

Science des Matériaux

On traite des propriétés physiques des différents matériaux et la manière de les mesurer.

- [Comprendre et mesurer les matériaux](#)
- [Alliages d'Aluminium](#)

Comprendre et mesurer les matériaux

La compréhension des propriétés physiques des matériaux est cruciale dans de nombreuses industries, car elle permet le développement et l'amélioration de matériaux adaptés à des applications spécifiques :

- **Aérospatiale** : Dans l'industrie aérospatiale, les matériaux doivent être en mesure de résister à des conditions extrêmes, telles que des températures élevées, des contraintes élevées et des environnements corrosifs. Les matériaux à rapport résistance/poids élevé, tels que le titane et les composites en fibre de carbone, sont souvent utilisés dans la construction d'avions et de vaisseaux spatiaux.
- **Automobile** : Dans l'industrie automobile, les matériaux doivent être en mesure de résister à une large gamme de conditions, notamment des contraintes élevées, des températures élevées et une exposition à des produits chimiques et à des environnements corrosifs. Les matériaux à rapport résistance/poids élevé, tels que l'aluminium et l'acier à haute résistance, sont souvent utilisés dans la construction de véhicules pour améliorer l'efficacité énergétique et réduire les émissions.
- **Construction** : Dans l'industrie de la construction, les matériaux doivent être en mesure de résister à une large gamme de conditions, notamment des contraintes élevées, des températures élevées et une exposition à des produits chimiques et à des environnements corrosifs. Les matériaux à haute résistance et durabilité, tels que le béton, l'acier et la brique, sont souvent utilisés dans la construction de bâtiments et d'autres structures.
- **Électronique** : Dans l'industrie électronique, les matériaux doivent être en mesure de conduire l'électricité et de résister à une large gamme de conditions, notamment des températures élevées et une exposition à des produits chimiques. Les matériaux à haute conductivité électrique, tels que le cuivre et l'or, sont souvent utilisés dans la construction de dispositifs électroniques.

Mesurer les matériaux

Dans le langage courant, on dit qu'un matériaux ou objet est "solide" ou "fragile". Cependant, le verre est par exemple très dur, mais se casse, le plastique est presque incassable mais plus "mou". Dans une approche technique et scientifique, on a besoin de précision, mettons donc cela au clair avec les différentes "dimensions" de la solidité.

- **Essai de Traction** (tensile strength) : Dans un essai de traction, un échantillon est tiré jusqu'à ce qu'il se brise pour déterminer sa résistance à la traction, son allongement et d'autres propriétés. L'échantillon est étiré et la force nécessaire pour l'étirer est mesurée. Cet essai fournit des informations sur la résistance, la ductilité et la rigidité d'un matériau.
- **Essai de Compression** (compressive strength): Les essais de compression déterminent la réponse d'un matériau à un chargement de type écrasement ou support. L'échantillon est comprimé et la force nécessaire pour le comprimer est mesurée. Cet essai est utilisé pour les matériaux plus résistants à la compression qu'à la traction, comme le béton.
- **Essais de Cisaillement et de Flexion** (flexural or bending) : Les essais de cisaillement indiquent la réponse à la déformation d'un matériau soumis à des forces appliquées de manière tangentielle. Les essais de flexion mesurent la résistance à la traction de matériaux fragiles comme le verre et les céramiques en appliquant une force de flexion créant des contraintes de traction sur un côté de l'échantillon.
- **Essai d'Impact** : Les essais d'impact mesurent la résistance d'un matériau à la rupture dans des conditions de chargement à grande vitesse. L'échantillon est soumis à une charge d'impact et l'énergie absorbée est mesurée. Cet essai est utilisé pour évaluer la ténacité et la ductilité d'un matériau.
- **Essai de Fatigue** : Les essais de fatigue mesurent la résistance d'un matériau à la rupture dans des conditions de chargement cyclique. L'échantillon est soumis à des cycles de charge récurrents et le nombre de cycles jusqu'à la rupture est mesuré. Cet essai est utilisé pour évaluer la durabilité d'un matériau et prédire sa durée de vie en service.
- **Essai de Dureté** : Les essais de dureté mesurent la résistance d'un matériau à l'indentation ou à la pénétration. Un indenteur dur est pressé dans la surface du matériau et la taille ou la profondeur de l'indentation est mesurée. Cet essai fournit des informations sur la résistance et la résistance à l'usure d'un matériau.

Les propriétés des matériaux sont généralement décrites à l'aide des unités suivantes :

- **Longueur** : mètre (m) et unités dérivées comme centimètre (cm), millimètre (mm), micromètre (μm), nanomètre (nm), etc.
- **Masse** : kilogramme (kg) et unités dérivées comme gramme (g), milligramme (mg), etc.
- **Volume** : mètre cube (m^3), litre (L), millilitre (mL), centimètre cube (cm^3), etc.
- **Densité** : kilogramme par mètre cube (kg/m^3), gramme par centimètre cube (g/cm^3), etc.
- **Température** : kelvin (K) et Celsius ($^{\circ}\text{C}$)
- **Temps** : seconde (s) et unités dérivées comme minute (min), heure (h), etc.
- **Force** : newton (N)
- **Contrainte** : pascal ($\text{Pa} = \text{N}/\text{m}^2$) ou unités dérivées comme kilopascal (kPa), mégapascal (MPa), etc.
- **Énergie** : le Joule (J) est l'unité SI d'énergie et est utilisée pour quantifier la quantité d'énergie absorbée par un matériau
- **Déformation** : unité sans dimension (m/m) ou pourcentage (%)
- **Dureté** : Vickers (HV), Brinell (HB), Rockwell (HR), Shore (HS), etc. selon la méthode d'essai
- **Conductivité électrique** : siemens par mètre (S/m) ou unités dérivées comme microsiemens par centimètre ($\mu\text{S}/\text{cm}$) ou souvent exprimé par son inverse, la résistance ohm-mètre ($\Omega\cdot\text{m}$).

Ces essais et unités fournissent une compréhension globale des caractéristiques mécaniques d'un matériau et aident les ingénieurs à sélectionner les matériaux les plus appropriés pour leurs applications.

Élasticité / Plasticité

La déformation élastique et la déformation plastique sont deux types de déformation qui peuvent se produire dans les matériaux lorsqu'ils sont soumis à des forces ou des contraintes externes.

- La **déformation élastique** est un changement temporaire et réversible de la forme ou de la taille d'un matériau. Lorsqu'un matériau est soumis à une force ou à une contrainte qui se trouve dans sa limite élastique, il se déformera élastiquement. Cela signifie que le matériau reviendra à sa forme ou à sa taille d'origine une fois la force ou la contrainte retirée. La déformation élastique est généralement caractérisée par une relation linéaire entre la contrainte appliquée et la déformation résultante, comme décrit par la loi de Hooke.
- La **déformation plastique**, en revanche, est un changement permanent et irréversible de la forme ou de la taille d'un matériau. Lorsqu'un matériau est soumis à une force ou à une contrainte qui dépasse sa limite d'élasticité, il se déformera plastiquement. Cela signifie que le matériau ne reviendra pas à sa forme ou à sa taille d'origine une fois la force ou la contrainte retirée. La déformation plastique est généralement caractérisée par une relation non linéaire entre la contrainte appliquée et la déformation résultante.

La **Limite d'élasticité** (Yield strength) définit la quantité de contrainte qu'un matériau peut supporter avant de commencer à se déformer plastiquement (c'est-à-dire de manière permanente). Elle est généralement mesurée en unités de force par unité de surface, telles que les psi ou les MPa.

Solidité / Ductilité

La fragilité et la ductilité sont deux propriétés importantes qui décrivent la réponse d'un matériau à la déformation ou au stress.

La **fragilité** (brittleness) est la tendance d'un matériau à se **fracturer ou à se casser sans subir de déformation plastique significative**. Les matériaux fragiles sont généralement **durs et rigides**, mais ils manquent de la capacité d'absorber de l'énergie et de se déformer plastiquement avant la rupture (verre, céramique, fonte).

La **ductilité**, en revanche, est la **capacité d'un matériau à subir une déformation plastique significative avant la rupture**. Les matériaux ductiles sont généralement **plus mous et plus malléables** que les matériaux fragiles, et ils sont capables **d'absorber plus d'énergie et de se déformer plastiquement avant la rupture**. Cela peut les rendre plus résistants aux chocs et au

chargement dynamique (cuivre, aluminium, plastiques).

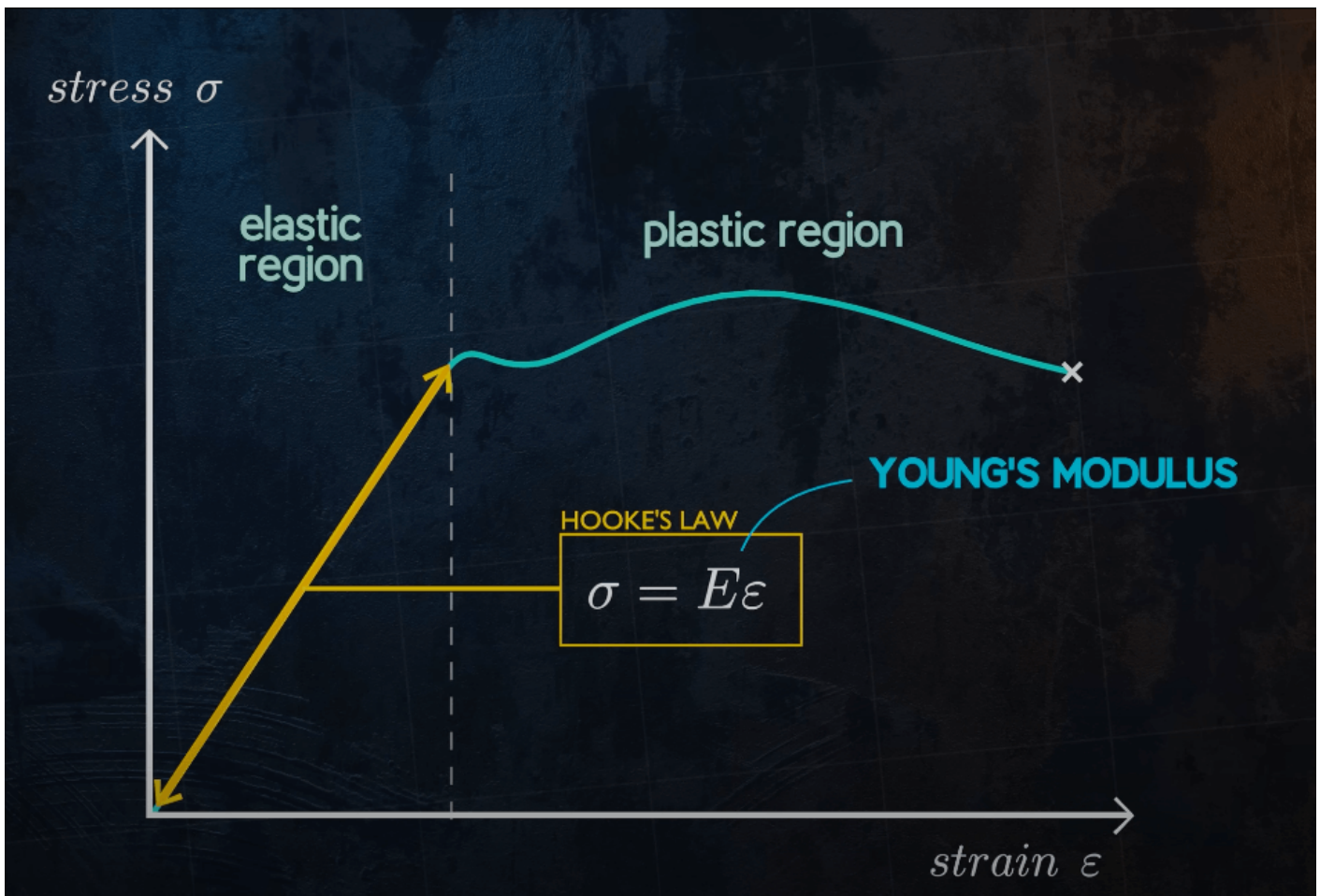
Déterminer les propriétés mécaniques

On va pouvoir qualifier les propriétés mécaniques d'un matériau au travers de son comportement (plasticité, élasticité) sous différentes contraintes :

- compression,
- élongation,
- flexion,
- torsion,
- cisaillement (shear),
- impact.

Pour chacun de ces tests, on mesure plusieurs grandeurs :

- **résistance ultime** ([ultimate strength](#)) en traction, compression et flexion. On spécifie souvent l'UTS, l'ultimate tensile strength, qui est la valeur de contrainte la plus élevée avant la rupture du matériau. Elle est calculée en divisant la force maximale appliquée pendant le test par la section transversale initiale de l'échantillon.
- **limite d'élasticité** (yield or [yield strength](#)) définit la force à partir de laquelle le matériau passe d'une déformation élastique à une déformation plastique. Elle est calculée en déterminant le point sur la courbe contrainte-déformation où le comportement du matériau s'écarte de la linéarité.
- **allongement à la rupture** (elongation at break) est exprimé en pourcent de la taille d'élongation après application de la charge.
- **module d'élasticité** ([Young's modulus](#), noté E) indique la rigidité du matériau en Pa (ou MPa). C'est le ratio entre l'application d'une force et la déformation élastique du matériau. Il est calculé en divisant la contrainte appliquée pendant le test par la déformation résultante, ou le **changement de longueur par unité de longueur**.



“ Dans certains matériaux, comme l'aluminium, il y a une apparition progressive de comportement non-linéaire, et il n'y a pas de point de rupture précis. Dans un tel cas, le point de rupture à l'offset (ou la contrainte d'essai) est pris comme étant la contrainte à laquelle se produit une déformation plastique de 0,2 %. On note donc la limite d'élasticité ($R_{p0,2}$).

Pour ceux qui ne saisissent pas le module de Young, deux vidéos YouTube éclaircissent bien le sujet :

- une [première](#) assez courte qui illustre le comportement moléculaire,
- une [seconde](#) qui détaille les calculs du module.

L'[article anglais](#) de Wikipedia sur la résistance des matériaux détaille bien les différents types de forces et de stress.

Résistance à l'impact

Un essai d'impact est un type d'essai mécanique utilisé pour déterminer la capacité d'un matériau à résister à des contraintes soudaines et élevées, telles que celles qui peuvent survenir lors d'un choc. L'essai consiste à soumettre un échantillon du matériau à un choc contrôlé, puis à mesurer la

quantité d'énergie absorbée par le matériau avant qu'il ne se brise ou ne se rompe.

Il existe plusieurs types d'essais d'impact, notamment :

- **Essai d'impact Izod** : Dans cet essai, un échantillon du matériau est serré dans un étau, et un pendule avec une quantité d'énergie fixe est balancé dans l'échantillon, créant une entaille. L'énergie nécessaire pour briser l'échantillon est alors mesurée.
- **Essai d'impact Charpy** : Cet essai est similaire à l'essai d'impact Izod, mais l'échantillon n'est pas entaillé, et le pendule est autorisé à se balancer à travers l'échantillon. L'énergie absorbée par l'échantillon est mesurée lorsqu'il se brise.
- **Essai d'impact à poids tombant** (drop weight) : Dans cet essai, un poids est laissé tomber sur un échantillon du matériau à partir d'une hauteur fixe, et la quantité d'énergie absorbée par le matériau avant qu'il ne se brise est mesurée.
- **Essai d'impact instrumenté** : Cet essai utilise un équipement spécialisé pour mesurer la force, le déplacement et le temps pendant l'événement de choc, fournissant une analyse plus détaillée du comportement du matériau sous contrainte de choc.

Les résultats d'un essai d'impact sont toujours exprimés en Joules et permettent d'évaluer la résistance et la ténacité d'un matériau, ce qui est important dans les applications telles que l'ingénierie automobile et aérospatiale, où les matériaux doivent être capables de résister à des contraintes de choc élevées.

Traction (tensile strength)

Dans un test de traction, un échantillon du matériau est soumis à une charge de traction uniaxiale croissante jusqu'à ce qu'il se brise. La force appliquée et la déformation résultante sont enregistrées, et les données sont utilisées pour calculer la résistance à la traction ultime (UTS pour ultimate tensile strength), la limite d'élasticité et l'allongement du matériau.

Ce test, dont les résultats s'expriment en Pascal (Pa) établit différentes propriétés :

- La **résistance à la traction ultime (UTS ou Ultimate Tensile Strength)** est la capacité du matériau à supporter des **charges de traction** et est une considération importante dans la conception de structures et de composants.
- La **limite d'élasticité** (Yield strength) est une considération importante dans la conception de composants soumis à des **charges cycliques**.
- L'**allongement à la rupture d'un matériau est une mesure de sa ductilité** est une considération importante dans la conception de composants soumis à des **charges d'impact ou de choc**.

Test de compression

Le test de compression est une autre méthode couramment utilisée pour mesurer la **résistance et la rigidité des matériaux**. Dans un test de compression, un échantillon du matériau est soumis à

une charge de compression uniaxiale croissante jusqu'à ce qu'il se brise. La force appliquée et la déformation résultante sont enregistrées, et les données sont utilisées pour calculer la résistance à la compression, la limite d'élasticité et le module d'élasticité du matériau.

- La **résistance à la compression** est une considération importante dans la conception de structures et de composants soumis à des **charges de compression**, telles que des colonnes, des fondations et des ponts.
- La **limite d'élasticité** est une considération importante dans la conception de composants soumis à des **charges cycliques**.
- Le **module d'élasticité** est une considération importante dans la conception de structures et de composants soumis à la flexion, à la torsion ou à d'autres types de déformation.

Une considération importante dans les tests de compression est la possibilité de flambement, ou d'instabilité latérale, dans l'échantillon de test. Le flambement peut se produire lorsqu'une colonne ou une poutre mince est soumise à une charge de compression, ce qui l'amène à se plier ou à se déformer sur le côté.

Pour éviter le flambement dans les tests de compression, l'échantillon de test doit être aussi court et rigide que possible, et la charge doit être appliquée aussi près que possible du centre de gravité de l'échantillon.

Test de flexion

Les essais de flexion (bending test ou flexural test), également appelés essais de pliage, sont une méthode utilisée pour **mesurer la résistance et la rigidité des matériaux soumis à des charges de flexion**.

Dans un essai de flexion, un échantillon du matériau est **soumis à une charge croissante qui est appliquée perpendiculairement à son axe longitudinal**, ce qui le fait plier. La force appliquée et la déformation résultante sont enregistrées, et les données sont utilisées pour calculer la résistance à la flexion, la limite d'élasticité et le module d'élasticité du matériau.

- La **résistance à la flexion** est une considération importante dans la conception de structures et de composants soumis à des **charges de flexion**, telles que des poutres, des supports et des plaques.
- La **limite d'élasticité** est une considération importante dans la conception de composants soumis à des **charges cycliques**.
- Le **module de Young** est une considération importante dans la conception de structures et de composants soumis à la flexion, à la torsion ou à d'autres types de déformation.

Une considération importante dans les essais de flexion est le type de charge et les conditions de support utilisés dans le test. Les types de charge les plus courants sont la flexion à trois points et la flexion à quatre points, qui diffèrent par le nombre de points d'application de la charge. Les conditions de support peuvent également varier, certains tests utilisant des supports simples et

d'autres des dispositifs plus complexes. Le choix de la charge et des conditions de support dépend de l'application spécifique et des propriétés les plus importantes pour l'utilisation prévue du matériau.

Les essais de flexion sont un outil précieux pour comprendre le comportement mécanique des matériaux et pour sélectionner des matériaux pour des applications spécifiques. L'utilisation de méthodes d'essai standardisées et d'unités de mesure assure la fiabilité et la comparabilité des résultats des essais de flexion.

Test de dureté

Les essais de dureté sont une méthode utilisée pour mesurer la résistance d'un matériau à la déformation ou à la pénétration. C'est une considération importante dans la conception de composants et de systèmes qui sont soumis à l'usure, aux chocs ou à d'autres types de chargement.

Il existe plusieurs types d'essais de dureté, chacun utilisant une méthode différente pour appliquer une charge au matériau et mesurer sa réponse. Voici quelques-uns des types d'essais de dureté les plus courants :

- **Essai de dureté Brinell** : Dans ce test, une bille en acier trempé ou en carbure est pressée dans la surface du matériau avec une force connue. Le diamètre de l'indentation résultante est mesuré, et le nombre de dureté Brinell (BHN) est calculé en divisant la force appliquée par la surface de l'indentation.
- **Essai de dureté Vickers** : Dans ce test, un indenteur en pyramide de diamant est pressé dans la surface du matériau avec une force connue. La taille de l'indentation résultante est mesurée, et le nombre de dureté Vickers (VHN) est calculé en divisant la force appliquée par la surface de l'indentation.
- **Essai de dureté Rockwell** : Dans ce test, un indenteur en diamant ou en acier est utilisé pour appliquer une charge au matériau en deux étapes. La première étape applique une charge mineure pour établir un datum zéro, et la deuxième étape applique une charge majeure pour créer une indentation. La profondeur de l'indentation est mesurée, et le nombre de dureté Rockwell (RHN) est calculé en fonction de la différence entre le datum zéro et la profondeur finale.
- **Essai de dureté Shore duromètre** : Dans ce test, un indenteur à ressort est utilisé pour mesurer la résistance du matériau à la déformation. L'indenteur est pressé dans la surface du matériau, et la force nécessaire pour enfoncer l'indenteur d'une distance connue est mesurée. Le nombre de dureté Shore duromètre est calculé en fonction de la force nécessaire pour enfoncer l'indenteur.

Le choix de l'essai de dureté dépend de l'application spécifique et des propriétés qui sont les plus importantes pour l'utilisation prévue du matériau. Par exemple, l'essai de dureté Brinell est couramment utilisé pour les grandes sections épaisses de métal, tandis que l'essai de dureté Vickers est souvent utilisé pour les sections plus petites et plus minces. L'essai de dureté Rockwell

est couramment utilisé pour les métaux traités thermiquement et l'acier trempé, tandis que l'essai de dureté Shore duromètre est souvent utilisé pour les élastomères et autres matériaux souples.

Propriétés thermiques

Les propriétés thermiques sont un aspect important de la caractérisation des matériaux, car elles peuvent avoir une grande influence sur les performances et le comportement d'un matériau dans une application donnée. Voici quelques-unes des propriétés thermiques les plus couramment utilisées :

- **Conductivité thermique** : il s'agit d'une mesure de la capacité d'un matériau à conduire la chaleur. Les matériaux à haute conductivité thermique, tels que les métaux, sont bons pour transférer la chaleur, tandis que les matériaux à faible conductivité thermique, tels que les isolants, ne le sont pas. La conductivité thermique est généralement mesurée en unités de watts par mètre-kelvin (W/m-K).
- **Capacité thermique massique** : il s'agit d'une mesure de la capacité d'un matériau à stocker la chaleur. Les matériaux à capacité thermique massique élevée, tels que l'eau, peuvent absorber et libérer beaucoup d'énergie thermique sans subir une grande variation de température. Les matériaux à faible capacité thermique massique, tels que les métaux, subiront une variation de température plus importante avec la même quantité d'énergie thermique. La capacité thermique massique est généralement mesurée en unités de joules par kilogramme-kelvin (J/kg-K).
- **Dilatation thermique** (thermal expansion) : il s'agit d'une mesure de la façon dont la taille et la forme d'un matériau changent en réponse aux changements de température. Les matériaux à dilatation thermique élevée, tels que la plupart des métaux, s'étendront et se contracteront davantage avec les changements de température que les matériaux à faible dilatation thermique, tels que les céramiques. La dilatation thermique est généralement mesurée en unités d'inverse de température, telles que par degré Celsius (1/°C) ou par kelvin (1/K).
- **Point de fusion** : il s'agit de la température à laquelle un matériau solide passe à l'état liquide. Le point de fusion est une considération importante dans les applications où un matériau peut être exposé à des températures élevées, telles que dans les composants de moteur ou les ustensiles de cuisine.
- **Température de transition vitreuse** : il s'agit de la température à laquelle un matériau amorphe (non cristallin) passe d'un état dur et vitreux à un état souple et caoutchouteux. La température de transition vitreuse est une considération importante dans les applications où la flexibilité ou la rigidité d'un matériau peut être affectée par la température, telles que dans les polymères ou les élastomères.
- **Résistance au choc thermique** : il s'agit d'une mesure de la capacité d'un matériau à résister à des changements rapides et extrêmes de température sans se fissurer ni se casser. Les matériaux ayant une résistance élevée au choc thermique, tels que certains céramiques, sont souvent utilisés dans les applications qui impliquent des changements soudains de température.

Tg vs HDT

La **température de transition vitreuse** (Tg glass transition temp) est la **température à laquelle un matériau amorphe (non cristallin) passe d'un état dur et cassant à un état souple et élastique**. Cette transition est due à la mobilité accrue des chaînes moléculaires du matériau à des températures plus élevées. Tg est une considération importante dans la sélection de matériaux pour les applications qui nécessitent de la flexibilité ou de l'élasticité.

La **température de fléchissement sous charge** (HDT heat deflection temp), en revanche, est une mesure de la **capacité d'un matériau à résister à une certaine charge ou déformation à des températures élevées**. HDT est généralement déterminé en soumettant un échantillon du matériau à une charge ou un stress spécifique tout en augmentant progressivement la température.

La température à laquelle l'échantillon se déforme ou se déforme d'un certain montant est enregistrée comme la HDT. HDT est une considération importante dans la sélection de matériaux pour les applications qui impliquent des températures élevées et un stress mécanique, comme dans les industries automobile ou aérospatiale.

En résumé, Tg est une mesure de la transition d'un matériau d'un état dur et cassant à un état souple et élastique, tandis que HDT est une mesure de la capacité d'un matériau à résister à une certaine charge ou déformation à des températures élevées.

Autres propriétés importantes

Voici quelques propriétés supplémentaires des matériaux qui sont importantes à prendre en compte, ainsi qu'une brève explication de chacune d'entre elles :

1. **Conductivité thermique** : Il s'agit d'une mesure de la capacité d'un matériau à conduire la chaleur, mesuré en watts par mètre-kelvin (W/m-K). Les matériaux à haute conductivité thermique, tels que les métaux, sont bons pour transférer la chaleur, tandis que les matériaux à faible conductivité thermique, tels que les plastiques et les isolants, sont bons pour empêcher le transfert de chaleur applications telles que l'aérospatiale et l'ingénierie automobile, où des tolérances précises sont requises.
2. **Conductivité électrique** : Il s'agit d'une mesure de la capacité d'un matériau à conduire l'électricité, mesuré en siemens par mètre (S/m). Les matériaux à haute conductivité électrique, tels que les métaux, sont bons pour transporter le courant électrique, tandis que les matériaux à faible conductivité électrique, tels que les plastiques et les isolants, sont bons pour empêcher le courant électrique de circuler.
3. **Densité** : Il s'agit d'une mesure de la masse d'un matériau par unité de volume, mesuré en grammes par centimètre cube (g/cm³). Les matériaux à haute densité, tels que les métaux, sont plus lourds et plus compacts, tandis que les matériaux à faible densité, tels que les plastiques et les mousses, sont plus légers et moins compacts.

4. **Résistance à l'usure** : la capacité d'un matériau à résister à l'usure et à l'abrasion peut être une considération importante dans les applications telles que les roulements, les engrenages et les outils de coupe.
5. **Résistance à la corrosion** : Il s'agit d'une mesure de la capacité d'un matériau à résister à la corrosion, qui est la dégradation d'un matériau due à des réactions chimiques ou électrochimiques. Les matériaux à haute résistance à la corrosion, tels que l'acier inoxydable et l'aluminium, sont capables de résister à l'exposition à des environnements corrosifs sans se dégrader, tandis que les matériaux à faible résistance à la corrosion, tels que l'acier au carbone, ne le sont pas.

Résistance à l'usure

La résistance à l'usure fait référence à la **capacité d'un matériau à résister aux forces mécaniques qui peuvent causer des dommages de surface**, tels que des rayures, de l'abrasion ou de l'érosion. L'usure peut être causée par une variété de facteurs, notamment la **friction, l'impact et la contamination** par des particules. Les matériaux à haute résistance à l'usure sont souvent utilisés dans les applications où il y a beaucoup de contact ou de mouvement entre les surfaces, comme les roulements, les engrenages et les outils de coupe.

Il existe plusieurs façons de mesurer la résistance à l'usure, notamment :

- **Résistance à l'abrasion** : il s'agit d'une mesure de la capacité d'un matériau à résister aux dommages de surface causés par le frottement ou le grattage d'une surface dure et rugueuse. Elle est généralement mesurée à l'aide d'un test normalisé, tel que le test d'abrasion Taber.
- **Résistance à l'érosion** : il s'agit d'une mesure de la capacité d'un matériau à résister aux dommages de surface causés par l'impact de particules ou de fluides. Elle est généralement mesurée à l'aide d'un test normalisé, tel que le test d'érosion ASTM G73.
- **Résistance aux rayures** : il s'agit d'une mesure de la capacité d'un matériau à résister aux dommages de surface causés par le glissement ou le grattage d'un objet tranchant. Elle est généralement mesurée à l'aide d'un test normalisé, tel que le test de rayure ASTM D7027.

Alliages d'Aluminium

Dans la production de pièces en aluminium, l'aluminium pur n'est presque jamais utilisé. On utilise des alliages, le choix de ce dernier est primordial car il détermine les propriétés des pièces finales.

Il existe deux grandes familles d'alliages d'aluminium, en fonction du procédé de fabrication :

- Les alliages de corroyage (*Wrought* en anglais) sont mis en forme à partir d'une forme brute, en utilisant des procédés tels que l'usinage CNC, le forgeage et l'extrusion.
- Les alliages de fonderie (casting) sont mis en forme en faisant fondre le métal et en le versant dans un moule.

Désignation de trempe

L'aluminium est souvent soumis à un traitement après fabrication, tel qu'un traitement thermique, un recuit (annealing) ou un traitement chimique. La désignation de trempe est un système utilisé pour indiquer le traitement spécifique qu'un alliage a subi. Il est commun aux deux systèmes d'alliages et suit le code d'alliage, séparé par un tiret, une lettre et éventuellement un à trois chiffres (par exemple, 6061-T6).

Les différentes désignations de trempe sont les suivantes :

- **-F** : tel que fabriqué
- **-H** : écroui (déformé à froid) avec ou sans traitement thermique
 - **-H1** : écroui sans traitement thermique
 - **-H2** : écroui et partiellement recuit
 - **-H3** : écroui et stabilisé par chauffage à basse température
- Le deuxième chiffre de la désignation -H indique le degré de dureté :
 - **-HX2** = 1/4 dur
 - **-HX4** = 1/2 dur
 - **-HX6** = 3/4 dur
 - **-HX8** = plein dur
 - **-HX9** = extra dur
- **-O** : recuit
- **-T** : traité thermiquement pour produire des trempes stables
 - **-T1** : refroidi après déformation à chaud et vieilli naturellement (à température ambiante)
 - **-T2** : refroidi après déformation à chaud, déformé à froid et vieilli naturellement
 - **-T3** : traité thermiquement en solution et déformé à froid
 - **-T4** : traité thermiquement en solution et vieilli naturellement

- **-T5** : refroidi après déformation à chaud et vieilli artificiellement (à température élevée)
 - **-T51** : soulagé par étirement
 - **-T510** : pas de redressage supplémentaire après étirement
 - **-T511** : redressage mineur après étirement
 - **-T52** : soulagé par traitement thermique
- **-T6** : traité thermiquement en solution et vieilli artificiellement
 - **-T651** : traité thermiquement en solution, soulagé par étirement et vieilli artificiellement
- **-T7** : traité thermiquement en solution et stabilisé
- **-T8** : traité thermiquement en solution, déformé à froid et vieilli artificiellement
- **-T9** : traité thermiquement en solution, vieilli artificiellement et déformé à froid
- **-T10** : refroidi après déformation à chaud, déformé à froid et vieilli artificiellement
- **-W** : traité thermiquement en solution uniquement

NB : **-W** est une désignation intermédiaire relativement molle qui s'applique après le traitement thermique et avant que le vieillissement ne soit terminé. La condition -W peut être prolongée à des températures extrêmement basses, mais pas indéfiniment, et selon le matériau, elle durera généralement pas plus de 15 minutes à température ambiante.

Les grades de CNC

Je fais un abus de langage en utilisant le terme CNC, mais je pense que ça parle plus que le *corroyage*, j'entends donc par CNC l'ensemble des techniques d'usinage qui ne relèvent pas de la fonderie.

Le système le plus couramment utilisé pour classer les grades d'aluminium est le système à quatre chiffres, qui est basé sur les éléments d'alliage et la trempe du métal.

Le premier chiffre du code à quatre chiffres indique l'élément d'alliage majeur :

- **1xxx**: 99% ou plus d'aluminium, avec une petite quantité d'éléments d'alliage ajoutés pour une meilleure résistance à la corrosion et à la formabilité.
- **2xxx**: Alliages d'aluminium-cuivre, qui ont une haute résistance et une bonne résistance à la fatigue, mais sont sensibles à la corrosion.
- **3xxx**: Alliages d'aluminium-manganèse, qui ont une résistance modérée et une bonne résistance à la corrosion.
- **4xxx**: Alliages d'aluminium-silicium, qui sont utilisés pour les coulées et ont une bonne fluidité et une faible rétraction.
- **5xxx**: Alliages d'aluminium-magnésium, qui ont une haute résistance et une bonne résistance à la corrosion, et sont couramment utilisés dans les industries automobile et aérospatiale.
- **6xxx**: Alliages d'aluminium-magnésium-silicium, qui ont une bonne formabilité et soudabilité, et sont couramment utilisés dans les industries de la construction et de

l'automobile.

- **7xxx**: Alliages d'aluminium-zinc, qui ont une haute résistance et une bonne résistance à la fatigue, mais sont sensibles à la corrosion.
- **8xxx**: Alliages d'aluminium-autres, qui ne sont pas couverts par les autres catégories.

Le deuxième chiffre du code indique les modifications apportées à l'élément d'alliage majeur ou les autres éléments d'alliage qui ont été ajoutés.

Les troisième et quatrième chiffres du code indiquent l'alliage spécifique et l'association d'aluminium qui l'a développé. Par exemple, 6082 alliage avec environ 0,7-1,2 % Mg, 0,7-1,3 % Si, avec de petites quantités de manganèse et de cuivre.

Série 1xxx - Aluminium pur à 99% +

La série 1 de l'aluminium fait référence à un matériau contenant 99% d'aluminium pur ou plus. Il a une **excellente résistance à la corrosion** et une **conductivité électrique et thermique**. Ductile à l'état pur, cela rend le matériau idéal pour les applications électriques ou l'utilisation externe où il est exposé aux éléments, mais peu adapté aux situations où la force est essentielle.

Série 2xxx - Alliage de cuivre

Les alliages d'aluminium de la série 2000 sont principalement des alliages d'aluminium-cuivre. Ils sont reconnus pour leur haute résistance, comparable à celle de certains aciers, et sont souvent utilisés dans l'industrie aéronautique et aérospatiale. Cependant, leur résistance à la corrosion est inférieure à celle des autres séries d'aluminium, et ils nécessitent souvent un traitement de surface pour améliorer cette caractéristique.

On peut les protéger par placage. Cependant, autrefois très utilisé dans l'aérospatiale, ces alliages sont souvent remplacé par la Série 7xxx.

- **Composition** : Ces alliages contiennent principalement de l'aluminium et du cuivre (3-6 %), avec d'autres éléments tels que le magnésium, le manganèse, et le zinc en quantités variables.
- **Résistance à la corrosion** : Moins bonne que les autres séries, nécessitant souvent un revêtement protecteur.
- **Traitabilité thermique** : Très bonne, ces alliages peuvent être durcis par traitement thermique.
- **Travail à froid** : Limitée comparée aux autres séries en raison de leur dureté.
- **Soudabilité** : Moyenne à faible, nécessitant des techniques spécifiques pour éviter les fissures et la perte de propriétés mécaniques.

Applications typiques

Les alliages d'aluminium de la série 2000 sont utilisés dans des applications nécessitant une haute résistance et de bonnes performances mécaniques.

Quelques exemples d'applications :

- **Industrie aéronautique et aérospatiale** : Pièces de structure, composants de fuselage, ailes, et réservoirs de carburant.
- **Industrie automobile** : Composants de suspension, châssis.
- **Applications militaires** : Composants de véhicules blindés, équipements de combat.
- **Fabrication d'outillage** : Matrices, moules, et outils nécessitant une haute résistance.

En résumé, les alliages d'aluminium de la série 2000 sont des matériaux à haute résistance, adaptés à des applications exigeantes où les propriétés mécaniques sont prioritaires. Ils nécessitent toutefois des traitements spécifiques pour améliorer leur résistance à la corrosion et pour optimiser leurs performances en service.

Série 3xxx - Alliage de manganèse

L'aluminium de la série 3 est allié avec du manganèse, ce qui en fait un compromis entre la série 1 et la série 2. Il a une augmentation modérée de la rigidité par rapport à la série 1 sans affecter autant la résistance à la corrosion que la série 2.

Ils sont connus pour leur bonne résistance à la corrosion, leur formabilité, et leur bonne soudabilité. Cela en fait un choix populaire dans les grades d'aluminium et est souvent trouvé dans la toiture, les réservoirs de stockage, les portes de garage et les articles de cuisine.

- **Composition** : Principalement composés d'aluminium avec environ 1-1,5 % de manganèse. Ils peuvent contenir d'autres éléments en petites quantités pour améliorer certaines propriétés.
- **Résistance à la corrosion** : Excellente, surtout en environnements marins ou industriels.
- **Formabilité** : Très bonne, ce qui les rend idéaux pour des applications nécessitant un formage complexe.
- **Soudabilité** : Bonne, ce qui facilite les assemblages par soudure.
- **Travail à froid** : Ces alliages peuvent être renforcés par le travail à froid (écrouissage).

Applications typiques

Les alliages d'aluminium de la série 3000 sont utilisés dans de nombreuses applications en raison de leurs bonnes propriétés mécaniques et leur excellente résistance à la corrosion. Voici quelques exemples d'applications :

- **Industrie alimentaire** : Contenants, emballages, et ustensiles de cuisine.
- **Bâtiment** : Toitures, bardages, et gouttières.
- **Transport** : Réservoirs de carburant, panneaux de carrosserie.

- **Échangeurs de chaleur** : Ailettes et tubes.

En résumé, les alliages d'aluminium de la série 3000 sont des matériaux polyvalents et performants, adaptés à une large gamme d'applications nécessitant une bonne résistance mécanique, une excellente résistance à la corrosion, et une bonne formabilité.

Série 4xxx - Alliage de silicium

Les alliages d'aluminium de la série quatre sont principalement formés avec du silicium, ce qui abaisse le point de fusion de l'aluminium sans provoquer de fragilité et en fait le grade idéal pour le soudage et la fonte.

Il est couramment utilisé pour les matériaux de remplissage de brasage et les composants nécessitant une bonne résistance à la fatigue thermique, comme les pistons automobiles.

- **Composition** : Principalement composés d'aluminium avec des teneurs en silicium variant généralement entre 4 % et 12 %. Le silicium améliore la coulabilité et réduit le point de fusion.
- **Résistance à la corrosion** : Bonne, améliorée par la teneur en silicium.
- **Propriétés de fonderie** : Excellentes, le silicium améliore la fluidité du métal fondu et réduit la contraction à la solidification.
- **Soudabilité** : Bonne, souvent utilisé comme alliage d'apport pour le soudage d'autres alliages d'aluminium.
- **Traitabilité thermique** : Ces alliages ne peuvent généralement pas être durcis par traitement thermique, mais certains peuvent être renforcés par écrouissage.

Applications typiques

Les alliages d'aluminium de la série 4000 sont utilisés dans diverses applications grâce à leur bonne coulabilité et leur résistance à la corrosion :

- **Soudage et brasage** : Alliages de la série 4000 sont couramment utilisés comme alliages d'apport pour le soudage et le brasage de divers alliages d'aluminium.
- **Industrie automobile** : Pièces de moteur telles que les pistons (alliage 4032), où la résistance à l'usure et la stabilité dimensionnelle à haute température sont importantes.
- **Fonderie** : Composants coulés nécessitant une bonne fluidité et une faible contraction lors de la solidification.
- **Architecture et construction** : Matériaux de revêtement et éléments décoratifs grâce à leur bonne résistance à la corrosion et leur capacité à prendre des finitions attrayantes.

En conclusion, les alliages d'aluminium de la série 4000 sont particulièrement adaptés aux applications nécessitant une bonne coulabilité, une résistance à la corrosion et une bonne soudabilité. Bien qu'ils ne soient pas aussi résistants mécaniquement que certains alliages des séries 2000 ou 7000, ils offrent des avantages spécifiques dans les applications de soudage, de brasage et de coulée.

Serie 5xxx – Alliage de magnésium

Les alliages d'aluminium de la série 5000 sont principalement des alliages d'aluminium-magnésium. Ils sont reconnus pour leur excellente résistance à la corrosion, leur haute résistance mécanique, et leur bonne formabilité. Ces alliages sont particulièrement adaptés pour des applications dans des environnements marins et industriels agressifs.

- **Composition** : Principalement composés d'aluminium avec des pourcentages de magnésium allant de 0,5 % à 5 %. Certains alliages peuvent également contenir de petites quantités de manganèse, de fer, de silicium, et de chrome pour améliorer certaines propriétés.
- **Résistance à la corrosion** : Excellente, surtout en environnements marins et industriels.
- **Résistance mécanique** : Modérée à élevée, améliorable par écrouissage (travail à froid).
- **Formabilité** : Très bonne, ce qui les rend idéaux pour des applications nécessitant un formage complexe.
- **Soudabilité** : Excellente, avec une bonne résistance des joints soudés.

Applications typiques

Les alliages d'aluminium de la série 5000 sont utilisés dans diverses applications nécessitant une excellente résistance à la corrosion, une bonne formabilité, et une résistance mécanique adéquate :

- **Industrie maritime** : Coques de bateaux, structures de navires, équipements marins.
- **Transport** : Réservoirs de carburant, carrosseries de camions, remorques, véhicules blindés.
- **Construction** : Panneaux de façade, toitures, éléments architecturaux.
- **Réservoirs et conteneurs** : Réservoirs de stockage, conteneurs sous pression.
- **Industrie alimentaire** : Équipements de transformation alimentaire, conteneurs de stockage.

En résumé, les alliages d'aluminium de la série 5000 offrent un excellent équilibre entre résistance mécanique, formabilité, et résistance à la corrosion, ce qui les rend particulièrement adaptés pour des applications dans des environnements marins, industriels, et de transport.

Leur bonne soudabilité et leur aptitude à être formés en font des matériaux polyvalents pour une large gamme de pièces mécaniques et de structures.

Serie 6xxx – Alliage de magnésium et silicium

Pour les pièces mécaniques nécessitant une combinaison de résistance, de durabilité, de formabilité et de bonne résistance à la corrosion, les alliages d'aluminium de la série 6000 sont

souvent les plus appropriés. Ces alliages sont principalement composés d'aluminium, de magnésium et de silicium, et sont très polyvalents, ce qui les rend adaptés à une large gamme d'applications mécaniques.

- **Composition** : Principalement composés d'aluminium avec du magnésium (0,6-1,2 %) et du silicium (0,4-1,0 %).
- **Résistance mécanique** : Modérée à élevée, avec une bonne combinaison de résistance à la traction et de limite d'élasticité.
- **Résistance à la corrosion** : Excellente, meilleure que celle des séries 2000 et 7000.
- **Traitabilité thermique** : Bonne, ces alliages peuvent être durcis par traitement thermique.
- **Formabilité** : Très bonne, ce qui permet une mise en forme complexe.
- **Soudabilité** : Excellente, ce qui facilite les assemblages par soudure.

Propriétés mécaniques spécifiques

Voici quelques alliages typiques de la série 6000 et leurs propriétés mécaniques courantes :

- **6061**
 - **Composition** : Environ 0,8-1,2 % Mg, 0,4-0,8 % Si, avec de petites quantités de cuivre, de fer, et de chrome.
 - **Limite d'élasticité** (Rp0,2) : 240-310 MPa
 - **Résistance à la traction** (Rm) : 260-350 MPa
 - **Allongement à la rupture** : 8-17 %
 - **Dureté** (HB) : 95-105
- **6063**
 - **Composition** : Environ 0,45-0,9 % Mg, 0,2-0,6 % Si, avec de petites quantités de fer, de cuivre, et de manganèse.
 - **Limite d'élasticité** (Rp0,2) : 215-240 MPa
 - **Résistance à la traction** (Rm) : 240-290 MPa
 - **Allongement à la rupture** : 10-18 %
 - **Dureté** (HB) : 70-80
- **6082**
 - **Composition** : Environ 0,7-1,2 % Mg, 0,7-1,3 % Si, avec de petites quantités de manganèse et de cuivre.
 - **Limite d'élasticité** (Rp0,2) : 260-310 MPa
 - **Résistance à la traction** (Rm) : 310-350 MPa
 - **Allongement à la rupture** : 8-12 %
 - **Dureté** (HB) : 95-105

Applications typiques

Les alliages d'aluminium de la série 6000 sont utilisés dans de nombreuses applications mécaniques en raison de leur bonne combinaison de propriétés mécaniques et de résistance à la corrosion. Voici quelques exemples d'applications :

- **Construction** : Structures, charpentes, et échafaudages.
- **Transport** : Composants automobiles (châssis, carrosserie), cadres de bicyclettes, et éléments de transport ferroviaire.
- **Industrie maritime** : Bateaux, ponts, et plateformes.
- **Équipements industriels** : Pièces de machines, équipements de fabrication, et profilés extrudés.
- **Électronique** : Boîtiers et châssis pour appareils électroniques.

En résumé, les alliages d'aluminium de la série 6000 offrent une excellente combinaison de résistance mécanique, de formabilité, de soudabilité et de résistance à la corrosion, ce qui les rend très polyvalents et adaptés à une large gamme de pièces mécaniques.

Serie 7xxx – Alliage de zinc

Pour les pièces mécaniques nécessitant une haute résistance, les alliages d'aluminium de la série 7000 sont généralement les plus convenables. Ces alliages sont principalement composés d'aluminium et de zinc, avec des ajouts de magnésium et de cuivre, et sont connus pour leur excellente résistance mécanique et leur durabilité.

Voici un aperçu des principales caractéristiques de cette série d'alliages :

- **Composition** : Principalement composés d'aluminium avec des pourcentages élevés de zinc (jusqu'à 8 %), ainsi que des ajouts de magnésium et de cuivre pour améliorer les propriétés mécaniques.
- **Résistance mécanique** : Très élevée, souvent la plus haute parmi les alliages d'aluminium.
- **Traitabilité thermique** : Très bonne, ces alliages peuvent être significativement durcis par traitement thermique.
- **Résistance à la corrosion** : Variable, mais généralement inférieure à celle des séries 5000 et 6000 ; souvent améliorée par des traitements de surface ou des revêtements.
- **Usinabilité** : Bonne, bien que la dureté élevée puisse poser des défis pour certaines opérations d'usinage.
- **Soudabilité** : Moyenne à faible, nécessitant des techniques spéciales pour éviter les fissures.

Propriétés mécaniques spécifiques

Voici quelques alliages typiques de la série 6000 et leurs propriétés mécaniques courantes :

- **7075**
 - **Composition** : Environ 5,6-6,1 % Zn, 2,1-2,5 % Mg, 1,2-1,6 % Cu.
 - **Limite d'élasticité** (Rp0,2) : 503-524 MPa
 - **Résistance à la traction** (Rm) : 572-621 MPa
 - **Allongement à la rupture** : 11-13 %
 - **Dureté** (HB) : 150-160

- **7050**

- **Composition** : Environ 5,7-6,7 % Zn, 2,0-2,6 % Mg, 2,0-2,6 % Cu, 0,12 % Zr.
- **Limite d'élasticité** (Rp0,2) : 455-500 MPa
- **Résistance à la traction** (Rm) : 520-570 MPa
- **Allongement à la rupture** : 8-10 %
- **Dureté** (HB) : 160-180

- **7475**

- **Composition** : Environ 5,2-6,2 % Zn, 1,9-2,6 % Mg, 1,2-1,9 % Cu.
- **Limite d'élasticité** (Rp0,2) : 455-485 MPa
- **Résistance à la traction** (Rm) : 540-590 MPa
- **Allongement à la rupture** : 10-12 %
- **Dureté** (HB) : 150-170

Applications typiques

Les alliages d'aluminium de la série 7000 sont utilisés dans des applications où la haute résistance est critique. Voici quelques exemples d'applications :

- **Industrie aéronautique et aérospatiale** : Composants de structure, ailes, fuselages, et trains d'atterrissage.
- **Sports et loisirs** : Cadres de bicyclettes, équipements de sport (clubs de golf, bâtons de hockey).
- **Industrie automobile** : Composants de châssis, pièces de suspension haute performance.
- **Applications militaires** : Véhicules blindés, équipements de défense.

En conclusion, pour des pièces mécaniques nécessitant une haute résistance, les alliages d'aluminium de la série 7000 sont généralement les plus appropriés en raison de leur excellente résistance mécanique, bien que des précautions doivent être prises pour gérer leur résistance à la corrosion et leur soudabilité.

Comparaison et recommandations

Pour les pièces mécaniques, les alliages d'aluminium doivent offrir une combinaison de haute résistance, de bonne résistance à la corrosion, de légèreté, et de résistance à la fatigue. Les alliages d'aluminium des séries 7000 et 6000 sont les plus couramment utilisés dans cette application en raison de leurs excellentes propriétés mécaniques.

Série 7000 (ex. 7075) : Recommandée pour les composants critiques où la résistance maximale est requise, tels que les cadres et les bras oscillants, mais nécessite une attention particulière pour la résistance à la corrosion, souvent traitée par anodisation ou autre revêtement protecteur.

Série 6000 (ex. 6061, 6082) : Recommandée pour les composants où un bon équilibre entre résistance, soudabilité, et résistance à la corrosion est nécessaire. Ces alliages sont souvent utilisés pour les pièces de suspension et les supports.

En conclusion, les alliages de la série 7000, en particulier le 7075, sont les plus adaptés pour les pièces nécessitant une haute résistance mécanique. Les alliages de la série 6000, tels que le 6061 et le 6082, sont également largement utilisés pour leurs bonnes propriétés mécaniques et leur excellente soudabilité et résistance à la corrosion.