Document de support à la présentation :

Calcul des charpentes d’aluminium

Module 1 - Introduction

Contenu développé par :

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

Professeur au Département des sciences appliquées de l’UQAC

Table des matières

[Note 4](#_Toc126766640)

[A- Introduction et historique 5](#_Toc126766641)

[Diapositive 5 : 5](#_Toc126766642)

[Diapositive 6 : 8](#_Toc126766643)

[Diapositive 7 : 9](#_Toc126766644)

[Diapositive 8 : 10](#_Toc126766645)

[Diapositive 9 : 11](#_Toc126766646)

[Diapositive 10: 11](#_Toc126766647)

[Diapositive 11 : 12](#_Toc126766648)

[Diapositive 12 : 13](#_Toc126766649)

[Diapositive 13 : 13](#_Toc126766650)

[Diapositive 14 : 13](#_Toc126766651)

[Diapositive 15 : 14](#_Toc126766652)

[Diapositive 16 : 14](#_Toc126766653)

[Diapositive 17 : 15](#_Toc126766654)

[Diapositive 18 : 15](#_Toc126766655)

[Diapositive 20 : 16](#_Toc126766656)

[Diapositive 21 : 18](#_Toc126766657)

[Diapositive 22 : 20](#_Toc126766658)

[Diapositive 24 : 21](#_Toc126766659)

[Diapositive 26 : 22](#_Toc126766660)

[Diapositive 28 : 23](#_Toc126766661)

[B- Production et transformation de l’aluminium 24](#_Toc126766662)

[Diapositive 35 : 24](#_Toc126766663)

[Diapositive 36: 24](#_Toc126766664)

[Diapositive 38 et 39 : 25](#_Toc126766665)

[Diapositive 41 : 25](#_Toc126766666)

[Diapositive 42 : 27](#_Toc126766667)

[Diapositive 44 : 27](#_Toc126766668)

[Diapositives 45 et 46 : 28](#_Toc126766669)

[Diapositive 47 : 28](#_Toc126766670)

[Diapositive 48: 28](#_Toc126766671)

[Diapositive 53: 29](#_Toc126766672)

[Diapositive 54 : 30](#_Toc126766673)

[Diapositive 56 : 31](#_Toc126766674)

[Diapositive 57 : 32](#_Toc126766675)

[Diapositive 58 et 59 : 32](#_Toc126766676)

[Diapositive 64 : 33](#_Toc126766677)

[Diapositive 65: 34](#_Toc126766678)

[Diapositive 66: 34](#_Toc126766679)

[Diapositive 67 : 35](#_Toc126766680)

[Diapositive 68 : 37](#_Toc126766681)

[Diapositive 69 : 37](#_Toc126766682)

[Diapositive 70 : 38](#_Toc126766683)

[Diapositive 72 : 39](#_Toc126766684)

[C- Désignation des alliages 41](#_Toc126766685)

[Diapositive 75 : 41](#_Toc126766686)

[Diapositive 78 : 42](#_Toc126766687)

[Diapositive 79 : 43](#_Toc126766688)

[Diapositive 80 : 46](#_Toc126766689)

[Diapositive 84: 46](#_Toc126766690)

[Diapositive 85 et 86 : 47](#_Toc126766691)

[Diapositive 87 : 50](#_Toc126766692)

[Diapositive 90, 91 et 92: 50](#_Toc126766693)

[Diapositive 94 et 95 : 52](#_Toc126766694)

[Diapositive 96 : 53](#_Toc126766695)

[Diapositive 97 : 55](#_Toc126766696)

[Diapositive 99 : 55](#_Toc126766697)

[Diapositive 101 : 57](#_Toc126766698)

[D- Considérations métallurgiques 60](#_Toc126766699)

[Diapositive 104 : 60](#_Toc126766700)

[Diapositive 106 : 60](#_Toc126766701)

[Diapositive 108 et 109 : 62](#_Toc126766702)

[Diapositive 111 : 62](#_Toc126766703)

[Diapositive 112 : 63](#_Toc126766704)

[Diapositive 114 : 63](#_Toc126766705)

[Diapositive 116 : 64](#_Toc126766706)

[Diapositive 118 : 64](#_Toc126766707)

[Diapositive 119 : 65](#_Toc126766708)

[Diapositive 120 : 65](#_Toc126766709)

[Diapositive 121 : 67](#_Toc126766710)

# Note

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

# Introduction et historique

## Diapositive 5 :

***Il y a seulement 214 ans (soit en 1808) que l'élément aluminium a été découvert par Sir Humphrey Davy***, un chimiste anglais qui tenta vainement de produire de l'aluminium par électrolyse d'un mélange fondu d'alumine et de potasse; **et 135 ans qu'il existe une production réellement industrielle de l’aluminium** suite à la découverte du procédé de production industriel par les ‘‘jumeaux’’ de l’aluminium, Paul Héroult en France et Charles Martin Hall aux États-Unis – procédé couramment appelé « procédé Hall-Héroult » – en 1886 et à la création de la Société Électrométallurgique Française de Paul Héroult en 1887.

(Avant 2022 bien sûr!) …… (Le début de la métallurgie du fer remonte en plein 4ème millénaire avant notre ère, au Proche-Orient)

<https://solidariteetprogres.fr/documents-de-fond-7/science/homme-acier.html>

L’utilisation du fer remonte à plus de 4000 ans

**3. L’âge de fer** (-1500 au Proche-Orient, -900 en Europe). La première apparition du fer se situe entre 1650 et 1700 avant notre ère, chez les Hittites et les Chalybes, peuples d’Asie mineure, une région riche en mines de fer. Ils transmettront leur savoir-faire aux Étrusques et aux Gaulois.

**4. L’âge d’acier** (1709 à aujourd’hui. Donc depuis 313 ans). Nous vivons aujourd’hui dans un âge beaucoup plus avancé que l’âge de fer : l’âge d’acier. Ce métal, inexistant dans la nature, possède des propriétés extraordinaires. Pour s’en rendre compte, il faut d’abord savoir de quoi l’on parle.

« En 1808, le chimiste anglais Humphry Davy (né le 17 Décembre 1778 en Penzance, Cornwall en Angleterre) découvre que l’aluminium peut être isolé par réduction électrolytique de l’alumine (oxyde d’aluminium). Le nom *aluminium* a été donné par Davy. Il était un pionnier dans le domaine de l’électrolyse grâce aux piles voltaïques pour la séparation de composés. Ainsi, en utilisant cette technique, il a pu isoler le sodium et le potassium en 1807 ; le magnésium, le barium et le calcium en 1808. [[1]](#footnote-1)»

En outre, en [1807](https://fr.wikipedia.org/wiki/1807), [Humphry Davy](https://fr.wikipedia.org/wiki/Humphry_Davy), après avoir découvert que le [sodium](https://fr.wikipedia.org/wiki/Sodium) et le [potassium](https://fr.wikipedia.org/wiki/Potassium) entraient dans la composition de l’[alun](https://fr.wikipedia.org/wiki/Alun) (substance astringente servant à fixer les teintures), suppose qu’il s’y trouve aussi un autre [métal](https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9tal), qu’il baptise « aluminium » (en [latin](https://fr.wikipedia.org/wiki/Latin), « alun » se dit *alumen*)

La découverte de l'aluminium, tardive par rapport à celle des autres métaux usuels, s'explique par le fait que l'aluminium n'existe pas à l'état natif, métallique, dans l'écorce terrestre mais sous forme principalement d'oxydes.

En effet, l’aluminium étant un métal très réactif, il n’existe sur Terre que combiné à l’oxygène, bien évidemment principalement dans les **silicates** [Si, O, Al]. (Un silicate est un sel combinant la silice SiO₂ à d'autres oxydes métalliques)

Jusqu'au 19èmesiècle les chimistes n'en sont qu'aux conjectures (supposition fondée sur ce qui est probable en n'ayant que peu d'informations) quant à ce métal mystérieux.

L’aluminium est le 3e élément le plus abondant dans la croûte terrestre (8,1%), après l’oxygène et le silicium (Le plus abondant est l’oxygène qui constitue près de 47 % de la croûte terrestre. Le deuxième plus abondant est le silicium qui lui en occupe 28 %. Puis viennent l’aluminium (8,1 %), le fer (5 %), le calcium (3,6 %), le sodium (2,8 %), le potassium (2,6 %) et le magnésium (2,1 %). Ces huit éléments constituent ainsi à eux seuls 98,5 % de l’écorce terrestre. Les 84 autres éléments chimiques naturels ne représentent donc que 1,5 % de la Terre.)

Les bauxites représentent un des principaux minerais d’origine supergène, c’est-à-dire formés dans des conditions de surface (En géologie, un processus supergène qualifie une formation résultant de phénomènes géologiques d'origine superficielle, par opposition au processus hypogène qui correspond aux phénomènes géologiques profonds.). La concentration de l’alumine résulte de la transformation des silicates - contenus initialement dans des roches éruptives (e.g. feldspaths) ou dans les roches sédimentaires (argiles) - en hydroxydes tels que la gibbsite, la bœhmite, le diaspore, et en oxyde, le corindon.

Les grands pays industrialisés ont été, dès le début, les plus importants producteurs d'aluminium dans le monde :  États-Unis, Canada, ex-URSS, pays d'Europe dont la France.

Les pays bénéficiant d'une énergie bon marché ou situés près d'une zone de consommation importante ont émergé au fil des années. Il s’agit, en outre, de l’Australie, du Brésil, de Venezuela, de la Chine, des Pays du Golfe, de l’Inde et de l’Afrique du Sud.

Matériau moderne par excellence, l'aluminium est largement utilisé dans la construction en neuf et en rénovation de maison en raison de son esthétisme, mais aussi de sa solidité et de sa légèreté. Durable et fonctionnel, l'aluminium s'invite désormais partout chez les particuliers : vérandas, fenêtres et portes, rambardes d'escalier, et même parfois bardage.

**L'aluminium est naturellement un métal mou. Pour le rendre plus résistant et utilisable en construction, il est dans la très grande majorité des cas associé à d'autres métaux comme le cuivre, le manganèse, le magnésium, le zinc, etc. En fonction du choix de l'alliage et du procédé de fabrication, l'aluminium va décliner de grandes variétés de propriétés physiques et mécaniques rendant son utilisation tout terrain.**

**L'aluminium, un matériau idéal en construction:**

Découvert en 1808 par Sir Humphrey Davy, l'aluminium est un métal qui connaît aujourd'hui de nombreuses applications dans le secteur de la construction. On le retrouve ainsi sous forme de bardage (parement) dans les grandes constructions (immeubles d'habitation ou de bureaux, bâtiments d’aéroports, de gares ferroviaires, de complexes sportifs) où il souligne de sa brillance des lignes racées (Qui a de la race; qui a de la distinction, de l'élégance, de la finesse) imaginées par de grands architectes. Dans ces mêmes constructions, on l'utilise aussi pour créer des charpentes et des éléments porteurs de grande ampleur conjuguant esthétique et légèreté.  Plus récemment, l'aluminium s'invite aussi chez le particulier. Dans ce cadre, le plus souvent l'emploi de l'aluminium se limite à quelques touches de ci-de là (par endroits) : portails et portillons, volets, fenêtres et portes, vérandas, mais aussi escaliers, rambardes et garde-corps.
En construction, l’aluminium est principalement utilisé sous **deux formes** :

* + Les profilés (murs-rideaux, cadres de fenêtre, vérandas...)
	+ Les produits laminés(volets roulants, portes, bardages, toitures, plafonds suspendus, panneaux muraux, panneaux isolants, cloisons, équipements de chauffage, de ventilation, dispositifs de protection solaire, réflecteurs de lumière)

Les produits d’aluminium sont de plus en plus utilisés comme éléments structuraux dans les applications de génie civil. On assiste présentement à un transfert, vers l’industrie de la construction, des connaissances développées par les industries de l’aéronautique, du rail, de l'automobile et du transport maritime pour la fabrication de véhicules légers. L’aluminium semble suivre une voie semblable à celle des matériaux composites.

L’aluminium est utilisé très majoritairement sous forme d’alliages dont le constituant principal est l’aluminium, les éléments d’addition pouvant représenter jusqu’à 15% de son poids. La résistance de l’alliage d’aluminium est adaptée à l’application requise.
A titre d’exemple, on considère qu’un kilogramme d’aluminium peut remplacer deux kilogrammes d’acier dans des applications automobiles.

## Diapositive 6 :

Rappel:

1808: découverte de l’aluminium par Sir Humphrey Davy

1887 : création de la Société Electrométallurgique Française de Paul Héroult. Naissance réelle d’une production industrielle. (avant 2019 bien sûr!)……(Le début de la métallurgie du fer remonte en plein 3ème millénaire avant notre ère, au Proche-Orient)

La bauxite a été découverte par le chimiste et minéralogiste [Pierre Berthier](https://fr.wikipedia.org/wiki/Pierre_Berthier) (1782-1861) en [1821](https://fr.wikipedia.org/wiki/1821) sur la commune des [Baux-de-Provence](https://fr.wikipedia.org/wiki/Les_Baux-de-Provence) ([Bouches-du-Rhône](https://fr.wikipedia.org/wiki/Bouches-du-Rh%C3%B4ne)), en cherchant du minerai de fer pour le compte d'industriels lyonnais. Il analyse des échantillons de minerai et découvre qu'ils contiennent une proportion importante d'alumine (oxyde d’aluminium). Ce minerai sera ultérieurement baptisé "bauxite".

[Pierre Berthier](https://fr.wikipedia.org/wiki/Pierre_Berthier) lui donna le nom de « terre d'alumine des Baux ». Le nom fut transformé en « beauxite » par [Armand Dufrénoy](https://fr.wikipedia.org/wiki/Armand_Dufr%C3%A9noy) en [1847](https://fr.wikipedia.org/wiki/1847) puis en « bauxite » par [Henry Sainte-Claire Deville](https://fr.wikipedia.org/wiki/Henri_Sainte-Claire_Deville) en [1861](https://fr.wikipedia.org/wiki/1861) qui avait été alerté à ce sujet par l'ingénieur des mines [Gustave Noblemaire](https://fr.wikipedia.org/wiki/Gustave_Noblemaire)[1](https://fr.wikipedia.org/wiki/Histoire_des_mines_de_bauxite).

À l’origine, le terme « bauxite » désigne un ensemble de roches alumineuses et ferrugineuses analogues à celles qui furent découvertes aux Baux. Ces roches reposent sur une surface irrégulière, de morphologie karstique, creusée dans des calcaires ou des dolomies.

Après sa découverte en Guinée, cette roche fut successivement retrouvée en Guyane par M. Itier entre 1839 et 1842, et ensuite clairement identifiée dans toute la ceinture intertropicale. En 1981, G. Bardossy a proposé de distinguer les *bauxites de karst* (sur substrat carbonaté) et les *bauxites latéritiques* (sur substrats alumino-silicatés variés) des régions intertropicales.

Les réserves mondiales s’élèvent à plus de 20 000 millions de tonnes et la production annuelle est d’environ 115 millions de tonnes. 85% des réserves se situent en zone tropicale et font partie des formations latéritiques qui y occupent de vastes surfaces. En 1995, le plus gros producteur mondial était l'Australie, avec 37,4 millions de tonnes, devant la Guinée, avec 16,5 millions de tonnes. Suivent, la Jamaïque (10,9 Mt), le Brésil (7,9 Mt), l’U.R.S.S. (5,7 Mt) et un groupe de pays produisant entre 2,5 et 4,5 Mt (Inde, Chine, Suriname, Yougoslavie, Hongrie, Grèce).

**Remarque : Pierre Berthier**, né le [3](https://fr.wikipedia.org/wiki/3_juillet) [juillet](https://fr.wikipedia.org/wiki/Juillet_1782) [1782](https://fr.wikipedia.org/wiki/1782_en_science) à [Nemours](https://fr.wikipedia.org/wiki/Nemours) et mort le [24](https://fr.wikipedia.org/wiki/24_ao%C3%BBt) [août](https://fr.wikipedia.org/wiki/Ao%C3%BBt_1861) [1861](https://fr.wikipedia.org/wiki/1861_en_science) à [Paris](https://fr.wikipedia.org/wiki/Paris), est un [minéralogiste](https://fr.wikipedia.org/wiki/Min%C3%A9ralogie) et [géologue](https://fr.wikipedia.org/wiki/G%C3%A9ologie) [français](https://fr.wikipedia.org/wiki/France) qui découvre en particulier les propriétés de la [bauxite](https://fr.wikipedia.org/wiki/Bauxite) en [1821](https://fr.wikipedia.org/wiki/1821_en_science) dans le village des [Baux-de-Provence](https://fr.wikipedia.org/wiki/Les_Baux-de-Provence). Cet ingénieur polytechnicien formé à la recherche au corps des mines mène une belle carrière scientifique, honoré par son entrée à l'académie des sciences en 1825 et sa nomination à l'inspection générale des mines en 1836. Ses importants travaux sur la synthèse par voie sèche permettent à [Jacques Joseph Ebelmen](https://fr.wikipedia.org/wiki/Jacques-Joseph_Ebelmen) de réaliser les premières synthèses de cristaux caractéristiques de quelques pierres précieuses.

## Diapositive 7 :

En **chimie**, une [réduction](https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9action_d%27oxydor%C3%A9duction) est une [réaction chimique](https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9action_chimique) au cours de laquelle un ou plusieurs atomes d'une molécule ou d'un ion gagne(ou gagnent) des électrons ; en [**chimie minérale**](https://fr.wikipedia.org/wiki/Chimie_inorganique), une réduction est une opération par laquelle on extrait d’un oxyde le métal qu’il renferme, en éliminant l’oxygène.

[Salindres est une commune située dans la Communauté d'agglomération du Grand Alès. Elle fut, au 19e siècle, le lieu d'implantation de la première usine de Pechiney, ce qui lui vaut d'être qualifiée de « berceau de l'aluminium ».

Le **Var** est un [département](https://fr.wikipedia.org/wiki/D%C3%A9partements_fran%C3%A7ais) [français](https://fr.wikipedia.org/wiki/France) de la [région](https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9gion_fran%C3%A7aise) [Provence-Alpes-Côte d'Azur](https://fr.wikipedia.org/wiki/Provence-Alpes-C%C3%B4te_d%27Azur), qui doit son nom au [fleuve côtier](https://fr.wikipedia.org/wiki/Var_%28fleuve%29) qui constituait jadis la limite orientale du département mais ne l'arrose plus aujourd'hui. ]

**Aluminium**

Dès son arrivée à l'École normale, il cherche à déterminer les propriétés du [silicium](https://fr.wikipedia.org/wiki/Silicium), du [magnésium](https://fr.wikipedia.org/wiki/Magn%C3%A9sium) et de l'[aluminium](https://fr.wikipedia.org/wiki/Aluminium).

Pour produire de l'aluminium, il reprend les expériences de [Friedrich Wöhler](https://fr.wikipedia.org/wiki/Friedrich_W%C3%B6hler), ce dernier n'ayant réussi qu'à produire quelques paillettes d'aluminium au milieu de nombreuses impuretés. Pour réduire l'[oxyde d'aluminium](https://fr.wikipedia.org/wiki/Oxyde_d%27aluminium), à la différence de Wöhler, il remplace le [potassium](https://fr.wikipedia.org/wiki/Potassium) par du [sodium](https://fr.wikipedia.org/wiki/Sodium). Il réussit à produire les premiers lingots d'aluminium. La production chimique de l'aluminium est alors née.

En [1854](https://fr.wikipedia.org/wiki/1854), il fait une première communication sur ce sujet à l'[Académie des sciences](https://fr.wikipedia.org/wiki/Acad%C3%A9mie_des_sciences_%28France%29) mais ne juge pas utile de déposer un brevet pour son procédé de fabrication. Toujours en [1854](https://fr.wikipedia.org/wiki/1854), Henri Sainte-Claire Deville réalise la première production industrielle d'aluminium dans une usine de [Javel](https://fr.wikipedia.org/wiki/Quartier_de_Javel) à Paris. Les travaux sont financés par l'empereur [Napoléon III](https://fr.wikipedia.org/wiki/Napol%C3%A9on_III). Les premiers lingots seront utilisés pour l'[exposition universelle](https://fr.wikipedia.org/wiki/Exposition_universelle) de [1855](https://fr.wikipedia.org/wiki/1855).

En [1856](https://fr.wikipedia.org/wiki/1856), l'usine s'installe dans le [quartier de la Glacière](https://fr.wikipedia.org/wiki/Rue_de_la_Glaci%C3%A8re) puis en [1857](https://fr.wikipedia.org/wiki/1857) à [Nanterre](https://fr.wikipedia.org/wiki/Nanterre). En [1859](https://fr.wikipedia.org/wiki/1859), cette usine produira 500 kg d'aluminium principalement destiné à la bijouterie.

Toujours en [1859](https://fr.wikipedia.org/wiki/1859), il publie un ouvrage sur l'aluminium où il prévoit l'utilisation future de ce métal : « L'aluminium est susceptible de devenir un métal usuel ». Parmi d'autres propriétés, il détermine sa conductibilité électrique : « La détermination de la conductibilité électrique a été faite au moyen de l'appareil de M. [Wheatstone](https://fr.wikipedia.org/wiki/Wheatstone), en cherchant quelles étaient les dimensions d'un fil de clavecin et d'un fil d'aluminium qui opposaient au passage de l'électricité la même résistance électrique. »

En 1860, après avoir reçu un rapport à ce sujet de l'ingénieur des mines [Gustave Noblemaire](https://fr.wikipedia.org/wiki/Gustave_Noblemaire), il a l'intuition de choisir la [bauxite](https://fr.wikipedia.org/wiki/Bauxite) comme minerai pour produire l'[alumine](https://fr.wikipedia.org/wiki/Alumine) nécessaire à la production de l'aluminium, plutôt que la [cryolithe](https://fr.wikipedia.org/wiki/Cryolithe) d'Islande qui revient très cher[5](https://fr.wikipedia.org/wiki/Henri_Sainte-Claire_Deville). Il met au point le procédé dit [*procédé Deville*](https://fr.wikipedia.org/wiki/Extraction_de_l%27alumine) pour extraire l'alumine du minerai.

Il travaille sur les questions périphériques à la production de l'aluminium et met au point une méthode de production du sodium, matière première dont il a besoin. À la suite de ses travaux, le coût de production de ce métal passe de 1000 [F](https://fr.wikipedia.org/wiki/Franc_fran%C3%A7ais) à 10 F par kg.

Le procédé chimique de Sainte-Claire Deville se développera jusqu'en [1886](https://fr.wikipedia.org/wiki/1886), année où [Paul Héroult](https://fr.wikipedia.org/wiki/Paul_H%C3%A9roult) et [Charles Martin Hall](https://fr.wikipedia.org/wiki/Charles_Martin_Hall) découvriront le [procédé électrolytique de production de l'aluminium](https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9duction_%C3%A9lectrolytique_de_l%27aluminium).

Il est important de souligner qu’en [1854](https://fr.wikipedia.org/wiki/1854), Sainte-Claire Deville avait approché une méthode électrolytique, mais les cinq piles qu'il utilisait étaient incapables de lui fournir l'intensité nécessaire. [Henri Moissan](https://fr.wikipedia.org/wiki/Henri_Moissan), [prix Nobel de chimie](https://fr.wikipedia.org/wiki/Prix_Nobel_de_chimie) en [1906](https://fr.wikipedia.org/wiki/1906), dira « Deville attendait la découverte de [Gramme](https://fr.wikipedia.org/wiki/Z%C3%A9nobe_Gramme)». [[2]](#footnote-2)

## Diapositive 8 :

La **production de l'aluminium par électrolyse** est le procédé qui permet de fabriquer le métal [aluminium](https://fr.wikipedia.org/wiki/Aluminium) à partir de l'[alumine](https://fr.wikipedia.org/wiki/Alumine) extraite de la [bauxite](https://fr.wikipedia.org/wiki/Bauxite). Le procédé a été inventé simultanément par [Paul Héroult](https://fr.wikipedia.org/wiki/Paul_H%C3%A9roult) en France et par [Charles Martin Hall](https://fr.wikipedia.org/wiki/Charles_Martin_Hall) aux États-Unis en [1886](https://fr.wikipedia.org/wiki/1886), et il est couramment appelé « **procédé Hall-Héroult** ». Il permet la production de l'aluminium dit « primaire », l'aluminium « secondaire » étant issu du [recyclage](https://fr.wikipedia.org/wiki/Recyclage).

Jusqu'à l'invention de Héroult-Hall en 1886, l'aluminium coûte cher à produire. Son prix est comparable à celui de l'argent et ses utilisations se limitent à des objets de luxe, telles des pièces d'orfèvrerie réalisées pour Napoléon III.

**Paul (Louis-Toussaint) Héroult**, né le [10](https://fr.wikipedia.org/wiki/10_avril) [avril](https://fr.wikipedia.org/wiki/Avril_1863) [1863](https://fr.wikipedia.org/wiki/1863) à [Thury-Harcourt](https://fr.wikipedia.org/wiki/Thury-Harcourt) (département du [Calvados](https://fr.wikipedia.org/wiki/Calvados_%28d%C3%A9partement%29)) et mort le [9](https://fr.wikipedia.org/wiki/9_mai) [mai](https://fr.wikipedia.org/wiki/Mai_1914) [1914](https://fr.wikipedia.org/wiki/1914) à [Antibes](https://fr.wikipedia.org/wiki/Antibes) ([Alpes-Maritimes](https://fr.wikipedia.org/wiki/Alpes-Maritimes)), est un [physicien](https://fr.wikipedia.org/wiki/Physicien) [français](https://fr.wikipedia.org/wiki/France). Il est l'inventeur de l'[électrolyse](https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89lectrolyse) de l'[aluminium](https://fr.wikipedia.org/wiki/Aluminium) et du [four à arc électrique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Four_%C3%A0_arc_%C3%A9lectrique) pour l'[acier](https://fr.wikipedia.org/wiki/Acier).

**Charles Martin Hall** ([1863](https://fr.wikipedia.org/wiki/1863)-[1914](https://fr.wikipedia.org/wiki/1914)) est un ingénieur américain. Il a inventé le [procédé électrolytique d'extraction de l'aluminium](https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9duction_%C3%A9lectrolytique_de_l%27aluminium) à partir de l'[alumine](https://fr.wikipedia.org/wiki/Alumine). Cette invention a été réalisée simultanément et indépendamment par le français [Paul Héroult](https://fr.wikipedia.org/wiki/Paul_H%C3%A9roult). Il avait un grand sens des affaires et de la gestion ce qui lui permet de développer son invention.

## Diapositive 9 :

L'**usine de la chute de Froges** a été créée par la Société électrométallurgique de Froges (SEMF) de [Paul Héroult](https://fr.wikipedia.org/wiki/Paul_H%C3%A9roult), en [1887](https://fr.wikipedia.org/wiki/1887) à [Froges](https://fr.wikipedia.org/wiki/Froges) ([Isère](https://fr.wikipedia.org/wiki/Is%C3%A8re_%28d%C3%A9partement%29)). C'est la première usine de production d'aluminium électrolytique en France, et sa croissance très rapide est à l'origine de la fusion entre la SEMF et la [Compagnie des Produits Chimiques d'Alais et de la Camargue](https://fr.wikipedia.org/wiki/Compagnie_des_Produits_Chimiques_d%27Alais_et_de_la_Camargue) qui donne naissance à [Péchiney](https://fr.wikipedia.org/wiki/P%C3%A9chiney) en [1921](https://fr.wikipedia.org/wiki/1921) qui est alors rebaptisée Compagnie de Produits chimiques d'Alès, Froges et Camargue, intégrant, de fait, le nom de Froges.

Ce site fût réellement le berceau de la production par voie électrolytique, avec des améliorations successives issues d'innovations originales. Mais compte tenu des progrès réalisés, les ressources énergétiques devinrent insuffisantes en 1893. Succédèrent alors en Maurienne, d'autres usines plus performantes, dans lesquelles Paul HEROULT poursuivit ses activités.

Berceau de l'industrie française de l'aluminium, Froges accueillera, en 1924, les établissements Charles Coquillard qui fabriquent de la feuille mince.

Cette technologie reste, à ce jour, en application dans le monde entier. Mais si, à l'origine à Froges, l'atelier disposait de 4000 ampères à l'époque, les unités de production modernes de Pechiney sont maintenant alimentées en 280 000 ampères, voire 400 000 ampères, en cette fin de siècle.

## Diapositive 10:

La “Pittsburgh Reduction Company” deviendra plus tard “l’Auminum Company of America (ALCOA)”

« Arthur Vining Davis (1867-1962) a été le directeur général d’ALCOA pendant plus de 50 ans. Il a, également, joué le rôle de président de la compagnie et aussi de président du conseil d’administration pendant une période plus courte. »

Dow Davis, le petit-neveu d'**Arthur Vining Davis**, est celui à qui l'on doit la création d'Arvida en **1926**

## Diapositive 11 :

L'hydroxyde d'aluminium, de formule chimique Al(OH)₃, est la forme la plus stable de l'aluminium dans les conditions normales de température et de pression. L'oxyhydroxyde d'aluminium AlO(OH) et l'alumine Al₂O₃ ne diffèrent de l'hydroxyde d'aluminium que par la perte d'une ou plusieurs molécules d’eau.

**L'alumine, ou oxyde d'aluminium, est un composé chimique de formule Al₂O₃. Il s'agit d'un solide blanc inodore insoluble dans l’eau.**

Karl Josef Bayer (4 mars 1847-22 octobre 1904) est un chimiste autrichien.

Il a donné son nom au procédé toujours utilisé d'extraction de l'alumine à partir de la bauxite. Sa vie fut marquée par ses nombreux voyages à travers l'Europe.

En [1867](https://fr.wikipedia.org/wiki/1867), il arrête ses études d'architecture pour aller à [Wiesbaden](https://fr.wikipedia.org/wiki/Wiesbaden), dans le laboratoire de [chimie](https://fr.wikipedia.org/wiki/Chimie) de Remigius Fresenius (1818-1897). Il devient chimiste conseil.

À l'âge de 41 ans, il découvre que l'hydroxyde d'aluminium précipite dans une solution d'[aluminate de sodium](https://fr.wikipedia.org/wiki/Aluminate_de_sodium) additionnée d'un peu d'hydroxyde d'aluminium fraîchement extrait. Cette découverte a fait l'objet de ses premiers dépôts de brevet au [Royaume-Uni](https://fr.wikipedia.org/wiki/Royaume-Uni) (1888) et en Allemagne (1889). Cette méthode a été immédiatement utilisée et une usine d'extraction de l'alumine est construite à Tentelev (1888).

En [1892](https://fr.wikipedia.org/wiki/1892), il fait sa seconde découverte : il met en évidence l'extraction de l'alumine contenue dans la [bauxite](https://fr.wikipedia.org/wiki/Bauxite). La réaction, obtenue en chauffant la solution avec de la [soude](https://fr.wikipedia.org/wiki/Hydroxyde_de_sodium) (NaOH), est réalisée dans un [autoclave](https://fr.wikipedia.org/wiki/Autoclave). Une solution d'[aluminate de sodium](https://fr.wikipedia.org/wiki/Aluminate_de_sodium) se forme. Il dépose une nouvelle série de brevets.

Le procédé de fabrication de l’alumine pure à partir du minerai de bauxite mis au point en 1887 par le chimiste austro-hongrois Karl Josef Bayer a jeté les bases de la fabrication industrielle de l’aluminium, en fournissant le produit en amont de l’électrolyse du métal léger.

L’**extraction de l’alumine** est un procédé chimique qui permet d’extraire l’oxyde d’aluminium appelé [alumine](https://fr.wikipedia.org/wiki/Alumine) contenu dans la [bauxite](https://fr.wikipedia.org/wiki/Bauxite). L’alumine est la principale matière première qui permettra la fabrication de l’[aluminium](https://fr.wikipedia.org/wiki/Aluminium) métal par un [procédé d'électrolyse](https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9duction_%C3%A9lectrolytique_de_l%27aluminium).

La mise au point du procédé a été faite au cours de la deuxième moitié du [XIXe siècle](https://fr.wikipedia.org/wiki/XIXe_si%C3%A8cle). Plusieurs procédés ont été élaborés : le procédé Deville, le procédé Peniakoff Sapeck, le procédé Petersen Haglund. C’est finalement le procédé inventé par [Karl Josef Bayer](https://fr.wikipedia.org/wiki/Karl_Josef_Bayer) qui sera universellement utilisé. Le [procédé Orbite](https://fr.wikipedia.org/wiki/Extraction_de_l%27alumine) semble offrir une alternative moins polluante au procédé Bayer, mais doit faire ses preuves dans l'industrie.

## Diapositive 12 :

En 1886, la même année quoique de manière indépendante, des dépôts de brevet, par le français Paul Héroult et par l'américain Charles Martin, de la technique de la fabrication de l'aluminium par l'électrolyse, ouvrent la voie à l'industrialisation de la production d'un métal dont les usages allaient connaître un formidable essor.

Le procédé nécessitant de grandes quantités d'électricité, les vallées alpines vont se couvrir de centrales électriques et d'usines. La Maurienne devient, alors, la vallée de l'aluminium. La formation d'un réseau national réduit ensuite l'avantage énergétique des territoires alpins. Péchiney, qui a succédé à Alais Froges et Camargue, fait le choix de moderniser son site historique de St Jean de Maurienne dans les années 1980 et investit sur le site de Dunkerque sur un site plus conforme à la nouvelle donne industrielle. C'est ensuite le groupe Rio Tinto Alcan qui prend le contrôle de l'industrie de l'aluminium en France et menace le site de St Jean de Maurienne de fermeture. Celle-ci sera finalement évitée par la prise de contrôle du site par un consortium formé par le groupe allemand TRIMET et EDF.

## Diapositive 13 :

Avec près de 6 % de la production mondiale, le Canada se situe au **quatrième rang** des producteurs mondiaux après la Chine, le Moyen-Orient et la Russie.

## Diapositive 14 :

La compagnie d'aluminium Pittsburg Reduction, fondée en 1888 par l'américain Charles Martin Hall, un des inventeurs du procédé de fabrication de l'aluminium, installe une filiale à Shawinigan à la demande de la Shawinigan Water and Power. Le procédé d'électrolyse requis pour la fabrication de l'aluminium demandant beaucoup d'électricité, la Shawinigan Water and Power s'engageait à fournir de l'énergie électrique à des taux très bas. Pour honorer ce contrat, la Pittsburg devait construire sa propre centrale hydroélectrique.

La centrale et la première usine d'aluminium sont construites de 1900 à 1901 d'après les plans de l'ingénieur Wallace Johnson et mises en marche en 1901. La centrale alimente les cuves de l'aluminerie grâce au courant électrique fourni par la Shawinigan Water and Power qui l'achemine jusqu'à la centrale de la Pittsburg grâce à un canal d'amenée.

La Northern Aluminium Company, constituée en 1902 comme filiale de l'Aluminium Company of America, prend la place de la Pittsburg Reduction. La centrale est agrandie en 1905 et en 1906.

En 1925, la Northern Aluminium Company devient l'Aluminium Company of Canada, puis ALCAN en 1966. Le bâtiment a bénéficié lors de sa construction de trois innovations technologiques du 19e siècle. Il possède d'abord des murs à cavité inventés par l'anglais William Alkenson au début du 19e siècle, des fermes de toit en acier composées de cornières et de goussets rivetés et enfin, une composition assurée par un assemblage de béton et d'acier. La centrale est démantelée en 1949 par la décision de l'ALCAN de cesser la production d'aluminium sur le site, ce qui entraîne une forte diminution des besoins en électricité. L'ALCAN continue de posséder un droit d'usage sur cette centrale jusqu'en 1983 lorsqu'elle devient la propriété d'Hydro-Québec.

**1900**
Construction de l'usine d'électrolyse de Shawinigan Falls par la Pittsburg Reduction Co. Jos Frigon consrtruit une briqueterie à proximité de l'usine d'aluminium; Les briques sont vendues aux différentes usines en construction. La Shawinigan fait construire des maisons auprès des chutes pour y loger ses employés.

**Joseph-Auguste Frigon** (né le [7](https://fr.wikipedia.org/wiki/7_f%C3%A9vrier) [février](https://fr.wikipedia.org/wiki/F%C3%A9vrier_1870) [1870](https://fr.wikipedia.org/wiki/1870) à [Saint-Prosper](https://fr.wikipedia.org/wiki/Saint-Prosper-de-Champlain), mort le [14](https://fr.wikipedia.org/wiki/14_f%C3%A9vrier) [février](https://fr.wikipedia.org/wiki/F%C3%A9vrier_1944) [1944](https://fr.wikipedia.org/wiki/1944) à [Shawinigan Falls](https://fr.wikipedia.org/wiki/Shawinigan) à l'âge de 74 ans) est un homme d'affaires et [homme politique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Personnalit%C3%A9_politique) [québécois](https://fr.wikipedia.org/wiki/Qu%C3%A9bec). Il a été [maire](https://fr.wikipedia.org/wiki/Maire) de [Saint-Narcisse](https://fr.wikipedia.org/wiki/Saint-Narcisse) et maire de [Shawinigan Falls](https://fr.wikipedia.org/wiki/Shawinigan). Il a été le [député](https://fr.wikipedia.org/wiki/D%C3%A9put%C3%A9) de la [circonscription](https://fr.wikipedia.org/wiki/Circonscription_%C3%A9lectorale_%28Qu%C3%A9bec%29) de [Saint-Maurice](https://fr.wikipedia.org/wiki/Saint-Maurice_%28circonscription_provinciale%29) à l'[Assemblée législative du Québec](https://fr.wikipedia.org/wiki/Assembl%C3%A9e_nationale_du_Qu%C3%A9bec) de 1927 à 1935.

## Diapositive 15 :

L'ancienne aluminerie de Shawinigan est un ensemble industriel électrométallurgique aménagé à partir de 1899. Le site comprend 12 bâtiments érigés entre 1900 et 1927, tels que des salles des cuves, une fonderie, un atelier de tréfilerie et de câblerie, des laboratoires, un atelier de broyage du coke, un espace d'expédition, des bureaux administratifs et des annexes reliant les différentes parties entre elles. Les bâtiments en brique présentent des plans rectangulaires et des élévations d'un à deux étages. Ils sont coiffés de toits à deux versants droits, à croupes, en appentis ou plats. L'ensemble est situé sur un plateau surplombant la rivière Saint-Maurice, près des chutes de Shawinigan, dans la ville de Shawinigan.

## Diapositive 16 :

**Arvida** est une ancienne ville du [Saguenay](https://fr.wikipedia.org/wiki/Saguenay%E2%80%93Lac-Saint-Jean), au [Québec](https://fr.wikipedia.org/wiki/Qu%C3%A9bec), incorporée en [1926](https://fr.wikipedia.org/wiki/1926) et fusionnée à [Jonquière](https://fr.wikipedia.org/wiki/Jonqui%C3%A8re) en [1975](https://fr.wikipedia.org/wiki/1975). Son premier quartier est classé parmi les lieux historiques nationaux du Canada depuis 2014

**1928** : Constitution de la compagnie canadienne Aluminium Limited avec son siège social à Montréal pour prendre le contrôle de la plupart des actifs de l'Aluminum Company of America (Compagnie Américaine d’Aluminium ou ALCOA) situés en dehors des États-Unis; cette décision est le résultat de la politique tarifaire du Commonwealth britannique

**1929** : R. E. Powell accède à la présidence de la compagnie Aluminium Limited; il est envoyé à Pittsburg; il transfère le siège social de la compagnie de Toronto à Montréal

**1936** : Mise en exploitation de l'usine Vaudreuil (alumine) d'Arvida

**1939-1941** : Les besoins de la guerre entraînent une augmentation des capacités de production de l'aluminium pour l'aviation. Aluminum Company of America (ALCOA) commence à construire une vingtaine d'usines pour rencontrer les besoins occasionnés par la guerre

**1942** : Construction et première production de l'usine de Beauharnois (48 000 TM).
Ouverture d'un centre de recherches à Kingston, Ontario

**1943** : Mise en exploitation de l'usine Isle-Maligne (73 000 TM).

**1944** : Alcan devient la marque de commerce enregistrée de la compagnie Aluminium Ltd.

**1945 :** Fondation de l'Alcan. La Cour d'appel des États-Unis décrète que depuis **1935**, la compagnie Aluminum Ltd est totalement indépendante de la compagnie Aluminum of America. Les actions d'Aluminium Ltd sont inscrites au New York Stock Exchange.

**1949** : Construction du laboratoire de recherche [d'Arvida](http://www.memoireduquebec.com/wiki/index.php?search=%22d'Arvida%22).

## Diapositive 17 :

Production d’aluminium primaire en 2015: la production totale mondiale est de 57 890 milliers de tonnes.

## Diapositive 18 :

**Isle-Maligne** est une ancienne ville [québécoise](https://fr.wikipedia.org/wiki/Qu%C3%A9bec) fondée en [1924](https://fr.wikipedia.org/wiki/1924) faisant aujourd'hui partie de la ville d'[Alma](https://fr.wikipedia.org/wiki/Alma_%28Qu%C3%A9bec%29) au [Saguenay-Lac-Saint-Jean](https://fr.wikipedia.org/wiki/Saguenay-Lac-Saint-Jean). La ville est formée à l'origine par le morcellement d'une partie du territoire de la paroisse de Saint-Joseph-d'Alma, située sur la rive sud de la rivière [Grande-Décharge](https://fr.wikipedia.org/wiki/Grande-D%C3%A9charge), à proximité de l'[île Maligne](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=%C3%8Ele_Maligne&action=edit&redlink=1), ainsi que d'une partie de la municipalité du canton de [Delisle](https://fr.wikipedia.org/wiki/Delisle_%28Qu%C3%A9bec%29), située sur la rive nord de la rivière Grande-Décharge.

## Diapositive 20 :

L’aluminium est utilisé très majoritairement sous forme d’alliages dont le constituant principal est l’aluminium, les éléments d’addition pouvant représenter jusqu’à 15% de son poids. La résistance de l’alliage d’aluminium est adaptée à l’application requise.
A titre d’exemple, on considère qu’un kilogramme d’aluminium peut remplacer deux kilogrammes d’acier dans des applications automobiles.

**Faible poids vs haute résistance**

L’aluminium possède une densité approximativement égale au tiers de celle de l’acier, tout en ayant des alliages dont la résistance est comparable à celle de plusieurs nuances d’aciers commerciaux. C’est la raison pour laquelle l’aluminium est largement utilisé en aéronautique, dans la construction navale, dans la construction automobile, de même que dans l’industrie du rail. La légèreté et la résistance de l’aluminium le rendent aussi attrayant pour certaines applications structurales relevant du génie civil où ces caractéristiques sont requises.

**- Un poids plume:** À masse égale, l’aluminium offre une **plus grande résistance et une meilleure rigidité** que les autres matériaux les plus courants en construction. L’aluminium est ainsi un métal dont la densité spécifique est de 2,7 g/cm3, soit environ un tiers de celle de l’acier (7-8 g/cm3) ou du cuivre (8,96 g/cm3). Cette légèreté rend notamment possible l’installation de grandes surfaces vitrées dans des cadres extrêmement fins ce qui ouvre la voie à de véritables économies d'énergie grâce aux apports solaires et lumineux.

**Résistance à la corrosion**

La surface de l’aluminium s’oxyde au contact de l’air, lui permettant de résister plus facilement aux attaques atmosphériques. Cette couche d’oxyde est très résistante, même dans les milieux marins et industriels. Cette caractéristique assure à l’aluminium de nombreux débouchés, non seulement dans les domaines de la construction mais aussi dans celui de l’emballage.

* **Un matériau pérenne à l'entretien minime:** L'aluminium est un matériau qui traverse le temps sans prendre une ride. En effet, l’aluminium génère naturellement une couche d’oxyde qui **le protège de la corrosion**. En extérieur, de nombreux exemples architecturaux anciens démontrent que l'aluminium reste comme au premier jour même après 150 ans de bons et loyaux services. Cette pérennité dans le temps est encore améliorée par les traitements de surface (anodisation ou thermolaquage).

D'entretien facile, les éléments en aluminium ne nécessitent qu'un lavage de temps à autre avec de l'eau additionnée d'un détergent doux. De plus, l’aluminium ne brûle pas. Le matériau est ainsi naturellement classé A1 selon la norme européenne.

L’aluminium génère naturellement une couche d’oxyde qui le protège de la corrosion. Différents types de traitement de surface peuvent encore améliorer cette résistance (anodisation, laquage, …).

L'**anodisation** (appelé parfois **éloxage**, en [Suisse Romande](https://fr.wikipedia.org/wiki/Suisse_romande)) est un [traitement de surface](https://fr.wikipedia.org/wiki/Traitement_de_surface) (de type conversion) qui permet de protéger ou de décorer une pièce en aluminium (ou alliage) ou titane (ou alliage) par [oxydation](https://fr.wikipedia.org/wiki/Oxydation) [anodique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Anode) (couche électriquement isolante de 5 à 50 [micromètres](https://fr.wikipedia.org/wiki/Microm%C3%A8tre)). Elle octroie aux matériaux une meilleure résistance à l'usure, à la [corrosion](https://fr.wikipedia.org/wiki/Corrosion) et à la chaleur. L'épaisseur varie en fonction de la destination du produit final.

Pour les usages courants à l'intérieur, cinq micromètres sont suffisants, dix pour l'extérieur, vingt pour le bord de mer et parfois plus ([anodisation dure](https://fr.wikipedia.org/wiki/Anodisation_dure)) pour des usages spécifiques très agressifs. L'anodisation améliore également l'aspect (incolore ou teinté). L'opération consiste en une succession de bains suivis de rinçage : un premier pour préparer la surface, un second pour produire l'oxyde, un troisième pour la couleur éventuelle et enfin le dernier pour stabiliser. L'oxydation naturelle incontrôlée des pièces en aluminium ne forme pas de barrière étanche, sauf pour certains alliages d'aluminium moins sensibles aux corrosions (par exemple AG6).

Cet oxyde d'aluminium, très pur, est de l'[alumine](https://fr.wikipedia.org/wiki/Alumine), blanche en couche épaisse. Il est d'une [dureté très élevée](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=%C3%89chelle_de_Ohm&action=edit&redlink=1) : c'est le [corindon](https://fr.wikipedia.org/wiki/Corindon) utilisé dans les abrasifs. L'anodisation forme une couche de cristaux qui sont très [hygrophiles](https://fr.wikipedia.org/wiki/Hygrophile), propriété que l'on utilise pour colmater la surface. Cette hydratation (dernière phase du traitement) provoque une combinaison stable avec cet oxyde (étanche aux agents corrosifs) (pratiqué à chaud, plus de 70 °C, certains ajoutent du bichromate de potassium 50 g/l). Dans le cas de l'aluminium, ces cristaux permettent d'emprisonner des colorants très fins qui sont bloqués dans la structure. La couleur des pièces en titane anodisé dépend de la tension appliquée lors de l'anodisation (à composition de bain identique). Les couleurs obtenues sont très agréables. Il est possible aussi de ne pas colmater la couche d'anodisation, notamment dans le cas où une couche de peinture est appliquée ultérieurement. En effet la couche poreuse servira de base d'accroche (mécanique) à la peinture.

Le **laquage** de l’aluminium consiste à appliquer de la peinture en poudre électrostatique à la surface de l’aluminium. Les peintures qu’on utilise pour cette finition sont des résines de polyester ou polyuréthane. Il convient de souligner la grande résistance de ces finitions aux rayons UV, aux agents atmosphériques et à la corrosion.

Un des principaux avantages du laquage est qu’il existe une vaste palette de couleurs. Toutes les possibilités de coloration et tonalités sont dans le nuancier RAL, qui est un standard qui attribue à chaque couleur un code de 4 chiffres.

Le **thermolaquage** est un procédé de peinture (traitement de surface) qui consiste tout d'abord à appliquer une peinture poudre (epoxy, polyester, mixte epoxy-polyester) par pistolage électrostatique. Celle-ci va ensuite être polymérisée dans un four de cuisson à 200 C° afin d'obtenir un film de peinture.

**Facilité de fabrication**

L’aluminium est un matériau qui se travaille très bien, ce qui le rend attrayant pour une multitude d’applications. Il peut être laminé en feuilles extrêmement minces, en plus d’être facile à couler et à forger. Un des grands avantages de l’aluminium sur l’acier est la possibilité de réaliser des profilés par extrusion

* **Un matériau facile à mettre en œuvre:** L’aluminium a pour caractéristique d'être très malléable ce qui le rend facile à travailler à basse température. Il se déforme sans se rompre, et épouse ainsi toutes les formes souhaitées. Cette caractéristique est particulièrement importante en rénovation, puisqu'en effet, dans le cas de remplacement de fenêtres anciennes par exemple, le bâti peut être créé à la demande selon des formes et dimensions très particulières (arc de cercle, ogive, biais, etc.). Facile à former, l'aluminium est aussi facile à assembler par soudage, vissage, ou rivetage. Le poids plume du matériau permet aussi de simplifier la manipulation sur un chantier.

## Diapositive 21 :

**Imperméabilité, effet barrière**

Même à très faible épaisseur, une feuille d’aluminium est totalement imperméable et ne laisse passer ni lumière, ni micro-organismes, ni odeurs. De plus le métal lui-même ne libère ni odeur ni goût, ce qui en fait un élément de choix pour l’emballage alimentaire ou pharmaceutique.

**Facilité de recyclage**

L’aluminium est entièrement et facilement recyclable, ce qui en fait un matériau écologique. Il fait partie des métaux qui ne craignent pas la pénurie.

**Un matériau durable et facteur d'économie d'énergie:** L'aluminium est un matériau durable. Recyclable à 100 % sans dégradation de ses propriétés, l'aluminium est aussi facteur d'économie d'énergie. En effet, la résistance mécanique de l'aluminium permet de créer des profilés fins associés à des fenêtres de grande dimension. La surface des vitrages augmente ainsi et maximise les apports de lumière et de chaleur. Si l’aluminium est un bon conducteur de chaleur, ce qui est un inconvénient dans les applications de fenêtre et de façade, cet inconvénient est maîtrisé par les nouveaux profilés dans lesquels sont serties des barrettes en matériau à faible conductivité thermique (ruptures de pont thermique).

**Une sécurité contre L’incendie**

L’aluminium ne brûle pas et est donc classé en tant que matériau de construction non combustible (classe a1 selon la norme européenne). Néanmoins, les alliages d’aluminium fondent à environ 650°C sans toutefois libérer de gaz nocifs. Les toits industriels et les murs extérieurs sont de plus en plus fabriqués en panneaux recouverts d’une fine pellicule d’aluminium, ayant pour but de fondre en cas d’incendie majeur afin de permettre à la chaleur et aux fumées de s’échapper et donc de minimiser les dégâts

Aucune émanation de substances dangereuses: Plusieurs études ont démontré que les matériaux de construction en aluminium ne présentent aucun danger pour les occupants ou l’environnement immédiat. De part et d’autre, les études menées aujourd’hui prouvent que les alliages utilisés, leurs traitements de surface (revêtement ou anodisation) et les matériaux employés sont tous neutres. Les matériaux de construction en aluminium n’ont aucun impact néfaste, que ce soit sur la qualité de l’air intérieur ou sur les eaux souterraines, du sol ou de surface

**Propriétés réfléchissantes**

L’aluminium possède un pouvoir réfléchissant élevé de la lumière ainsi que de la chaleur ce qui, ajouté à son faible poids, en fait un matériau idéal pour les réflecteurs dans les matériels d’éclairage ou les couvertures de survie.

La couverture de survie possède deux faces, généralement une surface dorée et une argentée. Certains modèles présentent une surface argentée mate au lieu de la surface dorée. Généralement, la surface dorée a une capacité d'absorption de la chaleur de 50 % et la face argentée reflète à 90 % le rayonnement infrarouge. Du fait de sa température, un corps humain est émetteur de rayonnement thermique dans le domaine de l'infrarouge (proche de 10 micromètres). Pour lutter contre l'hypothermie, la surface dorée doit être à l'extérieur. Ainsi, le rayonnement infrarouge intérieur est conservé, et une partie de celui provenant de l'environnement extérieur est absorbé (par la surface dorée) et complète l'apport calorifique. Pour lutter contre l'insolation (coup de chaleur provoqué par une trop longue exposition au soleil), il est conseillé de placer la face argentée à l'extérieur, celle-ci réfléchissant le rayonnement infrarouge à 90 %.

## Diapositive 22 :

**Grande élasticité**

L’élasticité de l’aluminium le rend intéressant pour certaines structures soumises à des chocs. L’aluminium a, en effet, un module élastique particulièrement bas, si on le compare à l’acier. Cette propriété, par contre, peut aussi limiter les applications de génie, comme on le verra plus loin.

**Esthétique**

En aspect brillant ou coloré, l'aluminium est disponible dans un grand nombre de finitions. On le trouve principalement en deux versions : anodisé ou peint (thermolaqué).
**L'anodisation** est un traitement de surface spécifique à l’aluminium qui consiste à créer par électrolyse une couche uniforme très résistante d’oxyde d’aluminium incolore ou colorée. L’épaisseur de la couche varie selon l'utilisation du produit (de 5 microns pour les utilisations intérieures à 20 microns pour les utilisations en atmosphère corrosive de bord de mer). L'anodisation de l'aluminium en France est soumise à label (Qualanod : Marque d'une anodisation certifiée pour les profilés destinés aux applications architecturales, le label Qualanod est l'assurance d'un traitement de surface de qualité reconnu dans de nombreux pays).

**Le thermolaquage** est également un traitement de surface spécifique qui est réalisé principalement en trois phases : Un traitement de surface chimique pour garantir une bonne adhérence de la peinture, suivi d'un poudrage électrostatique et enfin une polymérisation dans un four. Le thermolaquage de l'aluminium en France est soumis à label (Qualicoat, Qualimarine, Qualideco).

Grâce à ces deux techniques, l’aluminium se pare de toutes les couleurs (brillantes ou mates) et de toutes les finitions (lisse, texturée, métallisée…).

**Haute conductivité thermique et électrique**

L’aluminium a de nombreuses applications dans les secteurs des produits électriques et thermomécaniques en raison de ses conductivité électrique et conductibilité thermique élevées.

Le cuivre est le métal le plus utilisé dans le câblage électrique, cependant, l’argent est un meilleur conducteur que ce dernier (le cuivre est suivi de l’or, l’aluminium et le molybdène), mais l’argent est très cher pour une telle utilisation.

La conductivité de l'aluminium par rapport au cuivre est de 61 %, mais le poids de l'aluminium est de 30 % inférieur. Cela signifie qu'un fil d'aluminium nu ne pèse que la moitié d'un fil de cuivre nu avec la même résistance électrique. L'aluminium est généralement moins coûteux, comparativement aux conducteurs en cuivre.

## Diapositive 24 :

Les inconvénients de l'aluminium sont peu nombreux mais ils méritent d'être toutefois pris en compte à l'heure du choix des matériaux en rénovation ou en neuf :

**Un coût conséquent**

Malgré que le prix de l’aluminium a chuté au cours des dernières années, il n’en reste pas moins qu’il s’agit encore d’un matériel passablement dispendieux. Les manufacturiers auront donc à user de stratégie afin d’être en mesure de garder leurs coûts de production passablement bas pour être en mesure d’offrir leurs véhicules à prix abordable.

**Un coût conséquent** : Comparé au PVC ou au bois, l'aluminium est notablement plus cher à l'achat (pour les fenêtres). Le différentiel varie le plus souvent de 1 à 3 en fonction des finitions choisies, et pour certaines fenêtres sur mesure de 1 à 10. Pour les volets battants, les mêmes différences de prix sont à noter. Pour les rambardes et garde-corps, les escaliers, etc., l'aluminium se place également dans les prix les plus élevés.

**Certaine fragilité au coup**

Le matériau étant malléable, à faible épaisseur, notamment en feuille, il a tendance à mal supporter les coups et à s'enfoncer. Pour limiter les possibles bosses, le produit choisi doit être de plus grande épaisseur, ou composé d'un alliage plus résistant.

**Forte conductivité thermique**

L’aluminium est un bon conducteur de chaleur. Quand il est utilisé pour la fabrication de fenêtres ou de portes, le matériau doit être associé à des systèmes de ruptures de pont thermique.

**Pollution industrielle**

La production d’aluminium engendre une forte pollution en rejetant des déchets qui doivent être stockés. De plus, elle nécessite une consommation plus importante en eau et en électricité que celle de l’acier.

Les boues rouges engendrées par le procédé Bayer constituent un déchet industriel potentiellement nuisible pour l’environnement. En effet, elles emportent avec elles une partie non négligeable de la soude utilisée, lui conférant alors un pH élevé, en général compris entre 11 et 14. En outre, elles comportent également des métaux lourds, donc toxiques. Dans la pratique, les boues rouges sont rejetées en mer et/ou déversées dans un bassin de stockage afin de laisser l’eau qu’elles contiennent s’évaporer, et ainsi former un résidu solide.

## Diapositive 26 :

Le fer est le métal le plus exploité par l’Homme, principalement pour produire des aciers. L’aluminium vient en seconde position. Il permet la fabrication de pièces utilisées dans le secteur des transports, et notamment en aéronautique, astronautique, ou dans le bâtiment. Il peut être le constituant de câbles électriques, au lieu du cuivre (même si ce dernier est meilleur conducteur). Il intervient aussi dans la confection d’emballages alimentaires (canettes, papier aluminium), d’ustensiles de cuisine et d’objets de la vie de tous les jours : pièces de monnaie, montres, gouttières, miroirs (en remplacement de l’argent), réflecteurs lumineux, couvertures de survie, encadrements de fenêtres, etc.

Un bardage est un revêtement qui recouvre un mur extérieur, la plupart du temps en bois. Mais il peut également être constitué de PVC, ou encore de tôles métalliques, avec d'autres matériaux composites.

Constructions: Bâtiments (structure, planchers, mur rideau, portes, plafonds suspendus, diffuseurs, conduits, etc.), ponts, poteaux d’éclairage, panneaux de circulation, ...

Matériau moderne par excellence, l'aluminium est largement utilisé dans la construction en neuf et en rénovation de maison en raison de son esthétisme, mais aussi de sa solidité et de sa légèreté. Durable et fonctionnel, l'aluminium s'invite désormais partout chez les particuliers : vérandas, fenêtres et portes, rambardes d'escalier, et même parfois bardage.

## Diapositive 28 :

La **Commerzbank Tower** est un gratte-ciel situé à [Francfort-sur-le-Main](https://fr.wikipedia.org/wiki/Francfort-sur-le-Main) en [Allemagne](https://fr.wikipedia.org/wiki/Allemagne), de l'architecte [Norman Foster](https://fr.wikipedia.org/wiki/Norman_Foster_%28architecte%29), inauguré en mai 1997. Mesurant 300,25 mètres de hauteur (avec l'antenne) et 258,7 mètres au toit, il est actuellement le second [gratte-ciel](https://fr.wikipedia.org/wiki/Gratte-ciel) de l'[Union européenne](https://fr.wikipedia.org/wiki/Union_europ%C3%A9enne) après [The Shard](https://fr.wikipedia.org/wiki/The_Shard) de [Londres](https://fr.wikipedia.org/wiki/Londres) et ses 310 mètres de hauteur. Le bâtiment tient son nom de la [Commerzbank](https://fr.wikipedia.org/wiki/Commerzbank), une banque allemande qui y abrite son siège social. À sa construction, et jusqu'à celle de la [Tour Naberejnaïa](https://fr.wikipedia.org/wiki/Tour_Naberejna%C3%AFa) à [Moscou](https://fr.wikipedia.org/wiki/Moscou), il était le plus haut gratte-ciel d'[Europe](https://fr.wikipedia.org/wiki/Europe), dépassant alors sa voisine la [Messeturm](https://fr.wikipedia.org/wiki/Messeturm), détentrice du record européen de 1990 à 1997.

# Production et transformation de l’aluminium

## Diapositive 35 :

Après l’oxygène et la silice, l’aluminium est l’élément que l’on trouve le plus fréquemment sur le globe, mais il n’existe pas à l’état pur. On trouve l’aluminium principalement dans un minerai appelé bauxite. La bauxite se présente sous forme de poudre, de granules, de roches ou d’argile, et peut être de couleur crème, rouge, brune, jaune ou grise. C’est à Les Baux de Provence, dans le sud de la France, qu’a été découvert, en 1821, le premier gisement de bauxite.

La bauxite utilisée pour produire l’aluminium contient entre 45 et 60 % en poids d’oxyde d’aluminium (Al2O3), communément appelé alumine. Les différentes formes et couleurs proviennent des autres constituantes, dont les principales sont l’oxyde de fer, l’oxyde de silicium, l’oxyde de titane et l’eau. Il est facile d’exploiter les gisements de bauxite puisqu’ils se trouvent généralement près de la surface. Avant d’être envoyé à l’usine pour en extraire l’alumine, le minerai est d’abord broyé pour faciliter son traitement dans les étapes subséquentes.

[Environ 4-5 tonnes de bauxite est requis pour produire une tonne d’aluminium]

## Diapositive 36:

[**https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9duction**](https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9duction)

**Réduction :** En **chimie minérale**, une réduction est une opération par laquelle on extrait d’un oxyde le métal qu’il renferme, en éliminant l’oxygène.

Du minerai au produit fini, l’aluminium doit subir une série de traitements qui dépendent largement les uns des autres. La figure 1 illustre les principales étapes de production de l’aluminium.

Le *Canada* ne possède aucune mine de *bauxite*

Les réserves mondiales de bauxite s’élèvent à plus de 20 000 millions de tonnes et la production annuelle est d’environ 115 millions de tonnes. 85% des réserves se situent en zone tropicale et font partie des formations latéritiques qui y occupent de vastes surfaces. En 1995, le plus gros producteur mondial était l'Australie, avec 37,4 millions de tonnes, devant la Guinée, avec 16,5 millions de tonnes. Suivent, la Jamaïque (10,9 Mt), le Brésil (7,9 Mt), l’U.R.S.S. (5,7 Mt) et un groupe de pays produisant entre 2,5 et 4,5 Mt (Inde, Chine, Suriname, Yougoslavie, Hongrie, Grèce).

## Diapositive 38 et 39 :

Pour extraire l’alumine de la bauxite, on utilise généralement le procédé Bayer dont les principales étapes sont présentées sur la figure 2[[3]](#footnote-3). Le procédé a subi de nombreuses améliorations depuis sa création, mais demeure toujours un procédé relativement complexe. Il doit, de plus, être adapté à chaque type de bauxite.

La bauxite broyée qui entre dans l’usine en ressort sous forme d’alumine, une substance chimique constituée d’aluminium et d’oxygène fermement liés, prête à subir la prochaine étape qui est celle de l’électrolyse. L’alumine se présente alors sous forme de fine poudre blanche. Il faut 2 à 3 kg de bauxite pour produire 1 kg d’alumine et 1 à 2 kg de résidu. Le résidu prend la forme d’une boue rouge qui est pompée dans d’immenses bassins. Ces boues, qui doivent leur couleur à la présence de l’oxyde de fer, représente un problème environnemental en raison de leur très grande quantité et parce qu’on n’a pas encore trouvé de moyen pour les recycler.

* **Le procédé "Bayer"** mis au point à partir de 1894 à l'usine de Gardanne se résume aux lignes suivantes : on ajoute de la soude (NaOH) à la bauxite broyée. Sous pression et à chaud (entre à 200-250 0C), pendant plusieurs heures, on dissout l'alumine pour former de l'aluminate de sodium (NaAlO2) tandis que les impuretés précipitent. On sépare, ensuite, les déchets insolubles ("boues rouges").  On introduit un peu d'alumine hydraté (Al(OH)3 ) comme germes de cristallisation dans cette solution et on refroidit. Lors du refroidissement, les cristaux d'oxyde d'aluminium (Al₂O₃ ) se séparent de la soude (NaOH) et précipitent. On déshydrate, enfin, ces cristaux par calcination vers 1200 degrés pour obtenir de l'alumine pure à 99%.

Lexiver: Faire passer lentement un liquide à travers une poudre pour en extraire les produits solubles

## Diapositive 41 :

L’alumine est transportée par convoyeur à l’usine de réduction, communément appelée aluminerie, si cette dernière est située à proximité de l’usine de traitement du minerai, ou elle est expédiée par rail ou par mer. La plupart des alumineries utilisent le procédé Hall-Héroult pour finalement transformer l’alumine en aluminium.

Les alumineries sont de très longues usines qui alignent plusieurs cellules électrolytiques que traverse un courant continu pouvant être aussi élevé que 300 000 A. chaque cuve comprend deux parties principales. Une électrode négative, appelée cathode, qui est constituée d’un caisson d’acier revêtu à l’intérieur d’un produit réfractaire et de carbone, et une électrode positive, appelée anode, qui est faite d’un bloc de brai (une substance pâteuse et collante) et de coke de pétrole cuits ensemble. Les cuves varient en grosseur, mais leurs dimensions sont d’environ 6 m de longueur par 2 m de largeur et 1 m de profondeur. L’anode est suspendue dans l’électrolyte en fusion que contient la cuve formée par la cathode.

* L'alumine est dissoute dans un bain fluoré d'électrolyses entre 940 °C et 960 °C suivant la réaction (simplifiée) suivante :

Al2 O3 → 2 Al 3+ + 3 O2−

* Suivant le principe de l'[électrolyse](https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89lectrolyse), un [courant électrique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Courant_%C3%A9lectrique) continu circule entre l'[anode](https://fr.wikipedia.org/wiki/Anode) (pôle +) et la [cathode](https://fr.wikipedia.org/wiki/Cathode) (pôle -). L’aluminium se forme à la cathode, où il [entre en coalescence](https://fr.wikipedia.org/wiki/Coalescence_%28physique%29) dans une nappe d’aluminium liquide, selon la réaction :

Al3+ + 3 e− → Al   m étal

En pratique, il faut plusieurs milliers d'ampères pour produire une quantité significative d'aluminium : environ 7,65 kg d'aluminium par cellule par jour et par millier d'ampères.

L’aluminium en fusion, au fond de la cuve, est siphonné dans une poche de coulée ou un creuset de transport et est transféré dans des fours de maintien pour y préparer les alliages, ou est coulé immédiatement en lingots d’aluminium pur. On retire l’aluminium de la cuve une fois ou deux par jour, puis on ajoute à nouveau de l'alumine dans un procédé continu fonctionnant le jour et la nuit.

* À l’anode en [carbone](https://fr.wikipedia.org/wiki/Carbone), le [dioxyde de carbone](https://fr.wikipedia.org/wiki/Dioxyde_de_carbone) gazeux se dégage sous forme de grosses bulles qui s’échappent dans l’atmosphère :

2 O2 − + C → CO2 + 4 e−

La réaction globale s'écrit :

2 Al2 O3 ( s o l u t i o n ) + 3 C ( s o l i d e ) → 4 Al ( l i q u i d e ) + 3 CO2 ( g a z )

Le bain est ici considéré comme un électrolyte dans lequel se dissout l'alumine et ne tient aucun rôle dans les réactions.

L’électrolyte, dans lequel est dissoute l’alumine, est composé de cryolithe (Na3AlF6), de fluorure d’aluminium (AlF3) et, bien sûr, d’alumine (Al2O3). Lorsqu’un courant continu circule de l’anode vers la cathode en passant par l’électrolyte, l’alumine se trouve alors décomposée en aluminium et en oxygène. L’aluminium en fusion se dépose sur la cathode, au fond de la cuve, et l’oxygène brûle l’anode pour donner du gaz carbonique (CO2). La température de l’électrolyte se situe entre 940 et 960 °C, alors que le point de fusion de l’aluminium est de 660 °C.

Puisque chaque cuve requiert de 4 à 4,5 volts, il est pratique courante d’aligner plusieurs dizaines de cuves dans des enceintes pouvant excéder un kilomètre de longueur. Les usines modernes ont typiquement 264 cuves en série, sous une tension de 1150 V.

## Diapositive 42 :

Les alumineries sont de très longues usines qui alignent plusieurs cellules électrolytiques que traverse un courant continu pouvant être aussi élevé que 300 000 A.

Chaque cuve comprend deux parties principales : une électrode négative, appelée cathode, qui est constituée d’un caisson d’acier revêtu à l’intérieur d’un produit réfractaire et de carbone, et une électrode positive, appelée anode, qui est faite d’un bloc de brai et de coke de pétrole cuits ensemble. Les cuves varient en grosseur, mais leurs dimensions sont d’environ 6 m de longueur par 2 m de largeur et 1 m de profondeur. L’anode est suspendue dans l’électrolyte en fusion que contient la cuve formée par la cathode.

Puisque chaque cuve requiert de 4 à 4,5 volts, il est pratique courante d’aligner plusieurs dizaines de cuves dans des enceintes pouvant excéder un kilomètre de longueur. Les usines modernes ont typiquement 264 cuves en série, sous une tension de 1150 V.

## Diapositive 44 :

L’aluminium en fusion, au fond de la cuve, est siphonné dans une poche de coulée ou un creuset de transport et est transféré dans des fours de maintien pour y préparer les alliages, ou est coulé immédiatement en lingots d’aluminium pur. On retire l’aluminium de la cuve une fois ou deux par jour, puis on ajoute à nouveau de l'alumine dans un procédé continu fonctionnant le jour et la nuit.

## Diapositives 45 et 46 :

**Lingot de laminage par coulée semi-continue verticale (coulée DC)** : ces lingots sont généralement produits en différents alliages dans les centres de coulée des producteurs d’aluminium.

Les plus gros lingots de laminage font normalement 75 pouces (6,25 pied, 1905 mm) en largeur, 48 pouces (4 pied, 1219 mm) en épaisseur et ont une longueur de 144 pouces (12 pied, 3658 mm).

**Direct chill casting (DC casting) :** Traduit de l'anglais - La coulée à froid direct - est une méthode de fabrication de lingots solides cylindriques ou rectangulaires à partir de métaux non ferreux, en particulier l'aluminium, le cuivre, le magnésium et leurs alliages. Les lingots d'origine sont généralement traités ultérieurement par d'autres méthodes.

Afin de mieux répondre à la demande (dimensions, quantités et délais de livraison) l’entreprise PCP Canada offre des blocs et des plaques (alliage 5083-O3) découpés dans des lingots de laminage aussi grands que 96 pouces (8 pied, 2438 mm) en largeur, 48 pouces (4 pied, 1219 mm) en épaisseur et d’une longueur de 288 pouces (24 pied, 7315 mm). <http://www.pcp-canada.com/>

## Diapositive 47 :

**Direct chill casting (DC casting) :** Traduit de l'anglais - La coulée à froid direct - est une méthode de fabrication de lingots solides cylindriques ou rectangulaires à partir de métaux non ferreux, en particulier l'aluminium, le cuivre, le magnésium et leurs alliages. Les lingots d'origine sont généralement traités ultérieurement par d'autres méthodes.

## Diapositive 48:

Composite à matrice métallique: DURALCAN et BORALCAN

Les composites DURALCAN sont une série de particules céramique renforcées par de l’aluminium et qui sont appropriés pour le moulage sous pression à haute pression.

Produits à notre usine de Dubuc, les composites à matrice métallique DURALCAN sont des alliages d'aluminium de haute technologie renforcés de particules. Leur résistance les rend idéaux pour une utilisation en fonderie et des applications à forte usure, telles que les disques de frein, les tambours et les plaquettes ainsi que les goujons de pneus dans l'industrie automobile. D'autres utilisations incluent les applications de mousse, les pistons, les chemises de cylindre, les bras de commande, l'arbre d'entraînement, les composants structurels pour les applications aérospatiales, et bien d'autres.

Les composites à matrice métallique BORALCANTM sont composés d'un alliage d'aluminium auquel a été ajouté du B4C de qualité nucléaire pour être utilisé comme matériau absorbant les neutrons. Les solutions comprennent des bandes laminées ou des formes extrudées pour les paniers de stockage à sec du combustible usé et des bandes laminées pour le blindage des râteliers des piscines humides du combustible usé. Aujourd'hui, nous proposons 4 alliages différents (1100, 6351, 6351CO et notre alliage 3004 nouvellement développé) avec des charges volumiques B4C pouvant aller de 1 % à 33 %.

## Diapositive 53:

La première étape du laminage consiste à nettoyer le lingot (dalle) pour le débarrasser de sa couche d’oxyde et à le chauffer dans un four jusqu’à une température se situant entre 350 et 550°C, en fonction des alliages. Cette étape peut prendre de 7 à 30 heures. Le lingot est ensuite placé entre des rouleaux compresseurs et, dans un mouvement de va-et-vient, il est aminci en diminuant progressivement la distance entre les rouleaux. Lorsque l’épaisseur requise est atteinte, les bords du « lingot », dont la longueur a considérablement augmenté, sont taillés lors de la dernière passe. Les feuilles, qui sont amenées à une épaisseur de 6 mm pour le moment, sont enroulées à cette étape et sont refroidies pendant 24 heures avant d’être laminées à froid, à une température inférieure à 60°C, pour en réduire davantage l’épaisseur. Ce procédé est illustré de façon schématique sur la figure 5a[[4]](#footnote-4).

**LE PRINCIPE DU LAMINAGE**

Le laminage est un processus continu qui consiste à réduire l’épaisseur d’une plaque de métal par passages successifs entre des cylindres, opérations au cours desquelles l’aluminium est à la fois écrasé et étiré. Partant de la plaque de fonderie, d’une épaisseur d’environ 50 cm, on peut ainsi obtenir des bandes d’aluminium de quelques microns d’épaisseur. La production de laminés d’aluminium s’effectue selon deux phases principales, le laminage d’ébauche à chaud et le laminage de finition à froid.

**LE LAMINAGE D’EBAUCHE** : Pratiqué à chaud à environ 500 °C, il permet de réduire rapidement les épaisseurs des plaques de fonderie de 60 cm à 3mm.

**LE LAMINAGE DE FINITION** : Il est réalisé à température ambiante, et permet d’obtenir des tôles ou bandes d’aluminium avec une grande précision au niveau des caractéristiques dimensionnelles, de l’homogénéité de la structure de l’alliage et de la qualité de surface souhaitée par le client.

L’ensemble des opérations mobilise des matériels et des technologies de pointe traitant des lots d’alliage importants, de plus de 10 tonnes par bobine laminée.

Les bobines issues du laminage subissent des opérations de parachèvement : cisaillage, refendage, sciage, traitements thermiques, planage, contrôles, qui aboutissent aux demi-produits utilisés par les transformateurs. Les principaux secteurs d’application du laminage de l’aluminium sont : les transports, l’emballage, le bâtiment, les équipements domestiques ainsi que les constructions mécaniques et électriques.

**UN PROCESSUS COMPLEXE**

Le laminage à chaud demande une grande maîtrise des températures de l’alliage en cours de processus, une exigence qui a impliqué la mise au point de techniques de refroidissement sophistiquées pour les cylindres. Des émulsions lubrifiantes, savamment élaborées et choisies, vont conditionner l’entraînement du métal entre les cylindres ainsi que l’état de surface de l’alliage laminé. Les opérations de laminage nécessitent des systèmes de régulation très complexes qui agissent simultanément sur l’écartement des cylindres, sur la retenue du débobinage et la traction de bobinage ou l’accélération de la vitesse de laminage. Les défauts d’épaisseur ou de planéité sont détectés par des capteurs électroniques ultrasensibles qui permettent de corriger très rapidement les réglages. Chaque laminoir possède en outre un certain nombre d’outils auxiliaires pour cisailler les extrémités et les rives des produits laminés, ainsi que pour embobiner, dérouler, convoyer et évacuer les bobines d’aluminium. À ce stade, l’automatisation et l’informatisation des laminoirs permettent d’optimiser leurs possibilités en productivité et précision.

## Diapositive 54 :

La grande force de compression requise en laminage est répartie le long du cylindre. Elle engendre une flexion qui va produire un jeu plus grand au centre qu’aux extrémités qui sont en appui sur une cage rigide. La réduction d’épaisseur sera donc plus faible au centre qu’au bord de la tôle. Puisque l’allongement est directement proportionnel à la réduction d’épaisseur, la partie centrale va s’allonger un peu moins que les bords. Les bords de la tôle retenus par une partie centrale plus courte vont se voiler et rendre le produit inacceptable. Pour pallier à cette déflexion, en particulier avec des cylindres plus longs et de petit diamètre, on va utiliser des cylindres d’appui pour supporter les cylindres de travail. Les laminoirs à 6 cylindres ou plus vont de plus empêcher les déflexions des petits cylindres de travail dans le plan parallèle à celui de la tôle. Cette déflexion se produirait en réaction aux forces ***Fcx*** et ***Fux***.

## Diapositive 56 :

La technique d’extrusion la plus conventionnelle consiste à exercer une pression continue sur une billette cylindrique préchauffée à une température se situant autour de 450°C, de façon à forcer son passage dans une filière profilée qui lui donnera la forme de section voulue. Le procédé est schématisé sur la figure 5b[[5]](#footnote-5). La pression peut facilement dépasser les 800 MPa dans les grosses presses. On comprendra alors que les machines à extruder sont de dimensions appréciables.

Le procédé d’extrusion fait de l’aluminium un matériau extrêmement versatile pour des applications structurales. Il permet d’obtenir, avec une relative facilitée, des profilés taillés sur mesure pour les besoins du concepteur. Le grand avantage de l’extrusion est la capacité de placer le métal là où il est requis (voir figure 6a[[6]](#footnote-6)).

Les extrusions sont de forme constante sur leur longueur bien qu'il soit possible d’extruder des sections fuselées. Leur section peut être simple ou très complexe, pleine ou creuse, ou même contenir plusieurs cavités. De plus, les propriétés intrinsèques de l’alliage extrudé sont entièrement conservées. La pièce extrudée peut être pliée, forgée, machinée ou soudée. Les profilés structuraux extrudés peuvent donc remplir différentes fonctions, tel qu'illustré sur la figure 6[[7]](#footnote-7). **Certains profilés en I et en C, ainsi que quelques cornières et tubes d’utilisation courante sont standards, mais la plupart des sections sont produites sur demande**. Les extrudeurs gardent des matrices en inventaire, mais elles sont le plus souvent réservées à un client. Le coût de fabrication d’une matrice en acier à haute résistance est généralement abordable et peut facilement être absorbé en fonction du volume d’extrusions requis. Les sections extrudées sont toutefois limitées aux dimensions de la filière ou matrice, qui est de forme circulaire sur son contour pour être compatible avec les billettes qui sont cylindriques. Chaque presse possède ce qu'il est convenu d'appeler un cercle d’extrusion utilisable. Il existe plusieurs presses de 254 (10’’) mm ou moins de diamètre de cercle utilisable et un nombre plus limité de presses de 305 mm (12’’). La plus grosse presse en Amérique du Nord permet de produire des profilés dont la section est contenue dans un cercle de 786 mm de diamètre (31’’). Le concepteur est donc avisé d’entrer en contact avec les extrudeurs pour connaître les limites physiques des sections qu'il entend utiliser ou créer avant d’aller trop loin dans ses calculs.

## Diapositive 57 :

Tecxalex (presse de 3000 tonnes, 230 mm de diamètre 9’’)

Dans une publication du 17 août 2017, la plus grande presse d’extrusion au monde est introduite par le groupe Zhongwang, presse qui possède une capacité de 225MN.

En outre, en 2009, le groupe a mis en service la première presse double action d’extrusion de l’aluminium de capacité 125MN et qui fonctionne à l’huile. Cette presse, qui était la plus large à ce moment, permettait de fournir aux clients des produits transformés en aluminium de grande section et à haute valeur ajoutée et ainsi accroître significativement le cœur de compétitivité du Groupe. Aujourd'hui, le Groupe présente à nouveau la plus grande presse d'extrusion d'aluminium 225MN au monde.

Pexal Tecalum Canada est une entreprise canadienne issue d’un partenariat international avec l’entreprise espagnole Tecalum, qui œuvre dans la fabrication d’extrusions d’aluminium depuis plus de 40 ans. Ce partenariat a permis de réaliser un transfert technologique et de bénéficier de l’expérience et du savoir-faire d’une entreprise reconnue mondialement.

## Diapositive 58 et 59 :

Le procédé d’extrusion fait de l’aluminium un matériau extrêmement versatile pour des applications structurales. Il permet d’obtenir, avec une relative facilitée, des profilés taillés sur mesure pour les besoins du concepteur. Le grand avantage de l’extrusion est la capacité de placer le métal là où il est requis (voir figure 6a[[8]](#footnote-8)).

Les extrusions sont de forme constante sur leur longueur bien qu'il soit possible d’extruder des sections fuselées. Leur section peut être simple ou très complexe, pleine ou creuse, ou même contenir plusieurs cavités. De plus, les propriétés intrinsèques de l’alliage extrudé sont entièrement conservées. La pièce extrudée peut être pliée, forgée, machinée ou soudée. Les profilés structuraux extrudés peuvent donc remplir différentes fonctions, tel qu'illustré sur la figure 6[[9]](#footnote-9). **Certains profilés en I et en C, ainsi que quelques cornières et tubes d’utilisation courante sont standards, mais la plupart des sections sont produites sur demande**. Les extrudeurs gardent des matrices en inventaire, mais elles sont le plus souvent réservées à un client. Le coût de fabrication d’une matrice en acier à haute résistance est généralement abordable et peut facilement être absorbé en fonction du volume d’extrusions requis. Les sections extrudées sont toutefois limitées aux dimensions de la filière ou matrice, qui est de forme circulaire sur son contour pour être compatible avec les billettes qui sont cylindriques. Chaque presse possède ce qu'il est convenu d'appeler un cercle d’extrusion utilisable. Il existe plusieurs presses de 254 mm ou moins de diamètre de cercle utilisable et un nombre plus limité de presses de 305 mm. La plus grosse presse en Amérique du Nord permet de produire des profilés dont la section est contenue dans un cercle de 786 mm de diamètre. Le concepteur est donc avisé d’entrer en contact avec les extrudeurs pour connaître les limites physiques des sections qu'il entend utiliser ou créer avant d’aller trop loin dans ses calculs.

## Diapositive 64 :

[Raufoss, une division de Neuman Aluminium qui compte plus de 2 400 employés, est un leader dans la conception, le développement et la fabrication de composantes de suspension légères en aluminium pour l’industrie automobile. Notre groupe, basé en Autriche, est détenu par des intérêts privés familiaux et possède au-delà de 200 ans d’expérience dans la production de solutions en aluminium à grande valeur ajoutée.]

*Raufoss*, une division de Neuman Aluminium. ... Avec nos établissements de Boisbriand (Boisbriand est une ville située à l'entrée des Basses-Laurentides dans la MRC de Thérèse-De Blainville, au Québec, Canada)

Le forgeage par pressage consiste, pour sa part**, à placer le lingot d’aluminium préchauffé** entre les deux parties d’une matrice et à exercer sur cette dernière une pression uniforme (figure 7a[[10]](#footnote-10)). **On utilise des presses mécaniques** de 2,5 à 90 MN, qui exercent une pression de 200 à 500 MPa, selon les alliages, la forme et la masse de la pièce, **ou des presses hydrauliques** de 4 à 445 MN. Les presses mécaniques permettent la fabrication de petites pièces de l’ordre de 0,5 à 30 kg, alors que les presses hydrauliques sont utilisées pour la fabrication de pièces plus massives et plus complexes, pouvant atteindre les 1400 kg et mesurer jusqu’à 7000 mm. Les presses hydrauliques permettent aussi la fabrication de petites pièces ou de pièces minces.

**Forgeage (Forging)** Méthode pour former des objets consistant à presser dans une matrice un lingot chaud ou une ébauche d’un matériau semi-ouvré.

**Forgeage à froid (Cold forging)** Forgeage d’un métal chauffé en dessous de sa température de recristallisation.

**Forgeage liquide (Squeeze casting)** Procédé de moulage utilisant la pression durant la période de solidification du métal pour produire une amélioration des propriétés mécaniques de la pièce.

La résistance minimale des pièces forgées par martelage n’est pas garantie, à moins d’être spécifiée. Puisque le forgeage par pressage permet un meilleur contrôle, il est plus souvent utilisé pour les applications structurales. Les formes complexes des pièces forgées sont semblables à celles des pièces coulées, mais les pièces forgées ont des propriétés plus uniformes et, généralement, une meilleure ductilité, du moins dans la direction parallèle aux grains. Les procédés modernes de forgeage permettent la production de pièces de dimensions très précises avec des alliages de haute résistance, ce qui est une exigence pour la construction de pièces critiques pour les avions. Les charpentes d’avion et les roues d’automobiles sont des exemples classiques d’utilisation de pièces forgées, tout comme le sont certains éléments d’assemblage dans les structures de bâtiments. Les pièces forgées sont enfin plus dispendieuses que les pièces coulées, mais deviennent un choix attrayant lorsqu’une quantité appréciable de pièces doit être produite ou lorsque la résistance et la ductilité sont des considérations importantes.

## Diapositive 65:

La plus grosse presse de forgeage au monde fabriquée par China National Erzhong Group possède une capacité de 800MN.

## Diapositive 66:

<http://aluquebec.com/fr/procedes-transformation/forge>

**Forge**

L’aluminium forgé permet de créer des pièces en trois dimensions offrant une plus grande résistance et une intégrité accrue. L’aluminium y est pressé, pilonné ou serré à fortes pressions, à chaud ou à froid. Trois procédés permettent de produire différents types de pièces. Le forgeage libre (open-die forging) est idéal pour créer des composantes de grande dimension, le forgeage avec matrice (closed-die forging) convient aux designs plus complexes et précis, tandis que le laminage circulaire (ring-rolled forging) sert à produire des pièces circulaires très résistantes. Les pièces produites par forgeage sont toutes désignées pour les utilisations où la performance, la résistance et la sécurité sont recherchées, comme dans le cas de véhicules devant diminuer leur poids pour de meilleures performances énergétiques.

**Offre de services québécoise**

Raufoss Canada est un leader du forgeage à chaud avec matrice qui se spécialise dans la fabrication de pièces automobiles. Son procédé unique *Extruform* combine la forge et l’extrusion en utilisant des pièces extrudées avec creux qui sont ensuite forgées vers leur forme finale.

## Diapositive 67 :

Le procédé de fonderie permet la réalisation d’un grand nombre de pièces différentes. Ce procédé consiste à placer le métal en fusion à l’intérieur d’un moule ayant la forme de la pièce désirée. Il existe présentement trois types de moulage pour la fonderie d’aluminium, les différences résidant dans le type de moule et dans la façon dont le métal est placé dans le moule : le moulage au sable, le moulage dans des moules permanents et le moulage sous pression. Ce dernier permet la production en série de pièces aux dimensions très précises.

Le **moulage en** [**sable**](https://fr.wikipedia.org/wiki/Sable_%28fonderie%29) utilise un matériau [réfractaire](https://fr.wikipedia.org/wiki/Mat%C3%A9riau_r%C3%A9fractaire) (Un **matériau réfractaire** est un [matériau](https://fr.wikipedia.org/wiki/Mat%C3%A9riau) qui a une forte résistance à un facteur (physique, chimique, biologique) susceptible de le dégrader, le plus souvent la [chaleur](https://fr.wikipedia.org/wiki/Temp%C3%A9rature). Par exemple, un [four à pain](https://fr.wikipedia.org/wiki/Four_%C3%A0_pain) peut être fait de [briques réfractaires](https://fr.wikipedia.org/wiki/Brique_r%C3%A9fractaire)) et qui se présente sous la forme de petits grains ; on peut donc lui donner la forme que l'on veut, et figer cette forme avec un additif. Cela en fait un matériau de choix pour la conception de [moules](https://fr.wikipedia.org/wiki/Moule_%28outil%29) ; cependant, c'est un moule à usage unique, mais que l'on peut fabriquer facilement de manière répétée.

Les moules en sable sont réalisés à la main, la coulée est, elle aussi, manuelle. De ce fait, les pièces réalisées ont un coût beaucoup plus élevé que dans le cas d'une fonderie "série", beaucoup plus automatisée.

Le moulage au sable fait appel à des moules de sable qui sont utilisés une seule fois pour couler une pièce. Le procédé est plus lent que les deux autres, mais il est intéressant lorsqu'il n’y a qu’un petit nombre de pièces à réaliser et que la forme est particulièrement complexe. Les moules de sable sont aussi beaucoup moins coûteux que les moules permanents ou les moules sous pression. Les pièces obtenues requièrent, par contre, davantage d’opérations d’usinage après la coulée puisque les dimensions du moule sont moins précises. La résistance des pièces, pour sa part, est quelque peu inférieure à celle des pièces obtenues par d’autres procédés, en raison du taux plus lent de solidification du métal. On est ainsi parvenu à couler des pièces aussi lourdes que 3200 kg, en comparaison de 180 kg avec des moules permanents.

**Moulage à la cire perdue (Investment casting)** Coulée d’un métal dans un moule dont l’empreinte est laissée par un modèle de l’objet en cire éliminée par fusion (cire perdue).

C’est un procédé de [moulage](https://fr.wikipedia.org/wiki/Moulage) de précision, pour obtenir une sculpture en métal (tel que argent, or, bronze, cuivre, aluminium) à partir d'un [modèle](https://fr.wikipedia.org/wiki/Mod%C3%A8le) en [cire](https://fr.wikipedia.org/wiki/Cire). Ce modèle en cire sera ensuite éliminée par chauffage pendant l'opération. Il faut donc l'envelopper dans une matière réfractaire et permettre au métal ou au verre de prendre la place de la cire, par des entonnoirs et des conduits, après qu'elle s'est écoulée par d'autres conduits.

**Moulage à mousse perdue (Lost-foam casting)**

C’est une variété de moulage au sable utilisant une mousse de polystyrène comme forme. Lorsque le métal liquide pénètre dans le moule au sable, la forme en mousse de polystyrène s’évapore.

Le moulage à la mousse perdue permet de fabriquer des pièces comprenant des cavités internes de géométrie complexe que les autres techniques de moulage ne peuvent produire qu’avec difficulté.

**Moulage au sable de précision (Precision sand casting)**

Les technologies de moulage au sable de précision assurent une meilleure qualité et une constance accrue du produit. L’inversion du moule permet aux trappes d’agir en tant que masselottes.

Ces procédés ont permis d’augmenter la production de façon substantielle tout en produisant des moulages plus légers.

## Diapositive 68 :

La technique des moules permanents consiste simplement à couler, par gravité, le métal fondu dans des moules d’acier réutilisables, aussi appelés coquilles. Ces moules sont plus coûteux que les moules de sable, mais ils permettent d'atteindre des tolérances plus élevées et de produire des pièces aussi minces que 2,3 mm.

Le moulage sous pression s’apparente à celui des moules permanents puisqu'il fait aussi appel à des moules réutilisables en acier. La différence réside dans la façon dont l’aluminium en fusion est inséré dans le moule. Dans ce cas-ci, le métal est injecté sous pression et à très haute vitesse, ce qui permet, par ce procédé, de produire en série de petites et moyennes pièces de dimensions très précises. Le taux de solidification des pièces ainsi fabriquées est rapide. La figure 7b[[11]](#footnote-11) présente un exemple de moulage sous pression.

Centre de métallurgie du Québec (*CMQ*) à Trois-Rivières : moulage sous pression

Moulage sous pression traditionnel

Moulage sous pression sous vide incluant le moulage sous vide pour applications structurales

Moulage sous pression semi solide, beaucoup moins répandu.

## Diapositive 69 :

Le moulage sous pression s’apparente à celui des moules permanents puisqu'il fait aussi appel à des moules réutilisables en acier. La différence réside dans la façon dont l’aluminium en fusion est inséré dans le moule. Dans ce cas-ci, le métal est injecté sous pression et à très haute vitesse, ce qui permet, par ce procédé, de produire en série de petites et moyennes pièces de dimensions très précises. Le taux de solidification des pièces ainsi fabriquées est rapide. La figure 7b[[12]](#footnote-12) présente un exemple de moulage sous pression.

## Diapositive 70 :

**Moulage (Shape casting)** Pièce obtenue par coulée d’un alliage liquide dans un moule.

**Moulage à la cire perdue (Investment casting)** Coulée d’un métal dans un moule dont l’empreinte est laissée par un modèle de l’objet en cire éliminée par fusion (cire perdue).

C’est un procédé de [moulage](https://fr.wikipedia.org/wiki/Moulage) de précision, pour obtenir une sculpture en métal (tel que argent, or, bronze, cuivre, aluminium) à partir d'un [modèle](https://fr.wikipedia.org/wiki/Mod%C3%A8le) en [cire](https://fr.wikipedia.org/wiki/Cire). Ce modèle en cire sera ensuite éliminée par chauffage pendant l'opération. Il faut donc l'envelopper dans une matière réfractaire et permettre au métal ou au verre de prendre la place de la cire, par des entonnoirs et des conduits, après qu'elle s'est écoulée par d'autres conduits.

**Moulage à mousse perdue (Lost-foam casting)**

C’est une variété de moulage au sable utilisant une mousse de polystyrène comme forme. Lorsque le métal liquide pénètre dans le moule au sable, la forme en mousse de polystyrène s’évapore.

Le moulage à la mousse perdue permet de fabriquer des pièces comprenant des cavités internes de géométrie complexe que les autres techniques de moulage ne peuvent produire qu’avec difficulté.

**Moulage au sable de précision (Precision sand casting)**

Les technologies de moulage au sable de précision assurent une meilleure qualité et une constance accrue du produit. L’inversion du moule permet aux trappes d’agir en tant que masselottes.

Ces procédés ont permis d’augmenter la production de façon substantielle tout en produisant des moulages plus légers.

**Moulage basse pression (Low pressure die casting)**

Procédé similaire au procédé de coulée semi-continue, sauf qu’un niveau de pression plus bas est utilisé pour forcer le métal à l’intérieur d’une matrice. La coulée de pièces à basse pression est spécialement conçue pour la fabrication de composantes asymétriques autour d’un axe de rotation.

**Moulage en** **coquille** (**Permanent** **mould casting)**

Produit moulé dans un moule en métal suivant un procédé par lequel le métal en fusion est introduit par gravité ou alimenté par basse pression - ISO.

**Moulage en sable** **vert** (**Green sand** **casting)**

Procédé caractérisé par l’emploi de sable de moulage à liant argileux dont le durcissement est obtenu uniquement par l’intensité du serrage avant démoulage.

**Moulage haute** **pression** (**High pressure** **die casting)**

Procédé de moulage de l’aluminium le plus répandu. Les cycles sont très rapides. Le taux d’utilisation du métal est très élevé, ce qui génère très peu de rebuts. Ce procédé permet la fabrication de pièces moulées très complexes et détaillées. Le procédé est hautement automatisé, il est utilisé dans la fabrication de pièces à petit ou à grand volume.

**Moulage** **semi-solide** (**Semi-solid** **die casting)**

Procédé similaire au moulage à haute pression mais basé sur l’utilisation de matières premières d’alimentation semi-solides.

## Diapositive 72 :

La disponibilité des produits d’aluminium est très variable, d’un pays à l’autre, ou d’une région à l’autre. L’industrie de l’aluminium ne garde pas en réserve de grandes quantités de profilés standards, comme le fait l’industrie de l’acier. Le concepteur doit donc entrer en contact avec certains fournisseurs, ou directement avec les manufacturiers, pour s’approvisionner en produits d’aluminium. Le plus souvent, les produits seront fabriqués sur commande pour chaque application. Les procédés décrits plus haut se prêtent bien à des commandes à la pièce, surtout le procédé d’extrusion.

**Treillis en aluminium**

Nos produits de soudage par friction ont été adoptés pour les grandes structures en treillis en aluminium.

**L'immense dôme de verre de la place Est de la gare de Kanazawa**

Cette structure est l'une des plus grandes structures en treillis en aluminium au Japon. La surface brute sur le toit et le mur est d'environ 6500 mètres carrés et le poids brut est d'environ 800 tonnes. La toute dernière technologie de traitement de l'aluminium est utilisée pour chaque composant.

Le monument du carillon devant la gare ferroviaire Hankyu de Toyonaka à Osaka.

1156 trusses are used.  The material is Aluminum (A 6061-T6).

Copyright(C)2000-2017 Seimitsu Kogyo Ltd.

# Désignation des alliages

## Diapositive 75 :

Selon la classification de l’Aluminum Association des États-Unis, on distingue des alliages de corroyage et des alliages de fonderie (figure 4[[13]](#footnote-13)). Les alliages de corroyage sont obtenus en travaillant des lingots ayant des formes particulières. Ce travail peut se faire par laminage, extrusion, tréfilage ou forgeage. La façon dont le métal se déforme plastiquement est une caractéristique importante des alliages de corroyage. Les produits sont disponibles sous forme de plaques, feuilles, tubes, profilés, fils, barres et produits forgés. Les alliages de fonderie sont obtenus en fondant les lingots et en les coulant dans des moules ayant les formes du produit final. La façon dont le métal se répand dans le moule et la façon dont il se solidifie sont des caractéristiques importantes de ces matériaux.

La différence principale entre ces deux classes d’alliages réside dans les éléments ajoutés à l’aluminium de base. Dans les alliages de fonderie, les éléments sont généralement présents en quantités plus importantes, principalement pour faciliter le procédé de fonderie.

La désignation des alliages de corroyage telle que nous la connaissons aujourd’hui a été adopté aux États-Unis en 1954, pour devenir la norme nationale américaine en 1957. Ce n’est qu’en 1970 que la désignation à 4 chiffres de l’organisation américaine *Aluminium Association (AA)* a officiellement été adoptée par les organisations signataires de la *Déclaration d’accord sur un système de désignation internationale pour l’aluminium corroyé et ses alliages*. Une trentaine de pays sont signataires de cet accord, dont le Canada

La limite élastique et la résistance, spécialement en fatigue, de la plupart des pièces moulées sont inférieures à celles des produits corroyés. La cause provient, principalement, de l’incapacité des procédés actuels à prévenir les défauts de moulage de façon efficace. Toutefois, depuis les dernières années, les innovations dans les alliages et les procédés de moulage ont apporté des améliorations significatives. Celles-ci devront d’ailleurs être prises en considération lors des mises à jour des normes qui s’y rattachent.

## Diapositive 78 :

* Le magnésium et le silicium dans la série 6000 forment le composé intermétallique Mg2Si qui est traité comme un élément d'alliage simple.

Les alliages de corroyage comportent quatre chiffres alors que ceux de fonderie comportent trois chiffres du côté gauche de la décimale et un seul du côté droit. Le premier chiffre représente, dans les deux cas, l’ingrédient principal de l’alliage. Il correspond à environ 5 % ou moins de la composition des alliages de corroyage et 5 % ou plus de la composition des alliages de fonderie. La plupart des alliages contiennent de deux à quatre autres éléments en quantités moins importantes. Ces éléments ont un effet sur les caractéristiques mécaniques du matériau. Ils permettent d’augmenter la résistance mécanique du matériau. Ils permettent d’augmenter la résistance mécanique de l’alliage, sa résistance à la corrosion, sa dureté ou de faciliter sa fabrication.

Le premier chiffre indique l’élément d’alliage le plus important (Xxxx). Il est également utilisé pour désigner les différentes séries d’alliages d’aluminium telles que séries 1000, 2000 jusque 8000. Le deuxième chiffre (xXxx), s ’il n’est pas nul, indique s’il y a eu modification de l’alliage spécifique. Les troisième et quatrième chiffres identifient un alliage spécifique dans la série (les deux derniers chiffres servent à différencier les alliages d’une même série)

Par ex. pour l’alliage 5183, le chiffre 5 indique qu’il s’agit d’un alliage de magnésium, le chiffre 1 indique qu’il s’agit de la première modification par rapport à l’alliage originel 5083 et le nombre 83 identifie l’alliage dans la série 5xxx.

La seule exception dans ce système est la série 1xxx (aluminium pur) où les deux derniers chiffres donnent la teneur en aluminium minimale au-dessus de 99 %. **L’alliage 1350** contient donc au moins 99,50 % d’aluminium. L’alliage 1098 contient 99,98 % aluminium.

(Si le deuxième chiffre est zéro, il désigne un grade d’aluminium qui contient des impuretés que l’on trouve naturellement dans l’aluminium, comme le fer et le silicium (c.à.d. que les impuretés de Al ne font pas l’objet d’un contrôle individuel). Les nombres entiers 1 à 9 indiquent des contrôles spéciaux d’un ou plusieurs éléments d’alliage ou impuretés)

[*https://ceal-aluquebec.com/alliage-et-application/*](https://ceal-aluquebec.com/alliage-et-application/)

***L’aluminium pur commercial***

**Série 1000**

Les alliages de la série 1000 sont constitués d’aluminium pur à 99% ou plus. Cette série présente une excellente résistance à la corrosion, une excellente maniabilité, ainsi qu’une haute conductivité thermique et électrique. Les alliages communs dans cette série sont le 1100 pour les conducteurs électriques et objets décoratifs, le 1050 pour les échangeurs de chaleur et les casseroles et le **1350, pour les applications électriques**.

* 8XXX Autres éléments comme les alliages aluminium Lithium **8090**

**Composite à matrice métallique : DURALCAN et BORALCAN**

Les composites DURALCAN® sont une série de matériaux en aluminium renforcés de particules de céramique qui conviennent bien aux moulages sous haute pression.

Produits à notre usine de Dubuc, les composites à matrice métallique DURALCAN sont des alliages d'aluminium de haute technologie renforcés de particules. Leur résistance les rend idéaux pour une utilisation en fonderie et des applications à forte usure, telles que les disques de frein, les tambours et les plaquettes ainsi que les goujons de pneus dans l'industrie automobile. D'autres utilisations incluent les applications de mousse, les pistons, les chemises de cylindre, les bras de commande, l'arbre d'entraînement, les composants structurels pour les applications aérospatiales, et bien d'autres.

Les composites à matrice métallique BORALCAN sont composés d'un alliage d'aluminium auquel a été ajouté du B4C de qualité nucléaire pour être utilisé comme matériau absorbant les neutrons. Les solutions comprennent des bandes laminées ou des formes extrudées pour les paniers de stockage à sec du combustible usé et des bandes laminées pour le blindage des râteliers des piscines humides du combustible usé. Aujourd'hui, nous proposons 4 alliages différents (1100, 6351, 6351CO et notre alliage 3004 nouvellement développé) avec des charges volumiques B4C pouvant aller de 1 % à 33 %.

## Diapositive 79 :

* Pour la série 1XXX des alliages de corroyage, si le deuxième chiffre est zéro, il désigne un grade d’aluminium qui contient des impuretés que l’on trouve naturellement dans l’aluminium, comme le fer et le silicium ... Les nombres entiers 1 à 9 indiquent des contrôles spéciaux d’un ou plusieurs éléments d’alliage ou impuretés.

Il ne s'agit pas à proprement parler d'alliage puisqu'il s'agit de nuances, en principe sans ajout d'éléments. Cependant, les différentes nuances de la série 1000 se distinguent par la présence plus ou moins importante d'impuretés. Souvent, le troisième chiffre indique le degré de pureté en donnant la valeur de la première décimale à ajouter à 99 % (exemple : l'alliage 1050 contient 99,5 % d'aluminium).

Parmi ces nuances, l'alliage 1050 est le plus représenté. Il est utilisé dans de très nombreuses applications et souvent pour des applications de grande consommation : cuve, échangeur, bardage pour bâtiment, emballage, matériel ménager.

Les alliages dits raffinés contiennent plus de 99,99 % d'aluminium. Ils trouvent leurs applications principales dans l'industrie de l'électronique ou de l'optique : condensateur, microprocesseur mais également dans la fabrication de pièces de réflexion. Dans ces deux cas, la présence d'impuretés peut provoquer des erreurs ou des pannes. Un des représentants de cette classe d'alliage est le 1199.

* Un alliage (autre que 1xxx) est constitué de trois types d’additions : les **éléments d’alliage**, qui déterminent la famille de l’alliage ; les **additions**, qui sont ajoutées pour modifier certaines propriétés ; les **impuretés**.

**2.1 Éléments d’alliage**

Ils déterminent la nature des familles d’alliages d’aluminium et leurs propriétés communes de base. Ils sont au nombre de 5 : le cuivre ; le manganèse ; le silicium ; le magnésium ; le zinc.

**2.2 Additions**

Ces éléments sont ajoutés en plus faible quantité, généralement moins de 1 %, pour : **améliorer certaines propriétés**, telles que la trempabilité ; **réduire la criquabilité au soudage** (fissures dans le cordon de soudure) qui est due au retrait volumique du lit de fusion du cordon de soudure lors du refroidissement ; **faciliter la fragmentation des copeaux lors de l’usinage** ; etc.

Il peut y avoir plusieurs éléments d’addition dans certains alliages. Il en est ainsi du 2017A qui contient du silicium, du manganèse et du magnésium, du titane et/ou du zirconium.

Parmi les additions les plus courantes, le chrome, le titane, le manganèse et le zirconium forment des **secondes phases**, **appelées « dispersoïdes »**, dont le rôle est de contrôler la température de recristallisation et la taille des grains.

**2.3 Impuretés**

Par principe, les « impuretés » sont des éléments (métaux, autres éléments ou composés, par exemple des oxydes) dont la présence n’est pas due à un ajout volontaire lors de la production d’un métal ou d’un alliage donné.

Le fer et le silicium sont les deux impuretés majeures présentes dans l’aluminium. Ils proviennent de la bauxite, minerai duquel on extrait l’alumine Al2O3. On les retrouve dans le métal issu de l’électrolyse ignée de l’alumine, appelé « métal primaire » dont la teneur totale « % Fe + % Si » détermine le titre de l’aluminium non allié, lequel varie, de quelques ppm pour le métal raffiné, à 2 000-3 000 ppm pour le métal issu de l’électrolyse (cf. Encadré **2**).

**Encadré 2 – Précisions complémentaires** Sauf ajout volontaire de fer ou de silicium, le **rapport Fe/Si** est toujours voisin de 2 dans les alliages d'aluminium.

Les **bauxites** contiennent 45 à 60 % d'alumine All2O3 plus de l'oxyde de fer Fe3O4, de la silice, SiO2 et de l'oxyde de titane TiO2, en quantité variable suivant l'origine du minerai.

Le métal issu de l'électrolyse ignée de l'alumine est couramment appelé « **métal primaire** » par opposition au métal de seconde fusion provenant principalement du recyclage des pièces en aluminium en fin de vie.

**Le fer et le silicium ne sont pas les seules « impuretés » trouvées dans l'aluminium**. Cela dépend du niveau de sensibilité et des moyens d'analyse employés : 1 000 ppm, 100 ppm, 1 ppm (cf. tableau [2](https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/metaux-et-alliages-non-ferreux-42357210/metallurgie-de-l-aluminium-m4663/constitution-des-alliages-d-aluminium-m4663niv10002.html)), 1 ppb (partie par milliard (10−9), 1 ppm = 1 000 ppb). La teneur en titane peut atteindre 100 à 200 ppm dans le métal primaire.

La notion d’« impuretés » n'est pas en soi péjorative en ce sens qu'il s'agit d'abord d'un élément qu'on trouve dans l'aluminium tout simplement, parce qu'il provient, soit du minerai, la bauxite, soit est éventuellement associé à une addition volontaire d'un autre métal. La plupart des impuretés mineures, dont la teneur est de l'ordre du *ppm*, sont sans réelle influence connue sur les propriétés des alliages usuels.

Cependant, il y a des exceptions comme **le titane**, **le vanadium**, **qui réduisent notablement la conductibilité électrique de l'aluminium**. Pour améliorer la ténacité des alliages à hautes caractéristiques mécaniques, on contrôle strictement la teneur en fer et en silicium (alliages 7475, par exemple).

* Dans les familles 2 à 8, le 2e chiffre de la nomenclature est réservé aux modifications successives de la composition chimique de l’alliage pour en améliorer les propriétés.

Par exemple, la composition de l’alliage 2024 a été enregistrée en 1954, l’alliage modifié 2124 en 1970, l’alliage 2224 en 1978 et ainsi de suite, chaque altération restant dans les limites permises par la norme

## Diapositive 80 :

* Dans les familles 2 à 8, le 2e chiffre de la nomenclature est réservé aux modifications successives de la composition chimique de l’alliage pour en améliorer les propriétés.

Par exemple, la composition de l’alliage 2024 a été enregistrée en 1954, l’alliage modifié 2124 en 1970, l’alliage 2224 en 1978 et ainsi de suite, chaque altération restant dans les limites permises par la norme

Les % sont des % massique.

Le **pourcentage massique** (**%m(i)**) est une modalité utilisée en chimie et en métallurgie pour désigner la composition d'un mélange ou d'un alliage (c'est-à-dire les proportions de chaque composant dans le mélange). Par division à 100 on obtient la **fraction massique** notée w(i)pour un composant i d'un mélange.

1 %m = 1 g pour 100 g = 1 kg pour 100 kg.

Cette unité est simple à utiliser et à comprendre, elle permet de décrire simplement la manière de fabriquer un mélange : il suffit de peser les composants. Cependant, elle ne reflète pas les proportions du nombre d'atomes ou de molécules ; lorsque cette information est importante, on utilise plutôt les pourcentages atomiques (%a). Ces grandeurs (pourcentage et fraction) sont adimensionnelles.

## Diapositive 84:

Les alliages de corroyage comportent quatre chiffres alors que ceux de fonderie comportent trois chiffres du côté gauche de la décimale et un seul du côté droit. Le premier chiffre représente, dans les deux cas, l’ingrédient principal de l’alliage. Il correspond à environ 5 % ou moins de la composition des alliages de corroyage et 5 % ou plus de la composition des alliages de fonderie. La plupart des alliages contiennent de deux à quatre autres éléments en quantités moins importantes. Ces éléments ont un effet sur les caractéristiques mécaniques du matériau. Ils permettent d’augmenter la résistance mécanique du matériau. Ils permettent d’augmenter la résistance mécanique de l’alliage, sa résistance à la corrosion, sa dureté ou de faciliter sa fabrication

Ce système contient trois chiffres plus une décimale (par ex. 356.0). Le premier chiffre (Xxx.x) désigne l’élément d’alliage principal. Les deuxième et troisième chiffres identifient l’alliage spécifique. Le chiffre après le point indique s ’il s’agit d’une pièce moulée (.0) ou d’un lingot (.1 ou .2)

**Les deuxième et troisième chiffres**

Dans la famille 1XX.X, les 2e et 3e chiffres indiquent le pourcentage en aluminium au-delà de 99 %. Ainsi, l’alliage 170.0, développé principalement pour la fabrication de rotors électriques de petits diamètres, contient au moins 99,70 % d’aluminium dans sa composition.

Dans les autres familles, les 2e et 3e chiffres n’ont aucune signification particulière et servent seulement à identifier les différents alliages dans leur groupe.

**Le quatrième chiffre**

Pour toutes les familles d’alliages de fonderie du tableau 1, la décimale représente la forme de l’alliage. Le « 0 » indique qu’il s’agit d’une pièce coulée; le « 1 » qu’il s’agit d’un lingot, mais dont les limites de composition chimique se rapprochent de la pièce coulée, donc probablement de métal recyclé. Finalement, le « 2 » indique qu’il s’agit d’alliage sous forme de lingot d’aluminium primaire. On peut comprendre ces distinctions grâce au tableau 2 (acétate 87) lequel présente les différentes formes de l’alliage 356.X. En regardant d’abord la composition chimique du 356.2, donc de lingot provenant d’une production primaire, on remarque que les limites de composition sont plus faibles sauf pour le magnésium. Cela s’explique par le fait qu’au cours du recyclage et du procédé de fonderie, certains éléments s’accumulent et d’autres, comme le magnésium, diminuent par perte au feu. Les tolérances de composition reflètent cette réalité.

## Diapositive 85 et 86 :

* Pour la série 1XXX des alliages de corroyage, si le deuxième chiffre est zéro, il désigne un grade d’aluminium qui contient des impuretés que l’on trouve naturellement dans l’aluminium, comme le fer et le silicium ... Les nombres entiers 1 à 9 indiquent des contrôles spéciaux d’un ou plusieurs éléments d’alliage ou impuretés.

Il ne s'agit pas à proprement parler d'alliage puisqu'il s'agit de nuances, en principe sans ajout d'éléments. Cependant, les différentes nuances de la série 1000 se distinguent par la présence plus ou moins importante d'impuretés. Souvent, le troisième chiffre indique le degré de pureté en donnant la valeur de la première décimale à ajouter à 99 % (exemple : l'alliage 1050 contient 99,5 % d'aluminium).

Parmi ces nuances, l'alliage 1050 est le plus représenté. Il est utilisé dans de très nombreuses applications et souvent pour des applications de grande consommation : cuve, échangeur, bardage pour bâtiment, emballage, matériel ménager.

Les alliages dits raffinés contiennent plus de 99,99 % d'aluminium. Ils trouvent leurs applications principales dans l'industrie de l'électronique ou de l'optique : condensateur, microprocesseur mais également dans la fabrication de pièces de réflexion. Dans ces deux cas, la présence d'impuretés peut provoquer des erreurs ou des pannes. Un des représentants de cette classe d'alliage est le 1199.

* Un alliage (autre que 1xxx) est constitué de trois types d’additions : les **éléments d’alliage**, qui déterminent la famille de l’alliage ; les **additions**, qui sont ajoutées pour modifier certaines propriétés ; les **impuretés**.

**2.1 Éléments d’alliage**

Ils déterminent la nature des familles d’alliages d’aluminium et leurs propriétés communes de base. Ils sont au nombre de 5 : le cuivre ; le manganèse ; le silicium ; le magnésium ; le zinc.

**2.2 Additions**

Ces éléments sont ajoutés en plus faible quantité, généralement moins de 1 %, pour : **améliorer certaines propriétés**, telles que la trempabilité ; **réduire la criquabilité au soudage** (fissures dans le cordon de soudure) qui est due au retrait volumique du lit de fusion du cordon de soudure lors du refroidissement ; **faciliter la fragmentation des copeaux lors de l’usinage** ; etc.

Il peut y avoir plusieurs éléments d’addition dans certains alliages. Il en est ainsi du 2017A qui contient du silicium, du manganèse et du magnésium, du titane et/ou du zirconium.

Parmi les additions les plus courantes, le chrome, le titane, le manganèse et le zirconium forment des **secondes phases**, **appelées « dispersoïdes »**, dont le rôle est de contrôler la température de recristallisation et la taille des grains.

**2.3 Impuretés**

Par principe, les « impuretés » sont des éléments (métaux, autres éléments ou composés, par exemple des oxydes) dont la présence n’est pas due à un ajout volontaire lors de la production d’un métal ou d’un alliage donné.

Le fer et le silicium sont les deux impuretés majeures présentes dans l’aluminium. Ils proviennent de la bauxite, minerai duquel on extrait l’alumine Al2O3. On les retrouve dans le métal issu de l’électrolyse ignée de l’alumine, appelé « métal primaire » dont la teneur totale « % Fe + % Si » détermine le titre de l’aluminium non allié, lequel varie, de quelques ppm pour le métal raffiné, à 2 000-3 000 ppm pour le métal issu de l’électrolyse (cf. Encadré **2**).

**Encadré 2 – Précisions complémentaires** Sauf ajout volontaire de fer ou de silicium, le **rapport Fe/Si** est toujours voisin de 2 dans les alliages d'aluminium.

Les **bauxites** contiennent 45 à 60 % d'alumine All2O3 plus de l'oxyde de fer Fe3O4, de la silice, SiO2 et de l'oxyde de titane TiO2, en quantité variable suivant l'origine du minerai.

Le métal issu de l'électrolyse ignée de l'alumine est couramment appelé « **métal primaire** » par opposition au métal de seconde fusion provenant principalement du recyclage des pièces en aluminium en fin de vie.

**Le fer et le silicium ne sont pas les seules « impuretés » trouvées dans l'aluminium**. Cela dépend du niveau de sensibilité et des moyens d'analyse employés : 1 000 ppm, 100 ppm, 1 ppm (cf. tableau [2](https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/metaux-et-alliages-non-ferreux-42357210/metallurgie-de-l-aluminium-m4663/constitution-des-alliages-d-aluminium-m4663niv10002.html)), 1 ppb (partie par milliard (10−9), 1 ppm = 1 000 ppb). La teneur en titane peut atteindre 100 à 200 ppm dans le métal primaire.

La notion d'« impuretés » n'est pas en soi péjorative en ce sens qu'il s'agit d'abord d'un élément qu'on trouve dans l'aluminium tout simplement, parce qu'il provient, soit du minerai, la bauxite, soit est éventuellement associé à une addition volontaire d'un autre métal. La plupart des impuretés mineures, dont la teneur est de l'ordre du *ppm*, sont sans réelle influence connue sur les propriétés des alliages usuels.

Cependant, il y a des exceptions comme **le titane**, **le vanadium**, **qui réduisent notablement la conductibilité électrique de l'aluminium**. Pour améliorer la ténacité des alliages à hautes caractéristiques mécaniques, on contrôle strictement la teneur en fer et en silicium (alliages 7475, par exemple).

* Dans les familles 2 à 8, le 2e chiffre de la nomenclature est réservé aux modifications successives de la composition chimique de l’alliage pour en améliorer les propriétés.

Par exemple, la composition de l’alliage 2024 a été enregistrée en 1954, l’alliage modifié 2124 en 1970, l’alliage 2224 en 1978 et ainsi de suite, chaque altération restant dans les limites permises par la norme

## Diapositive 87 :

* Dans les familles 2 à 8, le 2e chiffre de la nomenclature est réservé aux modifications successives de la composition chimique de l’alliage pour en améliorer les propriétés.

Par exemple, la composition de l’alliage 2024 a été enregistrée en 1954, l’alliage modifié 2124 en 1970, l’alliage 2224 en 1978 et ainsi de suite, chaque altération restant dans les limites permises par la norme

Les % sont des % massique.

Le **pourcentage massique** (**%m(i)**) est une modalité utilisée en chimie et en métallurgie pour désigner la composition d'un mélange ou d'un alliage (c'est-à-dire les proportions de chaque composant dans le mélange). Par division à 100 on obtient la **fraction massique** notée avec w(i)pour un composant i d'un mélange.

1 %m = 1 g pour 100 g = 1 kg pour 100 kg.

Cette unité est simple à utiliser et à comprendre, elle permet de décrire simplement la manière de fabriquer un mélange : il suffit de peser les composants. Cependant, elle ne reflète pas les proportions du nombre d'atomes ou de molécules ; lorsque cette information est importante, on utilise plutôt les pourcentages atomiques (%a). Ces grandeurs (pourcentage et fraction) sont adimensionnelles.

## Diapositive 90, 91 et 92:

Les alliages subissent des traitements métallurgiques qui permettent d’obtenir des caractéristiques mécaniques accrues.

**TRAITEMENT THERMIQUE DES ALLIAGES D’ALUMINIUM**

**Objectif :**

Améliorer la résistance mécanique des alliages d’aluminium par durcissement structural

**Mise en œuvre industrielle :**

Le traitement est réalisé dans un four sous air possédant une très bonne homogénéité de température (de l’ordre de +/- 5°C).

Le refroidissement doit être très rapide. Pour ces raisons, l’eau est souvent utilisée comme milieu de trempe, la charge tombe par gravité dans le bac d’eau.

**Étape de mise en solution :**

Les pièces sont portées à une température déterminée en fonction de la nuance d’alliage d’aluminium (environ 540°C). Comme son nom l’indique, cette étape permet de mettre en solution les différents constituants solubles dans la solution solide.

**Étape de refroidissement (ou trempe) :**

Les pièces sont plongées rapidement dans un bac d’eau thermo régulé. Le temps de transfert et la température de l’eau sont des éléments importants pour une bonne maîtrise du processus : le refroidissement doit être suffisamment rapide pour maintenir la solution solide en sursaturation.

Il est possible d’incorporer un polymère dans l’eau afin de réduire la vitesse de refroidissement et ainsi, diminuer le risque de fissuration ou de déformation.

**Étape de maturation et/ou de revenu :**

La maturation permet une évolution de la structure métallurgique à température relativement basse (souvent température ambiante). Le revenu s’opère à une température supérieure à celle de la maturation.

Le durcissement est effectif pendant cette étape.

Un système de notation approprié est utilisé pour toutes les formes d’alliages de corroyage et de fonderie, sauf pour les lingots prévus pour faire du moulage, ces lingots devant être refondus de toute façon. Même si l’étude des états possibles des alliages est fastidieuse, elle n’en demeure pas moins essentielle pour bien comprendre les caractéristiques des matériaux que l’on utilise. Chaque série d’alliage est suivie d’une lettre (**F, O, H, W** ou **T**) elle-même accompagnée de quelques chiffres. La signification des lettres et des chiffres est la suivante :

**F** : *Tel que fabriqué*. S’applique aux produits transformés sur lesquels aucun traitement thermique ou travail à froid (écrouissage) n’est effectué. Pour les alliages de corroyage, il n’y a pas de limite sur les propriétés mécaniques.

**O** : *Recuit*. S’applique aux alliages de corroyage qui sont recuits pour obtenir l’état le plus doux et aux alliages de fonderie pour améliorer leur ductilité et leur stabilité dimensionnelle. **Le O peut être suivi d’un chiffre autre que zéro, qui indique un produit ayant des caractéristiques particulières**. Le recuit consiste à réchauffer à nouveau le métal et à le laisser refroidir lentement.

**H** : *Écroui (alliages de corroyage seulement).* S’applique aux produits qui ont des propriétés mécaniques augmentées par écrouissage, avec ou sans traitement thermique visant à réduire leur résistance mécanique. **Le H est toujours suivi d’au moins deux chiffres**. L’écrouissage peut être obtenu par laminage à froid.

**W** : *Mis en solution*. Un état instable applicable seulement aux alliages qui vieillissent à la température de la pièce. Cette désignation est spécifique seulement lorsque la période de vieillissement naturel est indiquée (par exemple, W ½ hr). Une des rares applications de cet état concerne les rivets utilisés dans l’industrie de l’aviation.

**T** : *Traité thermiquement pour produire des états stables autres que F, O et H*. s’applique aux alliages traités thermiquement, avec ou sans écrouissage supplémentaire, pour produire des états stables. Le T est toujours suivi d’au moins un chiffre.

## Diapositive 94 et 95 :

Les alliages subissent des traitements métallurgiques qui permettent d’obtenir des caractéristiques mécaniques accrues. Un système de notation approprié est utilisé pour toutes les formes d’alliages de corroyage et de fonderie, sauf pour les lingots prévus pour faire du moulage, ces lingots devant être refondus de toute façon. Même si l’étude des états possibles des alliages est fastidieuse, elle n’en demeure pas moins essentielle pour bien comprendre les caractéristiques des matériaux que l’on utilise. Chaque série d’alliage est suivie d’une lettre (**F, O, H, W** ou **T**) elle-même accompagnée de quelques chiffres. La signification des lettres et des chiffres est la suivante :

**F** : *Tel que fabriqué*. S’applique aux produits transformés sur lesquels aucun traitement thermique ou travail à froid (écrouissage) n’est effectué. Pour les alliages de corroyage, il n’y a pas de limite sur les propriétés mécaniques.

**O** : *Recuit*. S’applique aux alliages de corroyage qui sont recuits pour obtenir l’état le plus doux et aux alliages de fonderie pour améliorer leur ductilité et leur stabilité dimensionnelle. **Le O peut être suivi d’un chiffre autre que zéro, qui indique un produit ayant des caractéristiques particulières**. Le recuit consiste à réchauffer à nouveau le métal et à le laisser refroidir lentement.

**H** : *Écroui (alliages de corroyage seulement).* S’applique aux produits qui ont des propriétés mécaniques augmentées par écrouissage, avec ou sans traitement thermique visant à réduire leur résistance mécanique. **Le H est toujours suivi d’au moins deux chiffres**. L’écrouissage peut être obtenu par laminage à froid.

**W** : *Mis en solution*. Un état instable applicable seulement aux alliages qui vieillissent à la température de la pièce. Cette désignation est spécifique seulement lorsque la période de vieillissement naturel est indiquée (par exemple, W ½ hr). Une des rares applications de cet état concerne les rivets utilisés dans l’industrie de l’aviation.

**T** : *Traité thermiquement pour produire des états stables autres que F, O et H*. s’applique aux alliages traités thermiquement, avec ou sans écrouissage supplémentaire, pour produire des états stables. Le T est toujours suivi d’au moins un chiffre.

**W** : Mise en solution : maintien d’une pièce à une température suffisamment élevée et pour une période de temps assez longue pour que les éléments d’alliage soient distribués de façon homogène. Le temps de chauffage varie selon la géométrie de la pièce. Il peut aller d’une minute pour une feuille mince à 20 heures pour une grosse pièce de fonderie au sable. Il faut accorder une attention particulière à la disposition des pièces dans le four pour assurer un chauffage homogène. On respectera les paramètres de mise en solution puisqu’une surchauffe entraînera la perte des propriétés et une dégradation de la pièce. Au contraire, un chauffage insuffisant ou inégal signifiera que la pièce n’atteindra pas les propriétés mécaniques souhaitées.

*Étape de mise en solution : les pièces sont portées à une température déterminée* *en fonction de la nuance d’alliage d’aluminium (environ 540°C). Comme son nom* *l’indique, cette étape permet de mettre en solution les différents constituants* *solubles dans la solution solide.*

## Diapositive 96 :

L’écrouissage est le durcissement qui se caractérise par une augmentation de la limite d’élasticité et de la dureté sous l’effet de la déformation plastique. Ces alliages sont identifiés par la lettre H suivie de chiffres : H1 écroui, H2 écroui et partiellement recuit, H3 écroui et stabilisé, H4 écroui et peint ou laqué. Le deuxième chiffre indique le degré d’écrouissage de 1 à 9. Plus il est élevé, plus l’écrouissage est significatif (plus le produit est dur par rapport à l’état complètement sur-revenu : stabilisation

**Stabilisation (traitement de)** : traitement thermique qui permet de stopper ou de limiter les évolutions au cours du temps des propriétés d'un matériau ou d'un produit (évite le phénomène d'adoucissement, des variations dimensionnelles en cours de service...).

Exemple : cas des pistons qui en service sont exposés à des températures capables de provoquer un recuit partiel.

Les états H peuvent subdivisés comme suit :

**H1** : *Écroui seulement*. S’applique aux produits qui durcis par écrouissage, sans traitement thermique subséquent. Le nombre suivant H1 indique le degré d’écrouissage.

**H2** : *Écroui et partiellement recuit*. S’applique aux produits qui sont davantage écrouis que désiré pour le produit final et qui sont ensuite partiellement recuits. Pour les alliages qui s’adoucissent avec le temps à la température de la pièce, les états H2 ont la même résistance ultime minimale en traction que les états H3 correspondants. Pour d’autres alliages, les états H2 ont la même résistance ultime minimale en traction que les états H1 correspondants, mais une ductilité plus grande. L’état H2 est appelé état restauré. Le chiffre suivant H2 indique la quantité d’écrouissage demeurant après que le produit ait été partiellement recuit.

**H3** : *Écroui et stabilisé*. S’applique aux produits qui sont écrouis et pour lesquels les propriétés mécaniques sont stabilisées par un traitement thermique à basse température ou par induction de chaleur pendant la fabrication. La stabilisation augmente la ductilité mais réduit légèrement la résistance à la traction. Cet état est désirable seulement pour les alliages qui, à moins d’être stabilisés, s’affaiblissent par vieillissement à la température de la pièce. L’état stabilisé H3 s’applique surtout aux alliages de la série 5000. Le chiffre suivant H3 indique le degré d’écrouissage avant le traitement de stabilisation.

**H4** Écroui et peint ou laqué

S’applique aux produits qui sont écrouis et qui sont soumis à un certain traitement thermique lors de la cuisson des peintures ou des laques. Le nombre suivant cette désignation indique le degré d’écrouissage restant après que le produit ait subit la cuisson. Les limites des propriétés mécaniques correspondantes, par exemples au HX2 ou HX3, s’appliquent.

## Diapositive 97 :

Le chiffre suivant H1, H2 ou H3 indique le degré final d’écrouissage selon le barème suivant:

HX2 = ¼ dur (2/8 de l’état dur HX8)

HX4 = ½ dur (4/8 de l’état dur)

HX6 = ¾ dur (6/8 de l’état dur)

HX8 = dur (75 % d’écrouissage)

HX9 = Résistance à la traction minimale dépassant de 10 MPa, ou plus, celle des états HX8.

L’état HX8 est l’état de référence. Dans ce cas, une pièce de 24 mm d’épaisseur est laminée à froid jusqu’à une épaisseur de 6 mm (6-24/24=75% de déformation) (voir acétate 98). Les matériaux ayant une résistance ultime à la traction se situant à mi-chemin entre celle de l’état O et celle de l’état dur (HX8) sont donc identifiés par le chiffre 4 (voir courbe). Ceux qui sont situés à mi-chemin entre l’état O et l’état HX4 sont identifiés par le chiffre 2 et ceux qui sont à mi-chemin entre l’état HX4 et l’état HX8, le sont par le chiffre 6.

0 Recuit

HX1 Nuance écrouie la moins dure

HX2 Nuance ¼ dure. Elle correspond à un écrouissage de l’ordre de 12 %.

HX4 Nuance ½ dure. Elle correspond à un écrouissage de l’ordre de 25 %.

HX6 Nuance ¾ dure. Elle correspond à un écrouissage de l’ordre de 50 %.

HX8 Nuance dure d’un alliage. Elle correspond à un écrouissage de l’ordre de 75 % obtenu par laminage à froid.

HX9 Nuance extradure (qui dépasse les propriétés attribuées à l’état HX8).

Les états 3, 5 et 7 désignent des états intermédiaires à ceux présentés ci-dessus.

## Diapositive 99 :

Les états T, à leur tour, peuvent être subdivisés comme suit (les différents traitements thermiques sont définis plus loin):

**T1** : Refroidi rapidement par suite d’un procédé de formage à haute température et vieilli naturellement (maturé) jusqu’à un état substantiellement stable. S’applique aux produits qui ne sont pas travaillés à froid après un refroidissement par suite d’un traitement à chaud, ou pour lesquels les effets du travail à froid pour redresser et finir les pièces ne sont pas reconnus par les normes dans les propriétés mécaniques.

**T2** : Refroidir rapidement par suite d’un procédé de formage à haute température, travaillé à froid et vieilli naturellement jusqu’à un état substantiellement stable. S’applique aux produits qui sont travaillés à froid pour améliorer la résistance après un refroidissement par suite d’un traitement à chaud, ou pour lesquels les effets du travail à froid pour redresser et finir les pièces sont reconnus dans les propriétés mécaniques.

**T3** : Mis en solution, travaillé à froid et vieilli naturellement à un état relativement stable. S’applique aux produits qui sont travaillés à froid après la mise en solution à chaud, ou pour lesquels les effets du travail à froid pour redresser ou finir les pièces sont reconnus dans les propriétés mécaniques. Il convient de noter que la mise en solution dans la description des états est suivie d’une trempe.

**T4** : Mis en solution et vieilli naturellement à un état relativement stable. S’applique aux produits qui ne sont pas travaillés à froid après la mise en solution, ou pour lesquels les effets du travail à froid pour redresser et finir les pièces ne sont pas reconnus dans les propriétés mécaniques. Des pièces dans cet état peuvent être usinées ou travaillées plus facilement avant d’être amenées à l’état T6.

**T5** : refroidi rapidement par suite d’un procédé de formage à haute température et vieilli artificiellement (revenu). S’applique aux produits qui ne sont pas travaillés à froid après refroidissement par suite du formage à haute température, ou pour lesquels les effets du travail à froid pour redresser et finir les pièces ne sont pas reconnus dans les propriétés mécaniques.

**T6** : Mis en solution et vieilli artificiellement. S’applique aux produits qui ne sont pas travaillés à froid après la mise en solution, ou pour lesquels les effets du travail à froid pour redresser et finir les pièces ne sont pas reconnus dans les propriétés mécaniques.

**T7** : Mis en solution et stabilisé (sur-revenu). S’applique aux produits de corroyage qui sont vieillis artificiellement après la mise en solution pour leur permettre d’atteindre un niveau de résistance maximale, de façon à contrôler certaines caractéristiques importantes, telle la résistance à la corrosion, par exemple. S’applique aux produits de fonderie qui sont vieillis artificiellement après la mise en solution pour stabiliser leurs dimensions et leur résistance.

**T8** : Mis en solution, travaillé à froid et vieilli artificiellement. S’applique aux produits qui sont travaillés à froid après refroidissement, ou pour lesquels les effets du travail à froid pour redresser et finir les pièces sont reconnus dans les propriétés mécaniques. Le travail à froid augmente la réponse au vieillissement subséquent.

**T9** : Mis en solution, vieilli artificiellement et travaillé à froid. S’applique à des produits qui sont travaillés à froid après le traitement thermique pour améliorer davantage les propriétés mécaniques.

**T10** : Refroidi rapidement à la suite d’un procédé de formage à haute température, travaillé à froid et vieilli artificiellement. S’applique aux produits qui sont travaillés à froid pour améliorer la résistance après refroidissement, ou pour lesquels les effets du travail à froid pour redresser ou finir les pièces sont reconnus dans les propriétés mécaniques. Le travail à froid augmente la réponse au vieillissement subséquent.

Le tableau 3 (acétate 99) reprend de façon schématique les différents traitements métallurgiques des états T.

Les désignations T1 à T10 peuvent être suivies d’un chiffre supplémentaire, de 1 à 9, indiquant une variante du traitement thermique de base.

## Diapositive 101 :

Stabilisées par un traitement thermique à basse température ou par induction de chaleur pendant la fabrication. La stabilisation augmente la ductilité mais réduit légèrement la résistance à la traction

1. **Définitions préliminaires**

**Corroyage :** opération consistant à déformer plastiquement un métal afin d'obtenir une forme désirée. Le forgeage, le laminage et le filage sont des exemples de corroyage. Le corroyage peut être réalisé à chaud ou à froid. Le métal subit généralement un écrouissage plus ou moins accentué (le métal est dit écroui).

**Durcissement structural :** durcissement du métal provoqué soit par un phénomène de trempe uniquement (aciers...) soit par une trempe suivie d'une maturation (alliages d'aluminium...) soit encore par un traitement mécanique (écrouissage...). Au cours du durcissement, la résistance à la rupture Rr, la limite élastique Re (ou Rp) et la dureté H augmentent et l'allongement pour cent A% (autrement dit la malléabilité) diminue.

**Ecrouissage** : modification de la structure d'un métal par déformation plastique à une température et à une vitesse telles que le métal durcisse. Amène une augmentation de la résistance mécanique et de la dureté mais aussi une perte de ductilité (A% diminue).

**Maturation** : immédiatement après trempe, la malléabilité des alliages d'aluminium est voisine de celle obtenue à l'état recuit (Rr, Re et H mini ; A% maxi). Cette malléabilité diminue assez rapidement dans le temps qui suit la trempe à la température ambiante (Rr, Re, H augmentent et A% diminue). C'est le phénomène de maturation dont l'origine est la précipitation d'un ou plusieurs composés.

**Mise en solution ("trempe" des Al)** : correspondant à la "trempe" des alliages d'aluminium, traitement thermique qui consiste à chauffer, maintenir à une certaine température pour permettre aux composants d'entrer en solution solide, puis à refroidir assez rapidement (eau froide, eau tiède, eau bouillante, huile, brouillard, courant d'air) pour conserver les composants en solution.

**Recuit** : dans le cas des métaux non ferreux, traitement thermique destiné à adoucir le métal en éliminant l'écrouissage ou par coalescence des précipités formés à partir de la solution solide. C'est le traitement qui confère aux alliages (s'applique à tous les alliages qu'ils soient sans traitement ou à traitement thermique) le maximum de malléabilité (Rr, Re et H minimum, A% maximum).

**Revenu** : traitement thermique qui, dans le cas des alliages d'aluminium, provoque le durcissement structural des alliages qui ne bénéficient pas de la maturation. Le traitement augmente la résistance à la rupture Rr, la limite élastique Re (ou Rp), la dureté et diminue l'allongement pour cent A%. À noter que les résultats sont inverses de ceux obtenus par le revenu des aciers.

**Stabilisation (traitement de)** : traitement thermique qui permet de stopper ou de limiter les évolutions au cours du temps des propriétés d'un matériau ou d'un produit (évite le phénomène d'adoucissement, des variations dimensionnelles en cours de service...).

Exemple : cas des pistons qui en service sont exposés à des températures capables de provoquer un recuit partiel.

**Trempe** : voir "mise en solution" et "maturation". A remarquer que la trempe des alliages d'aluminium est très différente de celle des aciers et que le durcissement structural s'obtient par une période de maturation après trempe (le terme "trempe" est remplacé par "mise en solution").

**Vieillissement** : précipitation à partir d'une solution solide sursaturée entraînant une modification des propriétés de l'alliage, soit à température ambiante (vieillissement naturel ou maturation) ou plus rapidement à température élevée (vieillissement artificiel ou revenu).

# Considérations métallurgiques

## Diapositive 104 :

Selon la classification de l’Aluminum Association des États-Unis, on distingue des alliages de corroyage et des alliages de fonderie. Les alliages de corroyage sont obtenus en travaillant des lingots ayant des formes particulières. Ce travail peut se faire par laminage, extrusion, tréfilage ou forgeage. La façon dont le métal se déforme plastiquement est une caractéristique importante des alliages de corroyage. Les produits sont disponibles sous forme de plaques, feuilles, tubes, profilés, fils, barres et produits forgés. Les alliages de fonderie sont obtenus en fondant les lingots et en les coulant dans des moules ayant les formes du produit final. La façon dont le métal se répand dans le moule et la façon dont il se solidifie sont des caractéristiques importantes de ces matériaux.

La différence principale entre ces deux classes d’alliages réside dans les éléments ajoutés à l’aluminium de base. Dans les alliages de fonderie, les éléments sont généralement présents en quantités plus importantes, principalement pour faciliter le procédé de fonderie.

La désignation des alliages de corroyage telle que nous la connaissons aujourd’hui a été adopté aux États-Unis en 1954, pour devenir la norme nationale américaine en 1957. Ce n’est qu’en 1970 que la désignation à 4 chiffres de l’organisation américaine *Aluminium Association (AA)* a officiellement été adoptée par les organisations signataires de la *Déclaration d’accord sur un système de désignation internationale pour l’aluminium corroyé et ses alliages*. Une trentaine de pays sont signataires de cet accord, dont le Canada

La limite élastique et la résistance, spécialement en fatigue, de la plupart des pièces moulées sont inférieures à celles des produits corroyés. La cause provient, principalement, de l’incapacité des procédés actuels à prévenir les défauts de moulage de façon efficace. Toutefois, depuis les dernières années, les innovations dans les alliages et les procédés de moulage ont apporté des améliorations significatives. Celles-ci devront d’ailleurs être prises en considération lors des mises à jour des normes qui s’y rattachent.

## Diapositive 106 :

La **résilience** désigne la résistance d'un matériau aux chocs ; (le « fait de rebondir », du latin resilientia, de resiliens) : la capacité d'un corps, d'un organisme, d'une espèce, d'un système à surmonter une altération de son environnement.

**Applications cryogéniques**: fabrication des réservoirs cryogéniques par exemple

La structure cristalline de l’aluminium, à la solidification, est cubique à faces centrés, comme celle de l’acier à haute température (figure 9a[[14]](#footnote-14)). Cependant, contrairement à l’acier, la structure de l’aluminium demeure la même à des températures plus basses. Par conséquent, il n’est pas possible d’augmenter les propriétés de l’aluminium en le trempant, comme on peut le faire pour l ’acier. Il existe d’autres méthodes que la trempe pour parvenir à cette fin.

Le fait que le cristal de l’aluminium demeure cubique à faces centrées, à basse température, lui permet d’avoir de bonnes propriétés de résilience (caractérise la résistance au choc d'un métal) et de ductilité à ce niveau de température, contrairement à l’acier. En fait, les propriétés de l’aluminium s’améliorent avec la réduction de la température. C’est la raison pour laquelle l’aluminium est utilisé pour des **applications cryogéniques**. Par contre, les propriétés mécaniques se détériorent très rapidement à des niveaux de température supérieurs à 100°C.

Quoi qu’il en soit, l’aluminium pur possède des propriétés de résistance mécaniques insuffisantes pour un grand nombre d’applications et il faut utiliser des moyens pour les augmenter.

Les atomes sont disposés de manière très ordonnée, en cubes à faces centrées, c’est-à-dire qu’il y a des atomes aux huit coins du cube et un atome au milieux de chaque face. Les cubes se juxtaposent les uns aux autres et respectent toujours la même orientation, comme un jeu de blocs Légo (figure 9b[[15]](#footnote-15)). Si on trace des droites pour joindre les atomes, elles se croisent à angle droit telles des rues et des avenues. À la solidification, différents cristaux se forment à différents endroits, en même temps, et ils n’ont pas la même orientation. Ils grossissent et lorsque deux jeux de blocs viennent en contact, on appelle la frontière entre ces blocs un joint de grains (figure 9c[[16]](#footnote-16)). Un cristal entouré de joints de grains s’appelle un grain. Aux joints de grains, les atomes sont désordonnés. Les différents grains constituent enfin un élément en aluminium, tel qu’illustré sur la figure 9d[[17]](#footnote-17). Dans le cas présent, on peut prétendre qu’il s’agit d’une barre d’aluminium pur à 99.00 % dans l’état recuit, portant l’appellation 1100-O et ayant une résistance ultime à la traction de 90 MPa.

Si on veut **déformer la pièce d’aluminium pur** en appliquant des contraintes, certains plans d’atomes glisseront par rapport aux autres, créant ainsi une déformation plastique. Les joints de grains, par contre, entravent le glissement des plans d’atomes. Il en résulte que plus les grains sont petits, **plus il y a de joints de grains et plus le matériau devient rigide (influence sur les prop. Mécanique)**. On peut réduire la grosseur des grains en mélangeant des affineurs de grains commerciaux ou sous forme de nanocristaux à l’aluminium liquide avant la coulée. Pour l’aluminium, toutefois, il n’y a pas de changements appréciables de propriétés physiques en fonction de la grosseur des grains.

## Diapositive 108 et 109 :

Si, à titre d’exemple, un certain pourcentage de magnésium, soit 2,5 %, est ajouté à la barre d’aluminium pur montrée sur la figure 9d, l’alliage 5052-O est obtenu. Les atomes de l’élément d’alliage remplacent des atomes d’aluminium, tel qu’illustré sur la figure 10. N’ayant pas la même dimension, **il s’ensuit des distorsions dans le réseau cristallin, et ces distorsions sont des entraves aux mouvements entre les plans d’atomes**. Conséquemment, la limite élastique (Fy) et la résistance à la traction (contrainte ultime, Fu) augmentent alors que la ductilité diminue, d’où l’utilisation d’éléments d’alliage pour augmenter les propriétés mécaniques.

Ainsi, en ajoutant 2,5 % de magnésium à l’aluminium pur, on fait passer la contrainte ultime de l’aluminium pur de 90 à 195 MPa.

La figure 11 (acétate 109) montre l’effet de l’augmentation de la quantité d’élément d’alliage sur les propriétés mécaniques. Dans ce cas-ci, il s’agit d’alliages de la série 5000 (aluminium-magnésium). On observe une augmentation de la limite élastique, ce qui est aussi le cas pour la limite ultime qui n’est pas montrée, et une diminution de la ductilité. Tous les alliages sont dans l’état recuit, c’est-à-dire qu’ils n’ont pas subi d’écrouissage ni de traitement thermique.

Parfois, au lieu de remplacer les atomes d’aluminium dans le réseau cristallin, les atomes d’alliage, de petite taille, arrivent à se glisser entre les atomes d’aluminium. Les résultats sont les mêmes.

Pour les alliages traitables thermiquement, comme on le verra plus loin, il y a moyen, à partir des éléments d’alliage, de faire précipiter des composants qui peuvent améliorer davantage les propriétés mécaniques, si leur taille et leur emplacement sont bien contrôlés. L’effet seul de l’ajout d’éléments d’alliage étant plutôt faible, on effectuera un travail à froid ou on fera un traitement thermique en plus. Certains alliages peuvent même subir une combinaison de traitements thermiques et de travail à froid.

## Diapositive 111 :

L’écrouissage, classé à juste titre comme un travail à froid, se fait à la température de la pièce. Son effet est d’aplatir et de déformer les grains dans le sens du laminage. **Il en résulte que lorsqu’on applique des contraintes à la plaque écrouie, le glissement des plans d’atomes est entravé par la présence des défauts générés et il faut plus d’énergie pour déformer la plaque, une fois écrouis**. Les limites élastique et ultime augmentent, de même que la résistance à la déformation, mais la ductilité diminue. La pièce est donc plus rigide. La figure 12 (voir acétate) illustre le procédé d’écrouissage d’une plaque d’aluminium pur de l’état recuit 1100-O à l’état écroui Dur, c’est-à-dire écroui à 75 %. L’écrouissage permet donc à la limite ultime de l’aluminium de passer de 90 à 165 MPa.

## Diapositive 112 :

**7.5 Éléments d’alliage et écrouissage combinés**

Il est possible d’augmenter la résistance à la traction de l’aluminium pur en utilisant l’écrouissage seulement. **Cependant, l’ajout de seulement 1 % d’éléments d’alliage produit une augmentation de la résistance à la traction plus grande que l’écrouissage à l’état H18 d’un aluminium pur**. De plus, la ductilité de cet alliage est meilleure que celle de l’aluminium pur écroui. **Il est donc souvent avantageux d’utiliser des alliages et de les écrouir au besoin**. La figure 13 (voir acétate) montre l’augmentation de la limite ultime et de la limite élastique ainsi que la diminution de la ductilité (réduction de l’allongement pour un effort donné) en fonction de la quantité d’écrouissage pour l’aluminium pur et trois alliages non traitables thermiquement. La ductilité étant moins bonne, il est plus difficile de travailler les pièces fortement écrouies.

## Diapositive 114 :

On notera que les alliages des séries 2000, 4000, 6000 et 7000 (ou encore 2XXX, 4XXX, 6XXX et 7XXX), de même que les alliages de fonderie, sont des alliages traitables thermiquement, alors que ceux des séries 1000, 3000 et 5000 ne le sont pas. Aux premiers, on assignera un état T, alors qu’aux seconds, on assignera un état H. les états T4 et T6 sont les plus fréquemment utilisés. En ce qui a trait à la série 4000 (qui n’est pas utilisée structuralement), on verra plus loin qu’elle représente un cas particulier puisqu’elle est à la fois traitable et non traitable thermiquement, selon les alliages.

Il convient finalement de noter que le système de classement de l’Aluminum Association n’est pas le seul utilisé pour désigner les alliages. Il en existe d’autres. On trouvera facilement les équivalences dans la littérature spécialisée.

## Diapositive 116 :

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.

## Diapositive 118 :

Les alliages d’aluminium sont donc caractérisés par la présence d’éléments chimiques, par des traitements thermiques et des travaux mécaniques. À cette étape-ci, il sied de faire le point en examinant les principales caractéristiques des alliages les plus courants et de jeter un regard sur leurs principales utilisations. Une description plus détaillés peut être trouvée dans les références (15) et (16) du manuel *Calcul des charpentes d’aluminium* de Denis Beaulieu.

**Série 1000** – L’aluminium pur possède une excellente résistance à la corrosion, une grande conductivité électrique, une très bonne conductibilité thermique, mais une faible résistance mécanique qui le rend très malléable. Les principales impuretés sont le fer et le silicium. L’alliage 1100 est principalement utilisé pour la fabrication de conducteurs électriques et de produits décoratifs, le 1050 pour la fabrication d’échangeurs de chaleur et de casseroles et le 1350 pour la fabrication de câbles aériens pour le transport d’électricité à haut voltage.

**Série 2000** – Le principal élément d’alliage de la série 2000 est le cuivre. Il permet une augmentation très appréciable de la résistance à la traction grâce à des traitements thermiques. La résistance de certains alliages de la série 2000 peut même excéder celle des aciers doux. La présence de cuivre affecte toutefois la résistance à la corrosion, au point qu’il soit généralement nécessaire de protéger l’aluminium par anodisation. Ces alliages sont aussi difficiles à souder. C’est la raison pour laquelle ils sont plutôt utilisés dans les structures boulonnées et rivetées. Les alliages de la série 2000 sont principalement utilisés dans le domaine militaire et dans la fabrication des avions et réservoirs cryogéniques. L’alliage 2017, le duralumin, était l’alliage du début de l’aviation. Il a été remplacé par le 2024, qui est aussi utilisé pour le transport militaire et civil. L’alliage 2618 a largement été utilisé dans les structures du Concorde.

## Diapositive 119 :

**Série 3000** – Le principal élément d’alliage de la série 3000 est le manganèse, lequel a pour propriété d’augmenter la résistance mécanique de l’aluminium sans réduire sa ductilité ni sa résistance à la corrosion. Les alliages de la série 3000 ne sont pas traitables thermiquement, mais sont facilement soudables. Puisque seulement un faible pourcentage de manganèse, soit entre 1,0 et 1,5 %, peut être ajouté à l’aluminium, il est utilisé comme élément principal dans quelques cas seulement. Un de ceux-ci est l’alliage 3003 qui est très apprécié comme alliage de résistance mécanique modérée pour les applications requérant une bonne formabilité : tôles de toiture, articles emboutis, réservoirs d’entreposage et articles ménagers. L’alliage 3004, qui contient aussi du magnésium, offre une plus grande résistance mécanique et est utilisé pour la fabrication des canettes de bière ou de boisson gazeuses, à l’exception du couvercle qui est plutôt en alliage 5082.

**Série 4000** : Le principal élément d’alliage de la série 4000 est le silicium. Il permet d’augmenter modérément les propriétés mécaniques, mais surtout abaisse le point de fusion. Cette dernière propriété est un atout pour réduire les risques de fissuration à chaud lors du soudage, lorsque l’alliage 4043 est utilisé comme matériau d’apport. D’autres alliages, tels les 4047 et 4195, sont aussi utilisés comme matériaux d’apport. Les alliages de la série 4000 et, de façon plus particulière l’alliage 4032, servent de plus à la construction de moteurs de bateau, de moteurs d’auto, de pistons et de roues d’auto. Le silicium augmente aussi la fluidité, ce qui est un avantage pour les alliages de fonderie qui, étant plus fluides, s’étendent mieux dans le moule. La plupart des alliages de la série 4000 ne sont pas traitables thermiquement. Par contre, lorsqu’ils sont utilisés pour souder des alliages traitables thermiquement, ils s’emparent de certains éléments d’alliage de ces derniers et peuvent, par la suite, réagir à certains traitements thermiques.

## Diapositive 120 :

**Série 5000** : Le magnésium est le principal élément d’alliage de la série 5000. Il permet un renforcement appréciable des propriétés mécaniques par travail à froid ou, à l’occasion, par traitement thermique. Cette série, classée comme non traitable thermiquement, offre la meilleure combinaison de haute résistance à la traction et de résistance à la corrosion. C’est la raison pour laquelle elle est souvent utilisée dans les environnements marins. Elle offre aussi une bonne soudabilité et est souvent utilisée pour des applications structurales (bâtiments, ponts). La concentration de magnésium doit être supérieure à 7 % pour permettre une amélioration marquée des propriétés lorsque l’alliage est soumis à des traitements thermiques. Le **magnésium** peut être combiné à d’autres éléments comme le cuivre, le zinc, le chrome et le titane, pour encore plus d’efficacité. Il permet, enfin, d’augmenter la fluidité de certains alliages de fonderie qui ne contiennent pas de silicium. On utilise l’alliage 5082 pour fabriquer les couvercles de canettes de bière et de boisson gazeuse, l’alliage 5052, plus résistant que l’alliage 3004, pour la fabrication de certaines canettes et l’alliage 5056 pour des citernes routières et des bennes de camion. La série 5000, tout comme la série 2000, est utilisée dans les applications cryogéniques en raison de son bon comportement aux basses températures. Les alliages 5454, 5754 et 5154 sont très souvent utilisés dans le bâtiment, les travaux publics, les transports et les industries mécaniques. Enfin, les alliages 5086 et 5083 sont souvent utilisés dans les applications marines, telles les plates-formes de forage, en raison de leurs caractéristiques mécaniques élevées, de leur bonne aptitude au soudage et de leur remarquable tenue à la corrosion.

**Série 6000** : Les alliages de la série 6000 contiennent du magnésium et du silicium qui, lorsqu’ils sont utilisés en combinaison, forment des précipités de Mg2Si. Ces précipités, obtenus lors des traitements thermiques des alliages de fonderie et de corroyage, augmentent les propriétés mécaniques de l’aluminium. C’est la série idéale pour les applications structurales puisque ses alliages sont ceux qui se prêtent le mieux à la production d’extrusions. Les alliages de cette série offrent une résistance acceptable aux charges, une bonne résistance à la corrosion et une formabilité idéale pour l’extrusion. De plus, ils peuvent être facilement soudés et anodisés. Les alliages de la série 6000 peuvent être produits dans l’état T4 et atteindre l’état T6 par vieillissement artificiel. L’alliage de loin le plus utilisé et le plus disponible en construction, est le 6061 dans l’état T6. En effet, le 6061 offre la meilleure combinaison de résistance aux charges, de soudabilité et de résistance à la corrosion, à un prix abordable. Parmi les utilisations les plus courantes du 6061, à ce jour, notons la fabrication de caravanes de camping, de boîtes de camion, de lampadaires, de rivets et de bouteilles de plongée. De plus, il est utilisé pour des applications marines. Le 6005, dans l’état T5, possède une résistance équivalente au 6061-T6 lorsque non soudé, mais à un coût légèrement inférieur. Lorsque soudé, la résistance de 6005-T5 est égale à 85 % de celle du 6061-T6 à l’état soudé. Pour des applications architecturales, le 6063 est depuis longtemps l’alliage le plus répandu. Il est aussi souvent utilisé en construction puisque, tout comme le 6061, il est facilement extrudable. L’alliage 6066 possède une résistance à la traction supérieure à celle du 6061, mais est moins résistant à la corrosion et est plus difficile à extruder. Le 6070 possède une résistance de 25 % supérieure à celle du 6061, mais il coûte légèrement plus cher à l’achat et est plus difficile à extruder. Le 6105, dans l’état T5, offre des qualités qui, en général, sont légèrement supérieures à celles du 6061-T6. Le 6351 est aussi un alliage apprécié puisque, dans l’état T5, il possède une résistance équivalente à celle du 6061-T6 et que, dans l’état T6, sa résistance mécanique est légèrement supérieure. De plus, cet alliage offre une meilleure résistance à la corrosion et à la fracture. Enfin, il y a l’alliage 6463 dont les propriétés équivalent celles du 6063.

## Diapositive 121 :

**Série 7000** : le zinc est utilisé dans les alliages de coulée et, en moindre quantité, avec le magnésium et le cuivre dans les alliages de la série 7000, pour produire des alliages traitables thermiquement et dotés de propriétés mécaniques nettement améliorées. Les alliages de la série 7000 offrent les résistances mécaniques les plus élevées parmi tous les produits d ’aluminium. Ils sont cependant difficiles à produire et à fabriquer. Ils sont donc utilisés pour des applications spéciales requérant un niveau très élevé de résistance mécanique, telle la fabrication des avions et des pare-chocs d’automobiles. En effet, l’alliage 7020 a servi dans la fabrication des premier et deuxième étages de la fusée Ariane. L’alliage 7075, qui possède une résistance à la traction de 580 MPa et qui est soudable, sert à la fabrication de plaques de blindage. Les alliages de la série 7000 ne sont généralement pas considérés comme soudables et leur résistance à la corrosion n’est pas aussi bonne que celle des séries 5000 et 6000. C’est la raison pour laquelle on utilise des rivets dans la construction des avions et que l’on recouvre généralement les alliages de la série 7000 d’une couche protectrice.

1. <http://madeupinbritain.uk/Aluminium> [↑](#footnote-ref-1)
2. *https://fr.wikipedia.org/wiki/Henri\_Sainte-Claire\_Deville* [↑](#footnote-ref-2)
3. *Calcul des charpentes d’aluminium,* Les Presses d’Aluminium PRAL, Denis Beaulieu, p11 [↑](#footnote-ref-3)
4. *Calcul des charpentes d’aluminium*, Les Presses de l’aluminium, Denis Beaulieu, p16 [↑](#footnote-ref-4)
5. *Les caractéristiques de l’aluminium structural,* 2ième édition, Denis Beaulieu, p11 [↑](#footnote-ref-5)
6. *Les caractéristiques de l’aluminium structural,* 2ième édition, Denis Beaulieu, p13 [↑](#footnote-ref-6)
7. *Les caractéristiques de l’aluminium structural,* 2ième édition, Denis Beaulieu, p13 [↑](#footnote-ref-7)
8. *Les caractéristiques de l’aluminium structural,* 2ième édition, Denis Beaulieu, p13 [↑](#footnote-ref-8)
9. *Les caractéristiques de l’aluminium structural,* 2ième édition, Denis Beaulieu, p13 [↑](#footnote-ref-9)
10. *Les caractéristiques de l’aluminium structural,* 2ième édition, Denis Beaulieu, p14 [↑](#footnote-ref-10)
11. *Les caractéristiques de l’aluminium structural,* 2ième édition, Denis Beaulieu, p14 [↑](#footnote-ref-11)
12. *Les caractéristiques de l’aluminium structural,* 2ième édition, Denis Beaulieu, p14 [↑](#footnote-ref-12)
13. *Les caractéristiques de l’aluminium structural,* 2ième édition, Denis Beaulieu, p10 [↑](#footnote-ref-13)
14. *Calcul des charpentes en aluminium*, edition Les Presses de l’Aluminium PRAL, Denis Beaulieu, p32 [↑](#footnote-ref-14)
15. *Calcul des charpentes en aluminium*, edition Les Presses de l’Aluminium PRAL, Denis Beaulieu, p32 [↑](#footnote-ref-15)
16. *Calcul des charpentes en aluminium*, edition Les Presses de l’Aluminium PRAL, Denis Beaulieu, p32 [↑](#footnote-ref-16)
17. *Calcul des charpentes en aluminium*, edition Les Presses de l’Aluminium PRAL, Denis Beaulieu, p32 [↑](#footnote-ref-17)