillis et il n’est pas recommandé de les chauffer à nouveau dans cet état, ce qui entraînerait un survieillissement exagéré. On devrait les travailler à froid, dans l’état recuit, O, ou après mise en solution.

**Tableau 17 – durée maximale de maintien de la température pour les alliages d’aluminium avant correction des déformations**

**Notes :**

1. Une formabilité égale peut être obtenue avec de plus courtes périodes de chauffage à des températures correspondantes plus élevées. La durée de maintien de la température pour les alliages revêtus doit être minimale pour empêcher la diffusion de l’alliage de revêtement dans l’alliage de base. Le chauffage doit être aussi rapide que possible, en particulier pour les températures supérieures à 200°C. Un temps excessif pour atteindre la température requise peut avoir les mêmes effets indésirables que ceux attribuables à une durée de maintien excessive à une température donnée.
2. La diminution de la résistance mécanique pour les alliages à l’état T6 ne sera pas supérieure à 5 % lorsqu’ils sont chauffés à la température indiquée pendant les périodes spécifiées. La résistance en traction des alliages à l’état T4 augmentera.
3. Ces alliages ont été recuits à des températures supérieures à 345°C pour un état O (recuit). Seuls les alliages de pièces coulées spécifiés sont recommandés pour le formage.
4. Voir l’article 5.13.6 de la référence (36[[47]](#footnote-47))

### Diapositive 79 :

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Point_d%27%C3%A9bullition>

Point d'ébullition : on appelle point d'ébullition d'un liquide, pour une pression donnée, la température à laquelle il passe de l'état liquide à l'état gazeux s'il reçoit de la chaleur.

 Le point de condensation désigne le processus inverse, se produisant à la même température, où la vapeur se condense en fournissant de la chaleur

**15.10 Formation de dépôts noirs**

**Le soudage de l’aluminium entraîne parfois la formation de dépôts noirs sur la surface des pièces**, tel qu’illustré sur la figure 49 (voir acétate). Ces dépôts, appelés « SMUT », sont composés de vapeurs de magnésium ou de zinc qui condensent sur la surface. Le point d’ébullition du magnésium est de 1110°C, celui du zinc est de 906°C et celui de l’aluminium est de 2495°C. C’est pourquoi du zinc et du magnésium s’évaporent lors du soudage.

Les dépôts noirs doivent être enlevés entre les passes, car ils peuvent créer des inclusions et appauvrir la soudure. Il faut les enlever le plus tôt possible après le soudage, car plus on attend, plus ils sont tenaces. Pour en réduire la quantité, on peut utiliser un matériau d’apport de la série 4000 (série à base de Silicium) qui ne contient pas de magnésium, contrairement à ceux de la série 5000. On peut aussi souder en poussant, ce qui a pour avantage de produire un meilleur décapage électronique en avant du bain liquide avec l’arc.

**Figure 49 – Formation de dépôts noirs lors du soudage**

# Tenue à la corrosion

### Diapositive 82 :

<https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/geologie-aluminium-metal-exception-780/page/5/>

Au contact de l'humidité de l'environnement ou lors d'une immersion dans l'eau bouillante, la surface externe de la couche d'alumine est hydratée. La perte d'aluminium transformée en produits de corrosion est faible. L'immersion de l'aluminium dans l'eau bouillante est appelée boehmitage (formation de boehmite Al2O3.H2O) et est utilisée industriellement pour améliorer les propriétés de l'aluminium contre la corrosion.

**9. Finition et traitement des surfaces**

**9.1 Introduction**

Si on prétend que l’aluminium résiste bien à la corrosion, pourquoi, alors, cherche-t-on à le protéger? Dans les faits, ce ne sont pas tous les alliages qui offrent une protection naturelle efficace contre la corrosion. Il est bien connu que les alliages au cuivre de la famille 2000 et au zinc de la famille 7000 n’ont pas une tenue suffisante à la corrosion pour être utilisés sans protection dans un milieu humide tel que l’atmosphère ambiante ou, pire, dans un milieu marin.

Un cas célèbre est celui du pont d’Arvida, qui enjambe la rivière Saguenay, à la hauteur de la centrale hydroélectrique de Shipshaw, au Québec. L’alliage utilisé pour ce pont de 152 m est le 2014-T6 qui, au milieu des années 1900, représentait le choix le plus approprié. La principale caractéristique de cet alliage, utilisé surtout en aéronautique, est sa limite élastique élevée. Il a fallu prendre des précautions spéciales pour protéger le pont contre la corrosion lors de la construction, mais cela n’a pas empêché qu’il est fallu intervenir à quelques occasions par après. Par la suite, cet alliage n’a jamais plus été utilisé pour la construction de ponts en aluminium.

C’est pour protéger les avions fabriqués à partir d’alliages des séries 2000 et 7000, que les chimistes ont développé des traitements de surface de l’aluminium, dans les années 1920. C’est au cours de cette période que le procédé d’anodisation a été mis au point.

Les alliages non traitables thermiquement (séries 1000, 3000 et 5000), de même que ceux de la série 6000, traitables thermiquement, ont une bonne tenue à la corrosion au point de pouvoir être utilisés sans protection dans beaucoup de milieux, y compris le milieu marin. Certains bateaux en aluminium ne sont peints dans les parties visibles que dans un seul but décoratif. Les pontons des ports de plaisance et les portiques de signalisation routière ne sont jamais peints. Ce sont pourtant des structures utilisées dans des milieux corrosifs.

Dans le bâtiment, la plupart des applications architecturales de l’aluminium ne supportent pas la moindre corrosion par piqûres ou le moindre ternissement. Puisque l’aspect décoratif est essentiel, il faut protéger l’aluminium destiné au bâtiment par anodisation ou par peinture. Il va de soi que les éléments structuraux utilisés dans le bâtiment ne nécessitent pas de protection contre la corrosion s’ils sont cachés da la vue.

Enfin, il n’est pas recommandé de compter sur un **revêtement** pour protéger l’aluminium lorsqu’il est utilisé dans un milieu qui lui est très hostile. Transporter ou stocker des produits chimiques très agressifs dans une citerne protégée par un revêtement spécial (peinture, polymère, etc.), par exemple, pourrait se traduire par une corrosion localisée qui prendrait des proportions très graves à la moindre défaillance du système de recouvrement. D’ailleurs, le matériel pour le transport et le stockage de produits chimiques, lorsqu’il est en aluminium, n’est presque jamais peint intérieurement.

Il existe quelques techniques pour éviter la corrosion de l’aluminium ou pour lui donner un fini architectural acceptable. On peut soit modifier les propriétés de surface du métal par **boehmitage**, par conversions chimiques, par anodisation ou par placage, soit isoler le métal du milieu extérieur par un revêtement continu (peinture, vernis) ou, encore, modifier les propriétés du milieu par des inhibiteurs.

Le but recherché dans le présent ouvrage n’est pas de faire le tour complet de la question, mais de présenter au concepteur un aperçu des principaux procédés de finition et de traitement des surfaces afin de lui permettre de faire un choix éclairé de produits pour ses applications. Le lecteur qui voudra parfaire ses connaissances sur la corrosion de l’aluminium et les moyens de protection qui y sont associés, est invité à consulter les références (5), (23) et (40)[[48]](#footnote-48).

**9.2 Fini naturel**

Une des caractéristiques les plus intéressantes de l’aluminium est la facilité avec laquelle le métal s’oxyde au contact de l’air. La mince couche d’oxyde, dont l’épaisseur est de l’ordre de **5 à 10 nm**, est invisible, presque complètement imperméable et très résistante aux attaques d’atmosphères corrosives. Cette couche est dure, tenace et fond à une température de 2050°C, en comparaison de 660°C pour l’aluminium sous-jacent. Elle ne s’enlève pas à l’eau et ne tache pas les matériaux adjacents. Dans son état naturel, l’aluminium est brillant au départ, mais prend rapidement des teintes de gris.

Lorsqu’un traitement de surface est requis, on procède généralement à une anodisation ou à l’application d’une couche de peinture. Il y a toutefois un coût à payer pour le traitement lui-même ainsi que pour l’entretien subséquent. De plus, les dimensions des pièces traitées sont limitées à la grosseur des cuves pour l’anodisation ou, si la peinture est appliquée en atelier, à la dimension des chambres ou des fours. **Les cuves d’anodisation peuvent atteindre 10 mètres de longueur, mais dépassent rarement 2,5 mètres de profondeur**. Pour des applications structurales, il est donc préférable d’utiliser l’aluminium avec son fini naturel.

**16. Tenue à la corrosion**

**16.1 Introduction**

On ne peut concevoir d’ouvrage en alliages d’aluminium sans aborder le problème de la corrosion, même s’il est prévu que la structure sera utilisée dans des conditions idéales. Il y a donc un minimum de connaissances que le concepteur doit posséder pour faire un choix judicieux d’alliages et pour éviter de faire des erreurs qui pourraient s’avérer coûteuses.

L’étude de la corrosion est une science complexe qui relève de la métallurgie et de la chimie. Il existe des spécialistes du domaine qui se font un devoir d’assister le concepteur d’ouvrages dans ses choix ou de lui fournir une expertise lorsque vient le temps d’évaluer des dommages. Dans la présente section, les buts poursuivis sont de transmettre à l’étudiant en génie suffisamment d’informations pour qu’il puisse connaître ce qu’est la corrosion de l’aluminium, et d’amener l’ingénieur concepteur à un niveau de connaissances lui permettant de bien évaluer les problèmes auxquels il risque d’être confronté. Le traitement sera donc assez superficiel et le contenu sera emprunté à quelques excellents ouvrages sur le sujet.

**16.2 Principaux paramètres**

La tenue à la corrosion des alliages d’aluminium dépend d’une multitude de paramètres :

* la composition, l’état métallurgique et l’état de surface des alliages eux-mêmes ;
* les caractéristiques du milieu dans lequel ils sont exposés (milieu marin, humide, urbain, agricole, industriel, minier, etc.) ;
* les conditions de service prévues (bâtiment, ouvrage d’art, véhicule, aéronef, navire, équipement) ;
* les dispositions constructives (assemblages, contact avec d’autres métaux ou matériaux) ;
* la durée de l’ouvrage ;
* la fréquence et le type d’entretien.

Ces paramètres sont tous très importants, et ce n’est qu’en analysant chaque cas en particulier qu’on est en mesure d’évaluer lesquels sont susceptibles de l’être davantage.

### Diapositive 83 :

Couche d’oxyde : Très avide d’oxygène, l’aluminium possède une couche naturelle d’alumine d’épaisseur de 0.1 à 0.01 µm.

<https://www.alu-stock.es/fr/informations-techniques/anodisation/>

Pour se protéger de l'effet des agents atmosphériques, l’aluminium se recouvre naturellement d’une fine pellicule d’oxyde. L’épaisseur plus ou moins régulière de cette couche d’Al2O3 est de l'ordre de 0,01 micron sur le métal qui vient d’être décapé et peut atteindre 0,2 ou 0,4 micron sur le métal étant passé par un four à recuire.

Pour pouvoir souder, cette couche doit d'abord être éliminée au moyen de procédés chimiques ou mécaniques.

Il est possible de créer de façon artificielle des pellicules d’oxyde beaucoup plus épaisses, dont les caractéristiques sont différentes de celles de la couche naturelle, plus protectrices, à l’aide de procédés chimiques et électrolytiques. Le processus d'anodisation permet de former des couches dont l’épaisseur peut, selon les souhaits, mesurer de quelques microns à 25/30 microns dans les traitements de protection ou de décoration, et atteindre 100 microns, voire plus, à travers des processus de durcissement superficiel, autrement dit l'anodisation dure.

**16.3 Couche d’oxyde naturelle**

Comme nous l’avons vu à la sous-section 9.2[[49]](#footnote-49), l’aluminium a la propriété de s’oxyder au contact de l’air et de former, sur toute sa surface, une mince couche d’oxyde qui le rend passif à l’environnement, c’est-à-dire imperméable aux attaques d’atmosphères corrosives. La bonne tenue à la corrosion de l’aluminium et de ses alliages, est due à la présence permanente, sur le métal, de cette couche d’oxyde d’aluminium, communément appelée alumine. Ce film se forme dès que le métal est mis au contact **d’un milieu oxydant, tel l’air ou l’eau**, et il se reforme instantanément après des opérations de mise en forme ou de soudage.

La stabilité physico-chimique de l’alumine a donc une très grande importance dans la résistance à la corrosion de l’aluminium. Elle dépend, en particulier, des caractéristiques du milieu, donc le pH, ainsi que de la nature de l’alliage.

<https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/geologie-aluminium-metal-exception-780/page/5/>

**Le comportement de l'aluminium à la corrosion**

Il dépend des propriétés de surface et des couches qui sont à proximité.
Malheureusement, les surfaces d'aluminium ne sont pas parfaites.

* **Défauts créés lors de la fabrication** ou de la manipulation tels que : rayures, macro-rugosité (ex : traces de [laminage](https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-laminage-3517/)), calamine ou [lubrifiants](https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-lubrifiant-15328/)
* **Défauts liés à la microstructure** tels que : joints de grains intermétalliques

La surface occupée par de tels défauts est faible 0,2% de la surface est touchée ; mais elle est importante pour les performances contre la corrosion et la [durée](https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-duree-14966/) de vie. Le comportement [physique](https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-physique-15839/), chimique et électrochimique de tels défauts est différent de celui de la surface macroscopique de l'aluminium.

### Diapositive 84 :

V: vitesse de dissolution

Log V =-1,

donc : $V = 10^{-1} = 0.1$,

et si : $Log V =-3$,

donc $: V = 10^{-3} = 0,001$

Plus souvent, le pH mesure l’acidité ou la basicité d’une solution. Ainsi, dans un milieu aqueux [qui contient de l’eau] à 25 °C :

* une solution de pH = 7 est dite neutre ;
* une solution de pH < 7 est dite [acide](https://fr.wikipedia.org/wiki/Acide) ; plus son pH diminue, plus elle est acide ;
* une solution de pH > 7 est dite [basique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Base_%28chimie%29) ; plus son pH augmente, plus elle est basique.

[Acide chlorhydrique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Acide_chlorhydrique) (1 mol/L) pH = 0

[Jus de citron](https://fr.wikipedia.org/wiki/Jus_de_citron) pH = 2,4 – 2,6

[Eau](https://fr.wikipedia.org/wiki/Eau) pure pH = 7,0

[Eau de Javel](https://fr.wikipedia.org/wiki/Eau_de_Javel) pH = 11,5

[Soude caustique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Hydroxyde_de_sodium) pH = 14,0

**16.4 Influence de pH**

La vitesse de dissolution du film d’oxyde dépend du pH, tel qu’illustré sur la figure 50 (voir acétate). Elle est très forte en milieu acide et en milieu alcalin, mais elle est faible dans les milieux proches de la neutralité, soit pour des valeurs de pH oscillant entre 5 et 9. Les eaux naturelles de rivières et de pluie ont un pH voisin de 7, alors que l’eau de mer a un pH de l’ordre de 8. Le film d’oxyde est donc stable dans ces milieux, ce qui explique la grande longévité constatée, à ce jour, des toitures, bardages, matériel de signalisation routière, etc., en alliages d’aluminium non protégés, exposés aux intempéries.

Pour prendre en compte la tenue à la corrosion de l’aluminium dans un milieu aqueux, il faut, de plus, s’attarder à la nature de l’acide, de la base ou des sels dissous. Les hydracides, tels que l’acide chlorhydrique ((HCL) PH < -1), attaquent fortement l’aluminium. La vitesse d’attaque augmente avec la concentration. Par contre, l’acide nitrique (HNO3 : est un acide fort = c’est un acide qui réagit entièrement avec l’eau) concentré n’a pas d’action sur l’aluminium. Par sa fonction oxydante, il contribue même à renforcer très légèrement la couche d’oxyde naturel. Il est d’ailleurs utilisé, en concentration supérieure à 50 %, pour le décapage de l’aluminium.

**Figure 50 – Vitesse de dissolution de l’alumine en milieu aqueux en fonction du pH**

En milieu alcalin, la soude caustique, même à faible concentration, attaque l’aluminium alors que les solutions d’ammoniaque, à pH identique, n’ont qu’une action très modérée sur l’aluminium.

### Diapositive 85 :

**16.5 Formes de corrosion**

La corrosion de l’aluminium peut se manifester sous plusieurs formes, plus ou moins visibles à l’œil nu. Les formes les plus courantes sont :

* la corrosion généralisée (ou uniforme) ;
* la corrosion par piqûres ;
* la corrosion transcristalline et la corrosion intercristalline ;
* la corrosion feuilletante ;
* la corrosion sous contrainte ;
* la corrosion filiforme ;
* la corrosion à la ligne d’eau ;
* la corrosion sous dépôt (ou caverneuse) ;
* l’érosion ;
* la corrosion galvanique.

Il convient de noter qu’il n’y a pas de forme de corrosion spécifique à l’aluminium et à ses alliages.

Chacune de ces formes de corrosion fera l’objet d’une courte présentation. On insistera davantage sur la corrosion galvanique puisqu’elle a plusieurs incidences sur les charpentes et les structures en aluminium.

### Diapositive 87 :

**16.6 La corrosion généralisée**

C’est dans les milieux de pH très acides ou très alcalins, comme le montre la figure 50 (voir acétate 83), que se développe cette forme de corrosion. Elle se traduit par une diminution régulière et uniforme de l’épaisseur de toute la surface du métal. La vitesse de dissolution peut varier de quelques micromètres par an, dans un milieu non agressif, à plusieurs micromètres par heure, selon la nature de l’acide ou de l’hydroxyde en solution.

En milieu humide, exposé aux intempéries, dans les eaux de surface ou de mer, où le pH est voisin de la neutralité, la corrosion constatée est **généralement uniforme**. Ainsi, sur du 1050-H24 immergé dans l’eau de mer, elle est de **l’ordre du micromètre par an**.

On peut facilement déterminer la vitesse de corrosion généralisée par la mesure de la perte de poids ou par celle du dégagement d’hydrogène. C’est une donnée utile pour connaitre la vitesse de dissolution de l’aluminium dans les bains de décapage.

### Diapositive 88 :

<https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/geologie-aluminium-metal-exception-780/page/5/>

**Le comportement de l'aluminium à la corrosion**

Il dépend des propriétés de surface et des couches qui sont à proximité.
Malheureusement, les surfaces d'aluminium ne sont pas parfaites.

* **Défauts créés lors de la fabrication** ou de la manipulation tels que : rayures, macro-rugosité (ex : traces de [laminage](https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-laminage-3517/)), calamine ou [lubrifiants](https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-lubrifiant-15328/)
* **Défauts liés à la microstructure** tels que : joints de grains intermétalliques

La surface occupée par de tels défauts est faible 0,2% de la surface est touchée ; mais elle est importante pour les performances contre la corrosion et la [durée](https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-duree-14966/) de vie. Le comportement [physique](https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-physique-15839/), chimique et électrochimique de tels défauts est différent de celui de la surface macroscopique de l'aluminium.

**16.7 La corrosion par piqûres**

Comme tous les métaux dont la résistance à la corrosion est liée à la présence d’une couche passive, l’aluminium est sensible à la corrosion par piqûres.

La corrosion par piqûres se développe sur des sites où le film d’oxyde naturel présente des défauts provoqués par diverses causes qui peuvent être liées **aux éléments d’addition, aux conditions de mise en œuvre**, etc.

L’expérience montre que **les zones meulées, rayées lors des opérations de mise en forme ou de soudage**, sont des niches où les piqûres ont tendance à se développer dès les premières semaines de mise en service, au contact d’un milieu humide. La corrosion par piqûres est un phénomène très complexe dont le mécanisme n’est pas encore aujourd’hui totalement connu. On connaît toutefois les conditions dans lesquelles elle se forme et se propage.

C’est dans les milieux aqueux, dont le pH est voisin de la neutralité, c’est-à-dire tous les milieux naturels incluant les eaux de distribution et l’eau de mer, que l’aluminium est sensible à la corrosion par piqûres. Le mécanisme de la propagation des piqûres est de nature électrochimique (voir la sous-section 16.15[[50]](#footnote-50)).

La corrosion par piqûres de l’aluminium se traduit par la formation de cavités dans le métal, généralement recouvertes de pustules blanches d’alumine hydratée gélatineuse Al(OH)3, très volumineuses. Le volume de la pustule est bien plus important que celui de la cavité sous-jacente, tel qu’illustré sur la figure 51 (voir acétate).

**Figure 51 – Corrosion par piqûres de l’aluminium**

Le produit de la corrosion, soit l’hydroxyde de d’aluminium ou, tout simplement l’alumine, contient beaucoup d’eau quand il est de formation récente. La perte de poids de l’alumine peut atteindre 60 % après calcination à 1000°C. L’alumine se présente sous la forme **d’une substance blanche gélatineuse recouvrant les piqûres de corrosion. Après plusieurs semaines à l’air, une partie de l’eau s’est évaporée et l’alumine prend l’aspect d’une poudre blanche**. Sèche ou non, l’alumine adhère bien à la surface du métal.

Le diamètre et la profondeur des piqûres dépendent d’un grand nombre de facteurs relatifs au métal, aux dispositions constructives, au milieu et aux conditions de service.

### Diapositive 89 :

Il importe de savoir que la corrosion par piqûres n’est pas un phénomène inéluctable dès lors que le métal est exposé aux intempéries ou à l’humidité. Ce qui importe, pour l’utilisateur, c’est de connaître la vitesse d’approfondissement des piqûres dès qu’elles apparaissent. **L’expérience montre que la vitesse de corrosion par piqûres de l’aluminium décroît rapidement dans la plupart des milieux**. Sur des bâtiments ou des équipements de littoral, etc., des observations faites sur l’aluminium non protégé dans la plupart des atmosphères, confirment les résultats obtenus en laboratoire ou en exposition en station de corrosion (figure 52 – voir acétate) pendant une longue durée. **La profondeur des piqûres formées pendant les premiers mois de service, n’évolue généralement plus par la suite.**

Quand les produits en aluminium sont stockés à l’extérieur ou dans un local humide, ils peuvent subir, dans les premières semaines de stockage, une corrosion superficielle par piqûres. Le plus souvent, il s’agit de micropiqûres dont la **profondeur dépasse rarement quelques centièmes de millimètre**, après plusieurs mois de stockage, même en atmosphère marine ou très humide. Cette corrosion n’est pas, par la suite, un facteur accélérateur ou aggravant d’une corrosion ultérieure en service. Elle est souvent associée à un noircissement de la surface du métal. Il faut toutefois noter que si ces micropiqûres superficielles peuvent être masquées par une peinture, elles seront, par contre, visibles après un traitement de surface de type conversion ou anodisation.

**Figure 52 – Exposition en bord de mer d’alliages des séries 3000, 5000 et 6000**

### Diapositive 90 :

**16.8 La corrosion transcristalline et la corrosion intercristalline**

La corrosion à l’intérieur du métal, à l’échelle du grain, peut se présenter de deux manières différentes :

* dans toutes les directions (figure 53a – voir diapositive) : la corrosion affecte indifféremment tous les constituants métallurgiques. Il n’y a pas de corrosion sélective; c’est la corrosion trancristalline, ainsi appelée parce qu’elle progresse à l’intérieur des grains ;
* suivant des chemins préférentiels (figure 53b[[51]](#footnote-51)) : c’est la corrosion intercristalline, ainsi appelée parce qu’elle progresse le long des joints de grains.

Cette dernière forme de corrosion n’est pas décelable à l’œil nu. Quand elle pénètre profondément, elle réduit les caractéristiques mécaniques, en particulier l’allongement, et elle peut même provoquer des ruptures de pièces. C’est parce qu’il existe une différence de potentiel entre les joints et la masse du grain, que la corrosion intercristalline progresse préférentiellement le long des joints de grains. Cette différence de potentiel est due à la présence, dans le joint de grain, d’une précipitation continue de composés intermétalliques dont le potentiel de dissolution est très nettement différent de celui de la matrice, d’au moins 100mV (voir la sous-section 16.15[[52]](#footnote-52), tableau 19[[53]](#footnote-53) et 20[[54]](#footnote-54)).

Cette forme de corrosion concerne presque exclusivement les alliages traités thermiquement et, plus particulièrement, ceux des séries 2000 et 7000 quand, à la suite de traitements thermiques mal faits, ils sont sensibilisés par des précipitations incontrôlées aux joints de grains. La corrosion intercristalline des alliages traités thermiquement peut être maîtrisée par des conditions de traitements thermiques appropriées : vitesse de trempe rapide, revenu prolongé pour les 2000 et double revenu pour les 7000.

Les normes imposent, pour certains alliages et certaines applications, des tests destinés à détecter la sensibilité à ces formes de corrosion.

**Figure 2.53 – Exemples de corrosions transcristalline et intercristalline**

### Diapositive 91 :

**16.9 La corrosion feuilletante**

La corrosion feuilletante est une forme de corrosion **sélective** qui se propage suivant une multitude de plans parallèles à la direction du laminage ou du filage. Entre ces plans, subsistent des feuillets de métal non atteintes, très minces, qui sont repoussées de la surface du métal par le gonflement des produits de corrosion et s’en écartent comme les feuillets d’un livre d’où le nom donné à cette forme de corrosion (figure 54[[55]](#footnote-55)).

**Figure 54 – Exemples de corrosion feuilletante**

La corrosion feuilletante se produit sur du **métal très écroui**, **ayant des grains très aplatis résultant du laminage ou du filage**. Elle dépend aussi des traitements thermiques.

Les alliages de la série 5000 peuvent être affectés par cette forme de corrosion. Dans les états habituellement utilisés (O, H111, H116, H22, H24), ils n’y sont généralement pas sensibles. Les états T76, pour les alliages de la série 7000, et H321, pour ceux de la série 5000, correspondent à des gammes de transformations visant à livrer un état désensibilisé à la corrosion feuilletante.

### Diapositive 92 :

**16.10 La corrosion sous contrainte**

Cette forme de corrosion résulte de l’action combinée d’une contrainte mécanique (flexion, traction, **contraintes internes résiduelles dues à la trempe**) et d’un milieu corrosif (environnement humide plus ou moins chargé de chlorures). Chacun des paramètres, contrainte et milieu corrosif, agissant seul, n’aurait pas des effets aussi importants, voire pas d’effet du tout, sur la tenue du métal. **La corrosion sous contrainte peut aboutir à des ruptures de pièces en service**.

Les mécanismes de la corrosion sous contrainte ont fait l’objet de nombreuses études, étant donné l’importance du phénomène. Ils sont si complexes qu’une théorie générale semble difficile, sinon impossible à établir.

La propagation des fissures de corrosion sous contrainte **se fait toujours le long des joints de grains**. On considère qu’il y a deux mécanismes possibles pour expliquer la corrosion sous contrainte des alliages d’aluminium : la propagation électrochimique et la fragilisation par l’hydrogène. La figure 55 (voir acétate) présente un exemple de fissure de corrosion sous contrainte résultant de la propagation électrochimique.

**Figure 55 : Exemple de fissure de corrosion sous contrainte**

Les alliages à hautes caractéristiques mécaniques, notamment ceux des séries 2000 et 7000, peuvent être sensibles à la corrosion sous contrainte. L’influence des traitements thermiques est importante. La vitesse de trempe, par exemple, doit être aussi élevée que possible.

### Diapositive 93 :

Les plaques épaisses écrouies représentent un cas particulier. La corrosion sous contrainte ayant une propagation intercristalline, la sensibilité à ce type de corrosion n’est donc pas la même dans les trois directions par rapport au sens du laminage. Le laminage oriente en effet les grains dans le sens de la transformation. Comme l’indique la figure 56a (voir acétate), il faut distinguer le sens long, travers long et travers court. **La résistance à la corrosion sous contrainte** des produits épais laminés (ou filés) dépend donc du sens du prélèvement des éprouvettes. Elle **est toujours plus faible dans le sens travers court** que dans les deux autres directions, comme l’illustre schématiquement la figure 56b (voir acétate).

**Figure 56 – Influence du sens de prélèvement sur la résistance à la corrosion sous contrainte**

### Diapositive 94 :

**16.11 La corrosion filiforme**

La corrosion filiforme est une forme de corrosion **spécifique aux métaux peints**. C’est avant tout une corrosion d’aspect, le métal sous-jacent ne subissant qu’une attaque très superficielle. Elle se développe **sous forme de filaments étroits**, **de 0,1 à 0,5 mm de largeur et de quelques millimètres de longueur**, lesquels se propagent **à l’interface métal-peinture**. Le gonflement des produits de corrosion déforme la couche de peinture et fait apparaître des fils très fins dans qui cheminent en galerie de taupe sous la peinture.

Cette forme de corrosion est observée sur les alliages à hautes résistances mécaniques dans les applications aéronautiques ainsi que sur les tôles et les profilés en alliages d’aluminium des séries 3000, 5000 et 6000, recouverts d’un laquage par poudrage électrostatique.

La corrosion filiforme se développe sur du métal qui n’a pas reçu de préparation de surface ou dont la préparation a été mauvaise, ou encore, lorsque la surface a été polluée avant l’application de la peinture.

### Diapositive 95 :

**16.12 La corrosion à la ligne d’eau**

On a souvent constaté que lorsque des structures métalliques sont à demi immergées dans l’eau, il se forme une corrosion plus intense localisée dans la partie immergée, juste au-dessous de la limite air-eau. Cela est causé par la différence d’aération entre la surface du liquide et la zone située immédiatement au-dessous. Il d’agit d’une corrosion par différence d’aération.

L’expérience montre que sur une structure en aluminium semi-immergée dans l’eau de mer, il peut y avoir une corrosion à la ligne d’eau sous forme de piqûres superficielles de quelques dixièmes de millimètre de profondeur et relativement disséminées. C’est ce qu’on peut observer, à l’occasion, sur une coque de barge ou sur des installations maritimes en aluminium non peint. Dans de très nombreux cas, aucune trace de ce type de corrosion n’a été observée.

### Diapositive 96 :

**16.13 La corrosion sous dépôt**

La corrosion sous dépôt, aussi appelée corrosion caverneuse, est une corrosion localisée dans les recoins, sous les dépôts, là où l’eau ou l’humidité pénètre et ne se renouvelle pas, comme dans l’exemple montré sur la figure 57 (voir acétate). La corrosion sous dépôt progresse généralement peu, sans doute à cause de la formation de l’alumine qui colmate rapidement l’entrée du recoin. L’acier inoxydable, dans les mêmes conditions, est plus sensible que l’aluminium à la corrosion sous dépôt. On constate souvent, lors du démontage d’un assemblage de tôles en aluminium rivetées ou visées, ayant séjourné très longtemps sous l’eau, la présence d’un dépôt continu d’alumine entre les deux tôles. Il faut néanmoins éviter, autant que possible, de laisser dans les assemblages des recoins qui peuvent devenir des niches à corrosion. En particulier, on évitera les soudures discontinues.

**Figure 57 – Exemple de corrosion sou dépôt**

### Diapositive 97 :

**16.14 L’érosion**

La corrosion par érosion se produit lorsqu’un fluide est en mouvement. Cette forme de corrosion est liée à la vitesse de passage du fluide. Elle se caractérise par un amincissement local du métal, qui prend la forme de rayures, de ravinements, d’ondulations, toujours orientés dans la même direction, celle de l’avancement du fluide.

L’expérience des **échangeurs tubulaires** en alliages d’aluminium des familles 3000, 5000 et 6000, pour le dessalement de l’eau de mer, montre que l’aluminium supporte sans corrosion-érosion des vitesses de passage de l’ordre de 2,5 à 3 m/s, à des températures allant jusqu’à 130°C. Ce sont des vitesses habituelles pour des installations industrielles. Des essais dans l’eau distillée, à 100°C, montrent que l’érosion de l’aluminium commence à des vitesses de passage de l’ordre de 12 à 15 m/s.

**L’aluminium n’exige pas de précautions particulières pour éviter la corrosion-érosion et ne requiert que celles que l’on prend habituellement avec les autres métaux.**

**L'eau distillée** est une eau qui a subi une distillation, donc est théoriquement exempte de certains sels minéraux et organismes que l'on pourrait retrouver dans **l'eau** « naturelle ». Elle contient idéalement des molécules H2O, des gaz dissous comme O2 et CO2. **Elle est qualifiée d'eau purifiée**.

### Diapositive 98 :

<https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89lectron%C3%A9gativit%C3%A9>

En [chimie](https://fr.wikipedia.org/wiki/Chimie), l'**électronégativité** d'un [élément](https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89l%C3%A9ment_chimique) est une grandeur qui **caractérise sa capacité à attirer les** [**électrons**](https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89lectron)lors de la formation d'une [liaison chimique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Liaison_chimique) avec un autre élément. La différence d'électronégativité entre ces deux éléments détermine la nature de la [liaison covalente](https://fr.wikipedia.org/wiki/Liaison_covalente) :

* liaison **apolaire** lorsque la différence est nulle,
* liaison **polaire** quand la différence n'est pas nulle,
* liaison **ionique** quand la différence est tellement forte qu'un des éléments a attiré complètement les électrons: les atomes sont devenus **des ions** et portent des charges électriques entières.

La notion d'électronégativité, qui décrit le comportement des électrons dans une liaison chimique, ne doit pas être confondue avec celle d'[affinité électronique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Affinit%C3%A9_%C3%A9lectronique).

**16.15 La corrosion galvanique**

**16.15.1 Notion de potentiel**

Le potentiel est une donnée thermodynamique qui mesure l’aptitude à l’oxydation d’un métal. Plus le potentiel est électronégatif, plus le métal a tendance à s’oxyder, donc à se corroder. Le potentiel se mesure par rapport à **une électrode de référence, dans un milieu bien défini, en général une solution très conductrice dont la composition peut être normalisée**. La solution peut aussi bien être de l’eau de mer naturelle.

Les potentiels standards mesurés par **rapport à l’hydrogène** n’ont qu’un intérêt théorique. **Ils ne concernent que les métaux purs et non les alliages**, et ne tiennent pas compte des phénomènes de passivité éventuels, comme on le voit bien avec celui de l’aluminium. Le potentiel standard de l’aluminium pur est très électronégatif et égal à – 1660 mV, comparé à celui du fer à – 440 mV. L’aluminium étant plus électronégatif, il se consomme au profit du fer, en contact avec ce dernier.

**Les potentiels standards n’ont qu’un intérêt relatif pour le corrosionniste**, qui leur préfère les potentiels de dissolution (ou potentiels de corrosion). Il existe, pour les métaux usuels, des échelles de potentiel, telle celle du tableau 18 (voir acétate 98).

**Tableau 18 – Potentiels de dissolution (mV ECS) dans l’eau de mer naturelle ne mouvement à 25°C (Électrode au calomel saturé, ECS)**

### Diapositive 99 :

Les potentiels de dissolution permettent de classer les métaux les uns par rapport aux autres et cela est utile pour prévoir la possibilité de corrosion galvanique dans le cas d’assemblages hétérogènes. On constate, dans le tableau 18, que l’aluminium est un des métaux les plus électronégatifs. Seuls le zinc et le magnésium le sont davantage. **Ce sont les métaux les moins nobles. À l’autre extrémité de l’échelle, on trouve les métaux nobles dont le potentiel est positif**. **L’or et l’argent, qui ne figurent pas sur le tableau 18, sont fortement électropositifs**. C’est la raison pour laquelle ils sont moins susceptibles de se corroder.

Le classement dans une échelle de potentiel de dissolution permet donc de prévoir lequel des deux métaux, en cas de contact dans un milieu aqueux, peut être attaqué, si les conditions s’y prêtent. C’est celui qui est le plus électronégatif, si tous deux ont un potentiel électronégatif. L’expérience montre que la corrosion galvanique ne se produit que si les deux métaux en contact ont une différence de potentiel d’au moins 100 mV, ce qui est le cas pour l’aluminium et l’acier.

### Diapositive 100 :

<https://www.youtube.com/watch?v=PYuucXAzwco&t=156s>

<https://www.youtube.com/watch?v=QQUeLNqmQBs>

<https://www.youtube.com/watch?v=Qk8QBM9u12k>

### Diapositive 101 :

**16.15.2 Potentiels de dissolution des alliages d’aluminium**

Les éléments d’alliage peuvent modifier le potentiel de l’aluminium en plus ou en moins. Le zinc abaisse fortement le potentiel. C’est pourquoi on utilise l’alliage 7002, à 1 % de zinc, comme placage du 3003 (pour le protéger. Le 7002 joue le rôle d'un matériau sacrificiel). Les alliages de la famille 7000 ont les potentiels les plus électronégatifs, comme peut le voir dans le tableau 19 (voir acétate). Ce sont les alliages au cuivre de la famille 2000 qui ont les potentiels les moins électronégatifs, ce qui permet de protéger le 2017A par un placage en 1050A (pour protéger le 2017A, le 1050A joue le rôle d'un matériau sacrificiel).

Bien que les intermétalliques (précipités) puissent avoir un potentiel de dissolution assez différent de celui de la solution solide (tableau 20 – voir acétate 101), ils n’ont pas d’influence sur le potentiel de dissolution. Par contre, ils peuvent provoquer une corrosion intercristalline (sous-section 16.8[[56]](#footnote-56)), une corrosion feuilletante (sous-section 16.9[[57]](#footnote-57)) ou une corrosion sous contrainte (sous-section 16.10[[58]](#footnote-58)), s’ils sont regroupés aux joints de grains ou à proximité.

**Tableau 19 – Potentiels de dissolutions des alliages d’aluminium**

**Tableau 20 – Potentiels de dissolution des intermétalliques**

### Diapositive 102 :

Bien que les intermétalliques (précipités) puissent avoir un potentiel de dissolution assez différent de celui de la solution solide (tableau 20), ils n’ont pas d’influence sur le potentiel de dissolution. Par contre, ils peuvent provoquer une corrosion intercristalline (sous-section 16.8), une corrosion feuilletante (sous-section 16.9) ou une corrosion sous contrainte (sous-section 16.10), s’ils sont regroupés aux joints de grains ou à proximité.

**Tableau 19 – Potentiels de dissolutions des alliages d’aluminium**

**Tableau 20 – Potentiels de dissolution des intermétalliques**

### Diapositive 103 :

**16.15.3 L’aluminium et la corrosion galvanique**

De par sa position dans l’échelle des potentiels (tableau 18- Potentiels de dissolution (mV ECS) dans l’eau de mer naturelle en mouvement à 25 °C (Électrode au calomel saturé, ECS), l’aluminium est plus électronégatif que la plupart des métaux usuels tels que les aciers, les aciers inoxydables, les alliages cuivreux, etc. Que ce soit dans les applications mécaniques, dans le bâtiment, dans les constructions électriques, etc., il est fréquent de trouver des assemblages hétérogènes faits de contacts entre une pièce en aluminium et d’autres métaux ou alliages.

La crainte de la corrosion galvanique de l’aluminium fut, pendant longtemps, une préoccupation majeure pour les utilisateurs, au point d’avoir freiné le développement des applications des alliages d’aluminium dès lors que se posait la question de leur comportement en présence d’un autre métal. L’expérience acquise dans tous les domaines a permis de mieux évaluer les risques de corrosion galvanique en fonction des métaux et des alliages en contact, des applications et des milieux. On est aujourd’hui surpris de voir, avec quel luxe de précautions, on traitait autrefois les contact hétérogènes exposés à l’atmosphère ambiante.

**Tableau 19 – Potentiels de dissolutions des alliages d’aluminium**

**Tableau 20 – Potentiels de dissolution des intermétalliques**

Il a fallu réévaluer le risque de corrosion galvanique et abandonner certains présupposés classiques, fondés le plus souvent sur des essais de laboratoire peu représentatifs de la réalité des applications, en particulier dans le milieu marin. On peut aborder ce sujet difficile d’une autre manière, fondée sur l’expérience mais, préalablement, il faut rappeler quelques principes de base.

**16.15.4 Principes de la corrosion galvanique**

Dès que deux métaux ou alliages de nature différente sont en contact direct, ou reliés électriquement par des boulons, dans un milieu humide et conducteur, par exemple l’eau de mer ou une solution saline, l’un des deux métaux peut se consommer, tandis que l’autre conserve son intégrité. Il peut même être protégé. C’est le cas classique du couple cuivre/zinc qui, en présence d’un électrolyte, forme une pile (figure 58 – voir acétate).

**Figure 58 – Principe d’une pile**

Pour qu’une pile fonctionne, il faut que trois conditions soient simultanément réunies :

* **présence d’un électrolyte :** la zone des contacts doit être mouillée. La corrosion galvanique est d’autant plus forte que le milieu est plus conducteur. Elle sera donc plus intense dans une solution saline, à fortiori dans l’eau de mer, dont la résistivité est de quelques ohms centimètre, que dans l’eau de distribution ou l’eau de pluie dont les résistivités sont de plusieurs milliers d’ohms centimètre, 2000 à 3000, selon les eaux. Réciproquement, en l’absence de liquide aqueux mouillant la zone des contacts, il n’y a pas de possibilité de corrosion galvanique entre deux métaux de nature différente.
* **continuité électrique entre les deux métaux :** elle peut être réalisée soit par contact direct des deux métaux, soit par une liaison entre les deux métaux, comme des vis ou des boulons d’assemblage, par exemple. En conséquence, l’un des moyens pour éviter une éventuelle corrosion galvanique est d’isoler, aussi soigneusement que possible, les deux métaux en contact. C’est la technique la plus pratique et la plus couramment employée. Il suffit d’interposer une forte résistance ohmique entre eux, c’est-à-dire un isolant, tels une couche de peinture, du néoprène ou tout autre polymère adéquat. La figure 59 (voir acétate 103) montre comment deux pièces de matériaux différents peuvent être isolées adéquatement.
* **métaux de natures différentes :** c’est ici qu’intervient la notion de potentiel de dissolution (voir plus haut).

### Diapositive 104 :

**16.15.4 Principes de la corrosion galvanique**

Dès que deux métaux ou alliages de nature différente sont en contact direct, ou reliés électriquement par des boulons, dans un milieu humide et conducteur, par exemple l’eau de mer ou une solution saline, l’un des deux métaux peut se consommer, tandis que l’autre conserve son intégrité. Il peut même être protégé. C’est le cas classique du couple cuivre/zinc qui, en présence d’un électrolyte, forme une pile (figure 58 – voir acétate 102).

**Figure 58 – Principe d’une pile**

Pour qu’une pile fonctionne, il faut que trois conditions soient simultanément réunies :

* **présence d’un électrolyte :** la zone des contacts doit être mouillée. La corrosion galvanique est d’autant plus forte que le milieu est plus conducteur. Elle sera donc plus intense dans une solution saline, à fortiori dans l’eau de mer, dont la résistivité est de quelques ohms centimètre, que dans l’eau de distribution ou l’eau de pluie dont les résistivités sont de plusieurs milliers d’ohms centimètre, 2000 à 3000, selon les eaux. Réciproquement, en l’absence de liquide aqueux mouillant la zone des contacts, il n’y a pas de possibilité de corrosion galvanique entre deux métaux de nature différente.
* **continuité électrique entre les deux métaux :** elle peut être réalisée soit par contact direct des deux métaux, soit par une liaison entre les deux métaux, comme des vis ou des boulons d’assemblage, par exemple. En conséquence, l’un des moyens pour éviter une éventuelle corrosion galvanique est d’isoler, aussi soigneusement que possible, les deux métaux en contact; c’est la technique la plus pratique et la plus couramment employée. Il suffit d’interposer une forte résistance ohmique entre eux, c’est-à-dire un isolant, tels une couche de peinture, du néoprène ou tout autre polymère adéquat. La figure 59 (voir acétate) montre comment deux pièces de matériaux différents peuvent être isolées adéquatement.
* **métaux de natures différentes.** C’est ici qu’intervient la notion de potentiel de dissolution (voir plus haut).

**Figure 59 – Isolement entre l’aluminium et un autre métal**

Contrairement aux autres formes de corrosion structurale, la corrosion galvanique est indépendante de la texture du métal, de son état métallurgique, de la présence d’une couche anodique, etc. Cette corrosion est très localisée dans la zone de contact entre les métaux. Tous les alliages d’aluminium peuvent en subir les effets. En plus, il peut y avoir une corrosion intercristalline et feuilletante sur les alliages de familles 2000, 5000, 6000 et 7000, s’ils y sont sensibles.

### Diapositive 105 :

**16.15.5 Aspects pratiques de la corrosion galvanique**

Deux facteurs très importants sont à prendre en compte dans l’analyse des risques de corrosion galvanique de l’aluminium : l’assemblage hétérogène qui est ou qui n’est pas immergé et la nature du métal avec lequel l’aluminium est en contact.

**L’assemblage hétérogène est immergé (ou enterré) :** compte tenu de ce qui a été dit précédemment, il est nécessaire d’isoler les deux métaux en présence pour éviter une éventuelle corrosion de l’alliage d’aluminium. Dans de telles conditions, tous les couples de corrosion galvanique fonctionnent, y compris avec l’acier inoxydable. Quel que soit le métal avec lequel l’aluminium est en contact, il faut neutraliser le couple pour éviter la corrosion galvanique inéluctable de l’aluminium.

Il y a quelques moyens possibles :

* interposer un joint isolant en élastomère entre les deux métaux (figure 59 – voir acétate 103) ;
* peindre la zone des contacts, en prenant soin de s’assurer que la gamme de peinture est compatible avec le milieu et vérifier régulièrement l’état de la peinture. Il est préférable de peindre la surface cathodique ;
* utiliser, quand cela est possible, des vis ou des boulons en alliages d’aluminium, de préférence de la famille 6000, réduit le risque de corrosion galvanique et simplifie le montage lorsqu’on assemble du matériel en alliages d’aluminium ;
* adopter une méthode largement utilisée, en construction navale, qui consiste à neutraliser les couples galvaniques avec une anode sacrificielle, généralement en zinc, en magnésium ou en alliage d’aluminium spécial. Les anodes ne doivent pas être peintes et doivent être régulièrement visitées pour s’assurer de leur bon fonctionnement et pour les renouveler. En eau de mer, de telles anodes sont efficaces jusqu’à 10 m de distance entre elles, mais il ne faut pas s’attendre à de bons résultats en eau douce.

**L’assemblage hétérogène n’est pas immergé (ou enterré) :** il peut n’être mouillé qu’épisodiquement : c’est le cas le plus fréquent. Plusieurs aspects sont alors à considérer :

* le caractère intermittent du phénomène, lié aux conditions atmosphériques puisqu’il faut de l’humidité ;
* la localisation de la corrosion galvanique autour de la zone des contacts. Elle ne pourra se développer que sur les endroits mouillés lors des intempéries ;
* la très faible intensité de la corrosion galvanique, si celle-ci se développe, compte tenu du milieu très peu conducteur ;
* l’influence de la nature du métal qui est en contact (voir ci-après). La position relative de deux métaux ou alliages dans l’échelle des potentiels de dissolution (tableau 18[[59]](#footnote-59)) n’indique que la possibilité de couple galvanique, si la différence de potentiel entre les deux est suffisante, sans plus. Elle ne dit rien sur la vitesse ou l’intensité de la corrosion galvanique qui peut être nulle ou infime, au point de ne pas être perceptible. Son intensité dépend de la nature des métaux et de leurs propriétés de surface (celle, en particulier, de réagir de façon passive).

### Diapositive 106 :

**Contact avec l’acier non allié :** l’expérience montre qu’au contact de l’acier ordinaire, les alliages d’aluminium des séries 3000, 5000 et 6000 ne subissent qu’une corrosion très superficielle, limitée à la zone des contacts. Les coulures de rouille, qui n’ont aucune action sur les alliages d’aluminium, imprègnent très fortement la couche d’alumine et en maculent la surface. Le contact avec l’acier non protégé a donc plus d’incidence sur l’aspect général et sur l’esthétique d’une structure en alliage d’aluminium que sur sa tenue à la corrosion.

**Contact avec l’acier zingué ou traité au cadmium :** dans l’échelle des potentiels, le zinc est plus électronégatif que l’aluminium ; quant au cadmium, son potentiel est très voisin de celui de l’aluminium. Il apparaît donc qu’il est possible d’utiliser des connecteurs en acier zingué ou traité au cadmium pour assembler des structures en alliage d’aluminium. Toutefois, quand ces revêtements sont consommés, on retombe dans le cas précédent d’un contact entre alliage d’aluminium et acier nu.

**Contact avec de l’acier inoxydable :** bien que la différence de potentiel entre l’acier inoxydable et les alliages d’aluminium soit très forte, de l’ordre de 650 mV, on n’observe généralement pas de corrosion galvanique de l’aluminium au contact des aciers inoxydables. Dans entrer dans des considérations trop théoriques, il faut rappeler que les aciers inoxydables ont des surfaces passives, ce qui freine ou annihile les réactions d’oxydoréduction à la surface de l’acier. Les assemblages de structures en alliages d’aluminium sont couramment réalisés avec de la boulonnerie en acier inoxydable.

**Contact avec du cuivre et des alliages cuivreux :** si le contact avec le cuivre et les alliages cuivreux (bronze, laiton) ne donne pas lieu à une corrosion galvanique notable de l’aluminium dans l’atmosphère, il est néanmoins préférable de ménager un isolant entre les deux métaux. Le produit de la corrosion du cuivre, appelé vert-de-gris, est très agressif vis-à-vis de l’aluminium, au contact duquel il provoque localement une corrosion par piqûres.

**Contact avec le graphite et les produits graphités (joints, graisses, etc.) :** en milieu humide, le contact avec le graphite se traduit par une sévère corrosion galvanique des alliages d’aluminium (voir tableau 18). C’est pourquoi il est recommandé d’éviter d’utiliser des joints en caoutchouc naturel ou synthétique, chargés de graphite.

**Contact avec le plomb, l’étain et le mercure :** le contact avec ces métaux ou les peintures qui en contiennent, est à proscrire puisqu’ils peuvent provoquer, en milieu humide, une sévère corrosion galvanique des alliages d’aluminium.

**Contact entre alliages d’aluminium :** l’expérience de la construction navale, du matériel du territoire et du littoral, montre qu’il n’y a pas de risque de corrosion galvanique quand on assemble entre eux, par soudage ou par boulonnage, des alliages des séries 5000, 6000 et des alliages de moulage des familles au magnésium ou au silicium (voir tableau 19[[60]](#footnote-60)). Le métal d’apport (4043 ou 5356), pourvu qu’il soit choisi selon les règles de l’art, n’est pas un facteur de corrosion galvanique ni d’autres formes de corrosion.

Par contre, il peut y avoir une corrosion galvanique entre des alliages des familles 1000 et 2000 et entre le 7072 et les alliages des familles 3000.

### Diapositive 107 :

**Contact par soudure avec les aciers structuraux :** les assemblages acier-aluminium sont simplifiés par l’utilisation de joints de transition soudables de part et d’autre, tel qu’illustré sur la figure 60 (voir acétate). Leur emploi s’est généralisé en construction navale pour effectuer les raccordements par soudage entre l’acier et l’aluminium (par exemple, les superstructures en aluminium sur un pont en acier) et pourrait connaître d’autres développements dans les transports.

**Contact avec le béton et autres matériaux de construction :** on ne peut pas, à proprement parler, considérer le contact de l’aluminium avec les matériaux de construction tels le béton, le bois, les polymères ou le plâtre, comme étant une condition propice à une corrosion galvanique. Il s’agit d’un autre phénomène puisque ces matériaux ne sont pas des métaux. Le béton armé présente un cas particulier, comme on le verra ci-dessous.

**Figure 60 – Joint de transition acier-aluminium**

### Diapositive 109 :

**16.16 Contact de l’aluminium avec les matériaux de construction**

Dans le bâtiment, les applications de l’aluminium le mettent en contact avec la plupart des matériaux utilisés pour la construction : béton, plâtre, bois, polymères, etc. L’aluminium est aussi utilisé pour le transport des ciments et pour le matériel de coffrage, à titre d’exemples.

**Contact avec le béton :** bien que les bétons soient très alcalins, avec un pH proche de 12, l’aluminium résiste très bien à leur contact et à celui des mortiers. Il se produit toujours, au début de la prise des bétons, un léger décapage sur une épaisseur inférieure à 30μm, mais l’attaque cesse dès les premiers jours de contact. L’attaque laisse des traces plus ou moins grises sur la surface du métal. C’est pourquoi il est indispensable de protéger l’aluminium des projections des bétons et des crépis, si on veut conserver intact son aspect. Le contact prolongé avec le béton, même humide ne provoque qu’une attaque superficielle.

**Contact avec le béton armé :** lorsque l’aluminium est en contact avec le béton armé, il y a risque de corrosion galvanique à cause de la présence d’acier d’armature dans le milieu conducteur qu’est le béton humide. La corrosion galvanique se développe d’autant plus que le béton est humide et chargé de chlorures. Du chlorure de calcium est généralement utilisé pour accélérer la prise du béton et pour éviter qu’il ne gèle, par grand froid.

### Diapositive 110 :

Des essais réalisés en station de corrosion en bord de mer, sur des cylindres de béton dans lesquels étaient scellés des cornières d’aluminium et des barres d’armature en acier (figure 61 – voir acétate), ont montré que si l’aluminium est en contact avec l’acier (ou relié électriquement à lui), il subit une sévère corrosion galvanique. Les produits de corrosion de l’aluminium (l’alumine) peuvent provoquer des fissures dans le béton. L’intensité de la corrosion galvanique de l’aluminium est peu influencée par le rapport des surfaces des deux métaux en contact et par le rapport du volume du béton à la surface de l’aluminium.

Ces essais et l’expérience montrent qu’il est indispensable d’éviter tout contact de l’acier (notamment les armatures du béton armé) avec l’aluminium dans le béton. Le risque de corrosion galvanique n’est évité ni par anodisation, ni par peinture. La référence (1[[61]](#footnote-61)), dans une courte section sur le sujet, recommande l’utilisation de différentes membranes visant à protéger l’aluminium contre la corrosion galvanique, lorsqu’il est en contact avec le béton.

**Figure 61 – Dispositif d’essai pour étude de la corrosion galvanique**

### Diapositive 111 :

**Contact avec le plâtre :**  au contact du plâtre, la tenue de l’aluminium est excellente comme pour le béton, le contact avec le plâtre provoque une attaque très superficielle et de courte durée de l’aluminium, même anodisé. Cela se traduit par une altération indélébile de l’aspect de la surface de l’aluminium qui devient blanc mat. Pour éviter une altération, lors de la prise du plâtre, il faut protéger la surface de l’aluminium par des résines ou des vernis appropriés.

L’adhérence de l’aluminium et du plâtre est très bonne, le double de cette de l’acier. Le coefficient de dilatation du plâtre est, à toutes fins pratiques, le même que celui de l’aluminium.

**Contact avec le bois :**  dans le bâtiment, aluminium et bois sont souvent en contact. Les bois sont généralement acides, leur pH variant entre 3 et 6. que ce soit dans l’eau de mer ou en atmosphère rurale ou urbaine, les essais de longue durée, 5 à 10 ans, ont montré que les vis en aluminium ont une très bonne résistance à la corrosion ou contact des pièces de bois courantes (pin, sapin, hêtre, acajou), pourvu que ces vis ne soient pas fabriquées avec les alliages au cuivre des séries 2000 et 7000.

L’expérience montre qu’au contact du bois, l’aluminium ne subit de corrosion qu’en présence d’humidité. Il s’agit d’une corrosion très superficielle qui est principalement due à la structure du bois et à sa capacité d’absorber l’humidité, plutôt qu’à sa composition chimique. Il est intéressant de savoir que le séchage du bois est effectué dans des fours équipés de matériel en aluminium

**Contact avec des polymères :**  les polymères peuvent dégager, sous l’effet de la chaleur et du vieillissement, de très faibles quantités de produits plus ou moins volatiles dont la nature dépend du polymère. Les résines phénoliques sont les seules capables de créer une atmosphère légèrement agressive vis-à-vis l’aluminium. Les mousses de polyuréthane n’ont qu’une action très modérée sur l’aluminium.

### Diapositive 112 :

**16.17 Influence des traitements thermiques**

Les conditions du traitement thermique de durcissement structural des alliages des séries 200 et 7000 peuvent avoir une influence déterminante sur la résistance à la corrosion (particulièrement la corrosion inter-cristalline et la corrosion sous contrainte) :

* la vitesse de trempe doit être aussi rapide que possible, une vitesse trop lente pouvant affecter significativement la résistance à la corrosion de ces alliages ;
* la durée de revenu trop courte laisse un alliage plus ou moins sensibilisé, en particulier à la corrosion inter-cristalline ;
* les traitements thermiques de recuit ont moins d’influence sur la résistance à la corrosion des alliages à durcissement par écrouissage, parce que ceux-ci ne modifient pas fondamentalement la nature et la répartition des composés intermétalliques, sauf pour les alliages de la série 5000 chargés en magnésium.

Sous l’effet de maintiens prolongés en température, les alliages de la série 5000 peuvent subir des transformations métallurgiques (précipitations aux joints de grains du composé intermétallique Al3Mg2) qui les sensibilisent à la corrosion inter-cristalline. Cette sensibilisation est d’autant plus marquée que la teneur en magnésium est élevée, que la température est élevée et que la durée de maintien est longue. C’est la raison pour laquelle la teneur en magnésium des alliages de la famille 5000 est limitée à environ 5 % et qu’il ne faut pas envisager des conditions de service prolongé en température sans se référer au fournisseur des produits d’aluminium.

L’habitude a été prise de fixer à 65°C, voire 80°C, la limite supérieure de service des alliages plus de 2,5 % de magnésium (5083, 5086, etc.), sans préciser pour autant la durée de maintien. En fait, il faut prendre en compte le produit : temps X température. Ainsi que le montre la figure 62 (voir acétate), la sensibilisation d’un alliage 5086 commence après un an de maintien à 65°C. Il va de soi que le laps de temps sera beaucoup plus court, quelques mois, à 100°C ou à 125°C. Il convient de rappeler que le temps de maintien est cumulatif.

**Figure 62 – Influence d’un chauffage prolongé de l’alliage 5086 à 65°c**

### Diapositive 113 :

**16.18 Influence des soudures**

Pourvu que le soudage soit fait dans les règles de l’art, avec des fils d’apport recommandés par les normes, l’expérience montre que le cordon de soudure et la zone affectée thermiquement ne sont pas une zone préférentielle de corrosion sur les assemblages soudés des alliages des séries 1000, 3000, 5000 et 6000. Dans la chaudronnerie navale et industrielle, il est courant de souder ensemble des tôles en 5083, 5086, 5087, etc., avec des extrusions en 6005A, 6082, etc.

Seul l’alliage 7020, qui a la particularité de retrouver des caractéristiques mécaniques proches de l’état T4 après refroidissement de la soudure, risque de présenter une très grande sensibilité à la corrosion feuilletante dans la zone affectée thermiquement. Cette corrosion peut se développer très rapidement et entraîner la ruine d’une structure soudée soumise à un milieu agressif en quelques mois de service seulement.

Le brasage, réalisé dans les conditions métallurgiques normales, n’est pas, non plus, un facteur de corrosion.

### Diapositive 114 :

**16.19 Dispositions constructives**

On vient de voir que le soudage n’est pas, en soi, un facteur de corrosion. Il en est de même pour le rivetage, le boulonnage, le clinchage, etc., puisqu’ils ne modifient pas la structure du métal comme le fait le soudage. Par contre, la façon dont ils sont appliqués relève des dispositions constructives.

Les dispositions constructives englobent tout ce qui a trait aux formes définitives d’un ouvrage et à sa réalisation. De mauvaises dispositions constructives peuvent avoir un effet désastreux sur la résistance à la corrosion, toutes choses étant égales par ailleurs : choix correct des alliages, conditions de service acceptables, etc.

Il est de la responsabilité du concepteur d’éviter certaines configurations qui favorisent la rétention d’eau, les zones à recoins où s’accumulent des projections humides et où peut se développer une corrosion sévère. La figure 63 (voir acétate) présente quelques exemples de dispositions constructives adéquates ou à éviter, qui peuvent aussi bien s’appliquer à des structures faisant intervenir d’autres matériaux que l’aluminium.

### Diapositive 115 :

**16.20 Tenue à la corrosion des alliages**

Dans les mêmes conditions d’utilisation, la tenue à la corrosion des alliages d’aluminium dépend essentiellement des éléments d’alliage, c’est-à-dire de leur famille (ou série). Les normes de calcul et les ouvrages spécialisés fournissent généralement des indications parfois assez détaillées, parfois très générales, sur la tenue à la corrosion des familles et de leurs alliages. Une classification assortie de commentaires brefs est présentée ci-dessous dans le but de compléter l’information déjà disponible sur le sujet et pour faire, en quelque sorte, la synthèse de la présente section.

**Alliages de moulage**

Les alliages de familles 400.0 avec silicium sans cuivre et 500.0 avec magnésium ont une très bonne tenue à la corrosion atmosphérique.

Les alliages contenant du magnésium ont une excellente tenue à la corrosion marine. Il faut éviter l’emploi sans protection des alliages avec du cuivre de la famille 400.0, car ils n’ont pas une bonne tenue à la corrosion, surtout en milieu marin.

**Alliages de corroyage**

Les formes de corrosion auxquelles les alliages de corroyage peuvent être sensibles sont indiquées dans le tableau 21 (voir acétate).

**Figure 63 – Influence des dispositions constructives**

**Tableau 21 – Formes de corrosion des familles d’alliages de corroyage**

### Diapositive 116 :

Du point de vue de la tenue à la corrosion, il faut distinguer entre :

* les alliages non traitables thermiquement des familles 1000, 3000 et 5000 ;
* les alliages traités thermiquement de la famille 6000 ;
* les alliages traités thermiquement des familles 2000 et 7000.

**Alliages non traitables thermiquement :**  ces alliages ont une bonne résistance à la corrosion. Ils sont fréquemment utilisés dans des applications exigeant une telle résistance: bâtiment, transport, équipements, etc.

**Le manganèse de la famille 3000** a pour effet d’améliorer les caractéristiques mécaniques et la résistance à la corrosion.

**Les alliages de la famille 5000** sont les alliages à durcissement par écrouissage les plus performants en caractéristiques mécaniques et en tenue à la corrosion. Ils connaissent, depuis plusieurs décennies, un très grand développement dans les applications marines et dans les transports routiers (citernes à hydrocarbures et autres produits liquides ou pulvérulents).

Quelques mises en garde ont été faites, dans cette section et la précédente, quant à l’utilisation d’alliages de cette série avec forte teneur en magnésium. L’état H116 (et son équivalent, l’état H321) garantit que les alliages de types 5083, 5086 et 5456 ne sont sensibles ni à la corrosion inter-cristalline ni à la corrosion feuilletante.

**Alliages de la famille 6000 :**  tous les alliages laminés et extrudés de cette série ont une bonne tenue à la corrosion atmosphérique. S’ils sont légèrement sensibles à la corrosion inter-cristalline, en général sur une très faible épaisseur de quelques rangées de grains, ils ne le sont pas à la corrosion sous contrainte.

**Alliages des familles 2000 et 7000 :** les constructions aéronautique et aérospatiale sont les applications majeures des alliages de la famille 2000 et de ceux de la famille 7000 avec cuivre. Une quantité impressionnante d’études ont été réalisées pour caractériser et améliorer la tenue à la corrosion et la tenue à la fatigue de ces alliages. En dehors des applications aéronautiques, ces alliages sont surtout utilisés dans les applications mécaniques.

Tous les aspects de la corrosion en amont de l’application de ces alliages (c’est-à-dire l’influence des compositions, des traitements thermiques, etc.) sont une donnée prise en compte par les fabricants de produits. Cela signifie aussi que l’utilisateur ne se livre à des traitements thermiques, au cours de la mise en œuvre, qu’en respectant strictement les conditions recommandées, faute de quoi il s’expose à affaiblir sensiblement la tenue à la corrosion de son ouvrage.

Dans la présente section, l’information fournie sur la tenue à la corrosion de ces alliages est suffisante pour les fins de ce volume.

### Diapositive 117 :

**16.21 Les protections**

Il faut se référer à la section 9[[62]](#footnote-62) pour une description assez détaillée des différents procédés utilisés pour protéger l’aluminium contre la corrosion.

Il convient toutefois de rappeler qu’un revêtement ou une protection peuvent subir une usure ou une altération locale mettant à nu le métal à cet endroit. Il n’est donc pas possible d’envisager des applications de l’aluminium dans des produits chimiques ou des milieux très agressifs en ne comptant que sur la protection. Cette remarque est vraie pour tous les métaux et alliages.

Enfin, si on utilise du matériel anodisé ou peint, pour des raisons d’esthétique ou par tradition, l’expérience montre que ces alliages peuvent aussi, dans bien des cas, être employés non protégés, s’ils appartiennent aux séries 100, 3000, 5000 et 6000.

# Autres propriétés et caractéristiques

### Diapositive 120 :

<https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/geologie-aluminium-metal-exception-780/page/5/>

Au contact de l'humidité de l'environnement ou lors d'une immersion dans l'eau bouillante, la surface externe de la couche d'alumine est hydratée. La perte d'aluminium transformée en produits de corrosion est faible. L'immersion de l'aluminium dans l'eau bouillante est appelée boehmitage (formation de boehmite Al2O3.H2O) et est utilisée industriellement pour améliorer les propriétés de l'aluminium contre la corrosion.

**9. Finition et traitement des surfaces**

**9.1 Introduction**

Si on prétend que l’aluminium résiste bien à la corrosion, pourquoi, alors, cherche-t-on à le protéger?

Dans les faits, ce ne sont pas tous les alliages qui offrent une protection naturelle efficace contre la corrosion. Il est bien connu que les alliages au cuivre de la famille 2000 et au zinc de la famille 7000 n’ont pas une tenue suffisante à la corrosion pour être utilisés sans protection dans un milieu humide tel que l’atmosphère ambiante ou, pire, dans un milieu marin.

Un cas célèbre est celui du pont d’Arvida, qui enjambe la rivière Saguenay, à la hauteur de la centrale hydroélectrique de Shipshaw, au Québec. L’alliage utilisé pour ce pont de 152m est le 2014-T6 qui, au milieu des années 1900, représentait le choix le plus approprié. La principale caractéristique de cet alliage, utilisé surtout en aéronautique, est sa limite élastique élevée. Il a fallu prendre des précautions spéciales pour protéger le pont contre la corrosion lors de la construction, mais cela n’a pas empêché qu’il est fallu intervenir à quelques occasions par après. Par la suite, cet alliage n’a jamais plus été utilisé pour la construction de ponts en aluminium.

C’est pour protéger les avions fabriqués à partir d’alliages des séries 2000 et 7000, que les chimistes ont développé des traitements de surface de l’aluminium, dans les années 1920. C’est au cours de cette période que le procédé d’anodisation a été mis au point.

Les alliages non traitables thermiquement (séries 1000, 3000 et 5000), de même que ceux de la série 6000, traitables thermiquement, ont une bonne tenue à la corrosion au point de pouvoir être utilisés sans protection dans beaucoup de milieux, y compris le milieu marin. Certains bateaux en aluminium ne sont peints dans les parties visibles que dans un seul but décoratif. Les pontons des ports de plaisance et les portiques de signalisation routière ne sont jamais peints. Ce sont pourtant des structures utilisées dans des milieux corrosifs.

Dans le bâtiment, la plupart des applications architecturales de l’aluminium ne supportent pas la moindre corrosion par piqûres ou le moindre ternissement. Puisque l’aspect décoratif est essentiel, il faut protéger l’aluminium destiné au bâtiment par anodisation ou par peinture. Il va de soi que les éléments structuraux utilisés dans le bâtiment ne nécessitent pas de protection contre la corrosion s’ils sont cachés da la vue.

Enfin, il n’est pas recommandé de compter sur un **revêtement** pour protéger l’aluminium lorsqu’il est utilisé dans un milieu qui lui est très hostile (9). Transporter ou stocker des produits chimiques très agressifs dans une citerne protégée par un revêtement spécial (peinture, polymère, etc.), par exemple, pourrait se traduire par une corrosion localisée qui prendrait des proportions très graves à la moindre défaillance du système de recouvrement. D’ailleurs, le matériel pour le transport et le stockage de produits chimiques, lorsqu’il est en aluminium, n’est presque jamais peint intérieurement.

Il existe quelques techniques pour éviter la corrosion de l’aluminium ou pour lui donner un fini architectural acceptable. On peut soit modifier les propriétés de surface du métal par boehmitage, par conversions chimiques, par anodisation ou par placage, soit isoler le métal du milieu extérieur par un revêtement continu (peinture, vernis) ou, encore, modifier les propriétés du milieu par des inhibiteurs.

Le but recherché dans le présent ouvrage n’est pas de faire le tour complet de la question, mais de présenter au concepteur un aperçu des principaux procédés de finition et de traitement des surfaces afin de lui permettre de faire un choix éclairé de produits pour ses applications. Le lecteur qui voudra parfaire ses connaissances sur la corrosion de l’aluminium et les moyens de protection qui y sont associés, est invité à consulter les références (5), (23) et (40)[[63]](#footnote-63).

**9.2 Fini naturel**

Une des caractéristiques les plus intéressantes de l’aluminium est la facilité avec laquelle le métal s’oxyde au contact de l’air. La mince couche d’oxyde, dont l’épaisseur est de l’ordre de **5 à 10 nm**, est invisible, presque complètement imperméable et très résistante aux attaques d’atmosphères corrosives. Cette couche est dure, tenace et fond à une température de 2050°C, en comparaison de 660°C pour l’aluminium sous-jacent. Elle ne s’enlève pas à l’eau et ne tache pas les matériaux adjacents. Dans son état naturel, l’aluminium est brillant au départ, mais prend rapidement des teintes de gris.

Lorsqu’un traitement de surface est requis, on procède généralement à une anodisation ou à l’application d’une couche de peinture. Il y a toutefois un coût à payer pour le traitement lui-même ainsi que pour l’entretien subséquent. De plus, les dimensions des pièces traitées sont limitées à la grosseur des cuves pour l’anodisation ou, si la peinture est appliquée en atelier, à la dimension des chambres ou des fours. **Les cuves d’anodisation peuvent atteindre 10 mètres de longueur, mais dépassent rarement 2,5 mètres de profondeur**. Pour des applications structurales, il est donc préférable d’utiliser l’aluminium avec son fini naturel.

**16. Tenue à la corrosion**

**16.1 Introduction**

On ne peut concevoir d’ouvrage en alliages d’aluminium sans aborder le problème de la corrosion, même s’il est prévu que la structure sera utilisée dans des conditions idéales. Il y a donc un minimum de connaissances que le concepteur doit posséder pour faire un choix judicieux d’alliages et pour éviter de faire des erreurs qui pourraient s’avérer coûteuses.

L’étude de la corrosion est une science complexe qui relève de la métallurgie et de la chimie. Il existe des spécialistes du domaine qui se font un devoir d’assister le concepteur d’ouvrages dans ses choix ou de lui fournir une expertise lorsque vient le temps d’évaluer des dommages. Dans la présente section, les buts poursuivis sont de transmettre à l’étudiant en génie suffisamment d’informations pour qu’il puisse connaître ce qu’est la corrosion de l’aluminium, et d’amener l’ingénieur concepteur à un niveau de connaissances lui permettant de bien évaluer les problèmes auxquels il risque d’être confronté. Le traitement sera donc assez superficiel et le contenu sera emprunté à quelques excellents ouvrages sur le sujet.

**16.2 Principaux paramètres**

La tenue à la corrosion des alliages d’aluminium dépend d’une multitude de paramètres :

* la composition, l’état métallurgique et l’état de surface des alliages eux-mêmes ;
* les caractéristiques du milieu dans lequel ils sont exposés (milieu marin, humide, urbain, agricole, industriel, minier, etc.) ;
* les conditions de service prévues (bâtiment, ouvrage d’art, véhicule, aéronef, navire, équipement) ;
* les dispositions constructives (assemblages, contact avec d’autres métaux ou matériaux) ;
* la durée de l’ouvrage ;
* la fréquence et le type d’entretien.

Ces paramètres sont tous très importants, et ce n’est qu’en analysant chaque cas en particulier qu’on est en mesure d’évaluer lesquels sont susceptibles de l’être davantage.

### Diapositive 122 :

**17 Autres propriétés et caractéristiques**

Plusieurs propriétés et caractéristiques particulières à l’aluminium et à ses alliages ont été identifiées et commentées dans ce chapitre. Parmi les principales, on note la légèreté, la conductibilité thermique, la conductivité électrique, la tenue à la corrosion, la résilience, la ductilité à basse température, l’aptitude aux traitements de surface, la diversité des alliages d’aluminium, la diversité des produits, la fonctionnalité des produits moulés, forgés et extrudés, la facilité de mise en œuvre et le recyclage.

À cette liste, on pourrait ajouter les propriétés et caractéristiques suivantes :

* **Le pouvoir réflecteur de l’aluminium** : cette propriété est utile pour certaines applications industrielles, comme des réflecteurs de lampes. Cependant, pour le soudeur, le pouvoir réflecteur de l’aluminium a pour effet d’imposer une meilleure protection afin d’éviter l’exposition aux rayons ultraviolets. Un autre petit inconvénient, pour ce dernier, est le fait que l’aluminium ne change pas de couleur lors du soudage, contrairement à l’acier ;
* **La non-susceptibilité magnétique de l’aluminium** : l’aluminium est non magnétique. Cette propriété peut le rendre intéressant pour certaines applications. Au soudage, le soufflage de l’arc se trouve éliminé grâce à cette propriété. Toutefois, l’inspection des soudures par magnétoscopie n’est pas possible ;
* **La non-toxicité de l’aluminium** : c’est cette propriété qui rend l’aluminium attrayant pour l’emballage des produits alimentaires et pour la fabrication d’accessoires de cuisine ;

Le contrôle par **magnétoscopie** (MT) est une méthode de contrôle non destructif très utilisée dans le domaine de la technologie des matériaux. Cette méthode permet de mettre en évidence des discontinuités ou des fissures, débouchantes ou proches de la surface.

### Diapositive 123 :

* **L’utilisation de l’aluminium comme carburant et comme explosif**: en réagissant aux divers oxydes métalliques, l’aluminium en poudre produit de hautes températures. Ce procédé porte le nom d’aluminothermie et est à la base de l’utilisation de l’aluminium comme combustible solide des moteurs d’appoint des lanceurs, telle la fusée Ariane. La poudre d’aluminium a aussi des applications pyrotechniques, comme nous l’avons déjà signalé à la sous-section 13.7[[64]](#footnote-64) ;
* **Le coût :** on ne peut terminer ce chapitre sur l’aluminium sans aborder la problématique des coûts des matériaux et des produits. Le prix de vente d’un produit dépend de son coût de production. Toutefois, puisque le lingot d’aluminium est vendu comme matière première, son coût varie considérablement dans le temps. Il convient donc de parler en termes de coûts relatifs et de laisser au concepteur le soin de s’informer, en temps voulu, du prix de base de l’aluminium pour une évaluation préliminaire des coûts. Il suffit de savoir que le coût des plaques ou des extrusions les plus économiques, est de l’ordre de 25 à 50 % plus élevé que celui du lingot. Des valeurs plus précises peuvent ensuite être obtenues des fournisseurs, dans la phase finale des calculs.

La figure 64, tirée de la référence (8[[65]](#footnote-65)), fournit quelques données comparatives sur les coûts de différents produits pour une évaluation préliminaire. Le produit le moins coûteux est la feuille ou la plaque laminée en alliages non traitables thermiquement, de plus faible résistance (séries 1000, 3000 et 5000). Il sert donc de base de comparaison. Il convient de souligner que l’information contenue dans cette figure ne concerne que le matériau. Les coûts de fabrication et autres considérations doivent être analysés séparément. On comprendra que le prix peut varier en fonction des difficultés de mise en œuvre, des alliages et des quantités produites.

Généralement, il est plus économique de produire des pièces tridimensionnelles par forgeage, coulage ou extrusion qu'en cherchant à les fabriquer à partir de plaques ou de feuilles produites à faible coût.

### Diapositive 124 :

La figure 64 (voir acétate), tirée de la référence (8), fournit quelques données comparatives sur les coûts de différents produits pour une évaluation préliminaire. Le produit le moins coûteux est la feuille ou la plaque laminée en alliages non traitables thermiquement, de plus faible résistance (séries 1000, 3000 et 5000). Il sert donc de base de comparaison. Il convient de souligner que l’information contenue dans cette figure ne concerne que le matériau. Les coûts de fabrication et autres considérations doivent être analysés séparément. On comprendra que le prix peut varier en fonction des difficultés de mise en œuvre, des alliages et des quantités produites.

Généralement, il est plus économique de produire des pièces tridimensionnelles par forgeage, coulage ou extrusion qu'en cherchant à les fabriquer à partir de plaques ou de feuilles produites à faible coût.

**Figure 64 – Coûts relatifs des produits d’aluminium**

1. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, p30 [↑](#footnote-ref-1)
2. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, p130 [↑](#footnote-ref-2)
3. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, p13 [↑](#footnote-ref-3)
4. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, p130 [↑](#footnote-ref-4)
5. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Calcul des charpentes en aluminium*, Denis Beaulieu, p135 [↑](#footnote-ref-5)
6. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Calcul des charpentes en aluminium*, Denis Beaulieu, p136 [↑](#footnote-ref-6)
7. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Calcul des charpentes en aluminium*, Denis Beaulieu, p51 [↑](#footnote-ref-7)
8. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Calcul des charpentes en aluminium*, Denis Beaulieu, p54 [↑](#footnote-ref-8)
9. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Calcul des charpentes en aluminium*, Denis Beaulieu, p52 [↑](#footnote-ref-9)
10. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, p62 [↑](#footnote-ref-10)
11. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, p130 [↑](#footnote-ref-11)
12. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, p18 [↑](#footnote-ref-12)
13. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, pp17-50 [↑](#footnote-ref-13)
14. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, p110 [↑](#footnote-ref-14)
15. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, p130 [↑](#footnote-ref-15)
16. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, p40 [↑](#footnote-ref-16)
17. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, p41 [↑](#footnote-ref-17)
18. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, p38 [↑](#footnote-ref-18)
19. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, p38 [↑](#footnote-ref-19)
20. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, p38 [↑](#footnote-ref-20)
21. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, p38 [↑](#footnote-ref-21)
22. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, p38 [↑](#footnote-ref-22)
23. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, p30 [↑](#footnote-ref-23)
24. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, p130 [↑](#footnote-ref-24)
25. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, p77 [↑](#footnote-ref-25)
26. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, p132 [↑](#footnote-ref-26)
27. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, p70 [↑](#footnote-ref-27)
28. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, p78 [↑](#footnote-ref-28)
29. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, p77 [↑](#footnote-ref-29)
30. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, p132 [↑](#footnote-ref-30)
31. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, p63 [↑](#footnote-ref-31)
32. <https://cqrda.ca/wp-content/uploads/2022/11/Annexe-3_Durcissement_ecrouissage.pdf> [↑](#footnote-ref-32)
33. <https://cqrda.ca/feuillards-techniques/> [↑](#footnote-ref-33)
34. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, p50 [↑](#footnote-ref-34)
35. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes en aluminium,* Denis Beaulieu, p57 [↑](#footnote-ref-35)
36. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, p89 [↑](#footnote-ref-36)
37. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, p132 [↑](#footnote-ref-37)
38. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, p32 [↑](#footnote-ref-38)
39. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, p33 [↑](#footnote-ref-39)
40. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, 35 [↑](#footnote-ref-40)
41. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, p36 [↑](#footnote-ref-41)
42. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, 100 [↑](#footnote-ref-42)
43. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, p123 [↑](#footnote-ref-43)
44. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, pp46 et 48 [↑](#footnote-ref-44)
45. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, p132 [↑](#footnote-ref-45)
46. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, p123 [↑](#footnote-ref-46)
47. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, p132 [↑](#footnote-ref-47)
48. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, p132 [↑](#footnote-ref-48)
49. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, p53 [↑](#footnote-ref-49)
50. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, p114 [↑](#footnote-ref-50)
51. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, p109 [↑](#footnote-ref-51)
52. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, p114 [↑](#footnote-ref-52)
53. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, p116 [↑](#footnote-ref-53)
54. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, p116 [↑](#footnote-ref-54)
55. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, p109 [↑](#footnote-ref-55)
56. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, p108 [↑](#footnote-ref-56)
57. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, p109 [↑](#footnote-ref-57)
58. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, p110 [↑](#footnote-ref-58)
59. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, p114 [↑](#footnote-ref-59)
60. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, p116 [↑](#footnote-ref-60)
61. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, p130 [↑](#footnote-ref-61)
62. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, p52 [↑](#footnote-ref-62)
63. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, pp130-132 [↑](#footnote-ref-63)
64. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, p84 [↑](#footnote-ref-64)
65. Les Presses de l’Aluminium, PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, 2eme édition, Denis Beaulieu, p131 [↑](#footnote-ref-65)