

Données complémentaires
pour une meilleure approche
du chapitre

APPROCHE TECHNICO-ECONOMIQUE

Ch. 4 - **Notions élémentaires
sur le traitement thermique**
Ch. 8 - **Vocabulaire du métier
de la fixation**

BIBLIOTHEQUE & OUTILS

Ch. 9 - **Eléments chimiques
et leurs principales
caractéristiques**

ENVIRONNEMENT & LEGISLATION

Ch. 10 - **Usages de la profession
et préconisations générales**

1

Elaboration des matériaux

1.0 Élaboration de l'acier

Filière haut fourneau

Cette filière de production part de minerai de fer. Elle passe par deux étapes principales :

Le haut fourneau (voir schéma 1.0-2) va produire de la fonte. Pour 100 tonnes de fonte, il est consommé 250 tonnes de minerai, 100 tonnes de coke (combustible), 30 tonnes de caséine (fondant) et...100 000 m³ de vent !

Schématiquement, les matières constituant le lit de fusion circulent de haut en bas, fluides et gaz circulent de bas en haut.

Le coke a une double fonction : un rôle de combustible et un rôle de réducteur, pour s'emparer de l'oxygène du minerai (oxyde de fer). La réduction des oxydes de fer se fait à partir du monoxyde de carbone (CO) produit par le coke.

Le fer rendu liquide par les hautes températures s'écoule à travers le coke vers le creuset, en se chargeant de carbone pour donner de la fonte (phase de recarburation).

La fonte obtenue contient environ 3 à 4% de carbone, 0,5 à 3% de silicium, 0,3 à 1,5% de manganèse selon le minerai, du phosphore (de 0,1 à 3%) et du soufre (de 0,1 à 0,4%) provenant du coke, le reste étant du fer.

A ce stade, il existe deux possibilités :

- affinage de la fonte, pour l'élaboration des aciers
- amélioration de la fonte, par obtention d'une fonte dite de deuxième fusion (fonte de moulage).

Le convertisseur à oxygène (voir schéma 1.0-3) va permettre l'affinage. On souffle un mélange oxygène-air à travers le métal en fusion, ce qui fait brûler le carbone en excès ainsi que les autres éléments chimiques.

Il reste de 0,05 à 1,4% de carbone, 0,3 à 0,6% de silicium, 0,3 à 0,6% de manganèse, 0,05% de phosphore et 0,05% de soufre.

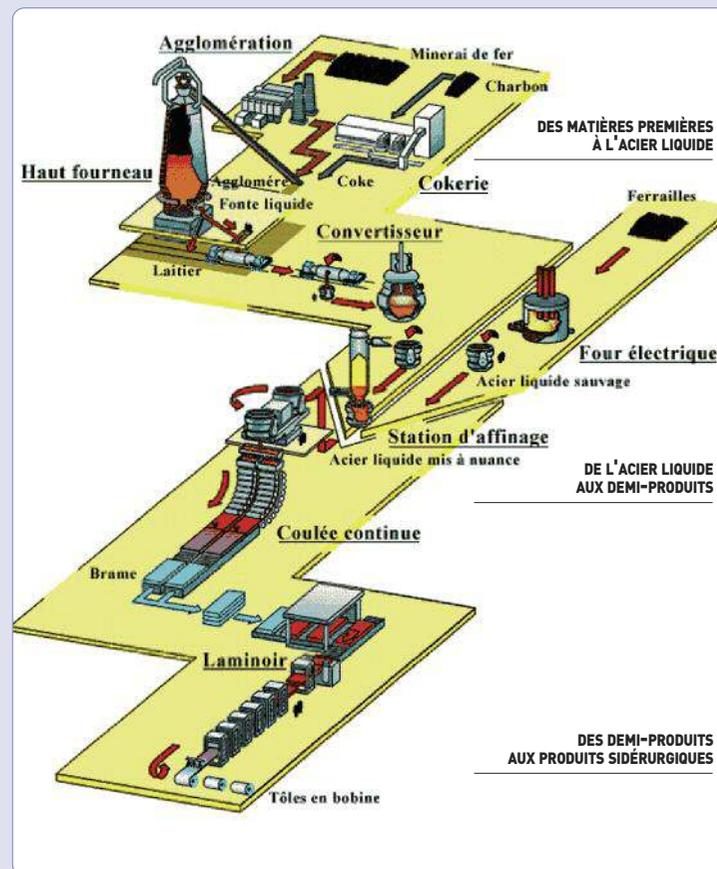
Filière électrique

Cette filière de production part de ferrailles. Les réactions dans **le four à arc** (voir schéma 1.0-4) sont semblables à celles qui interviennent dans un convertisseur à oxygène.

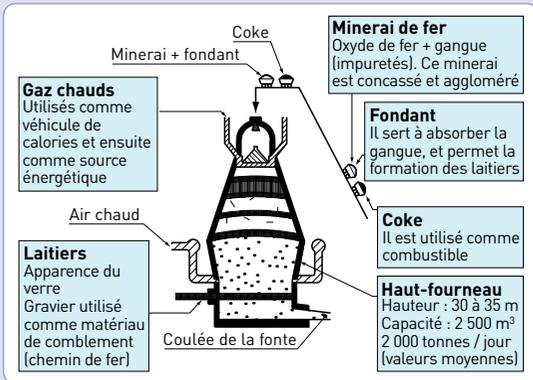
L'oxydation des impuretés est effectuée au moyen de :

- l'oxygène apporté par les impuretés oxydées de la charge métallique (ferrailles «rouillées»),
- l'oxygène pur apporté par les lances ou des tuyères placées en fond de sole,
- l'oxygène de l'air qui pénètre par la porte latérale ou les autres orifices du four.

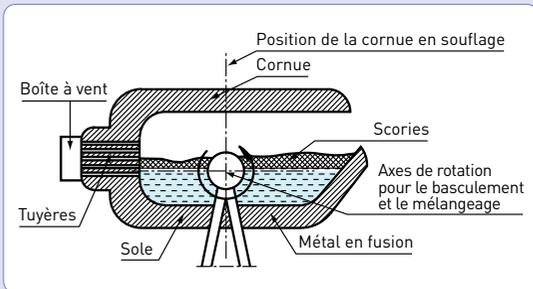
Les gaz produits sont captés et brûlés en aval du four. La durée de l'opération est inférieure à une heure. La composition de l'acier liquide en fin d'opération est voisine de celle obtenue au convertisseur, sauf pour la teneur en azote qui reste plus élevée.



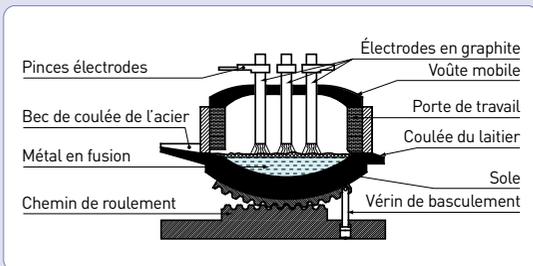
1.0-1 Schéma d'une aciérie



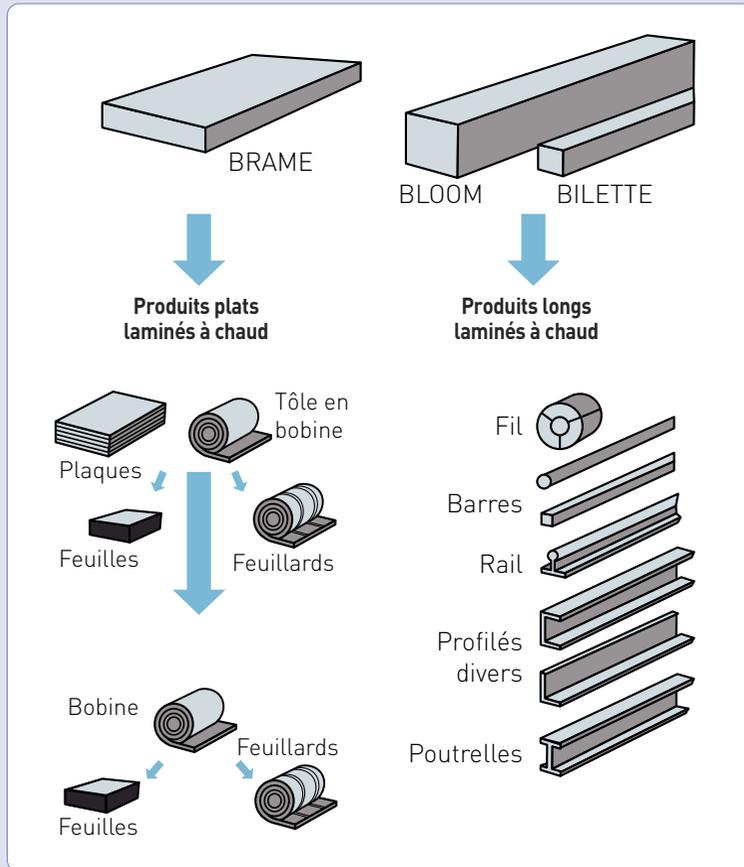
1.0-2 Schéma haut fourneau



1.0-3 Schéma convertisseur



1.0-4 Schéma four électrique

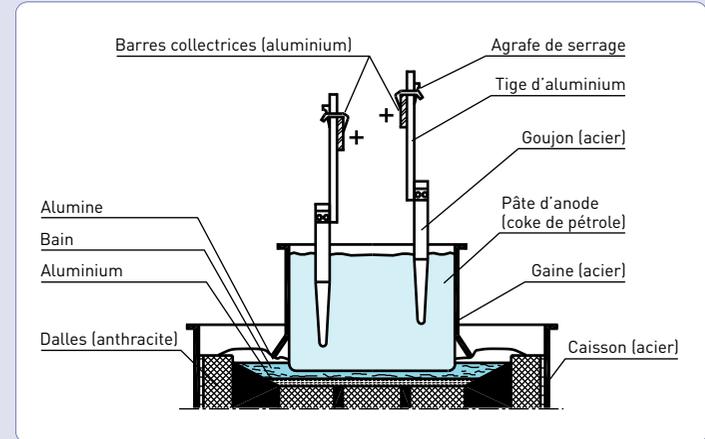
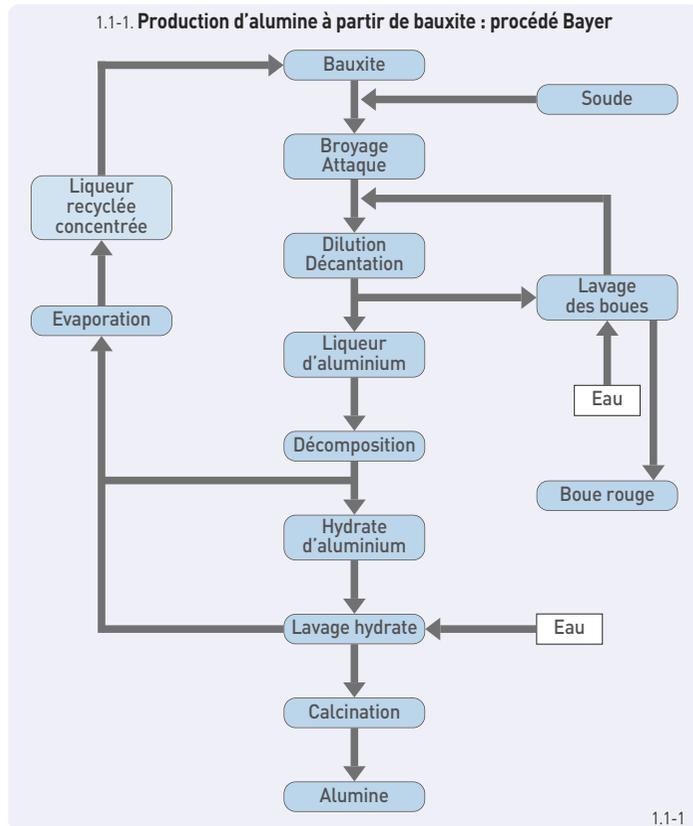


1.0-5 Demi-produits issus de coulée continue

1.1 Élaboration de l'aluminium

L'aluminium s'élabore à partir de l'extraction d'un minerai : la bauxite. La première phase est l'obtention d'alumine, la deuxième étant l'obtention de l'aluminium proprement dit.

Synoptique de la production d'aluminium



1.1-2 Schéma d'une cuve à aluminium à anode continue

Production de l'aluminium en lingots, métal de base des alliages

Le processus consiste en une électrolyse de l'alumine dissoute dans la cryolite fondue à 1000°C dans une cuve garnie de charbon. L'aluminium se dépose au fond de la cuve (cathode). Il se dégage de l'oxygène qui brûle les anodes de carbone pur.

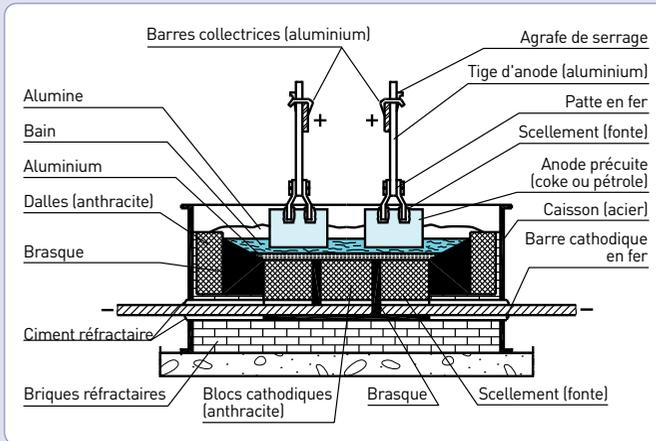
Les cuves sont montées en série pour utiliser la tension du courant continu produit par des redresseurs de courant. L'électrolyte est constitué d'un bain fluoré alimenté par la cryolite $\text{AlF}_3\text{-3NaF}$ qui est un composé stable où l'alumine se dissout.

Une anode unique de 6,5 x 2,1 m pour 100000 ampères glisse dans une gaine d'acier. Des goujons verticaux en acier de 130 mm de diamètre, relevés individuellement avant qu'ils n'arrivent dans le bain, supportent l'anode et y amènent le courant.

L'alimentation se fait par le haut en pâte crue, qui cuit au fur et à mesure de la descente de l'anode pour compenser l'usure.

Il faut 14500 kWh pour obtenir une tonne d'aluminium titrant en moyenne 99,5% (les impuretés principales sont le fer et le silicium). La phase suivante est un raffinage électrolytique pour obtenir un aluminium à 99,99%. Cette opération nécessite 18000 kWh en courant continu par tonne d'aluminium. L'importance de la consommation électrique dans ce procédé de production explique l'implantation courante des usines de production à proximité de barrages de production électrique.

Il existe aussi un procédé appelé «système anodique». Une cuve à anodes précuites de 75000 ampères comporte 28 anodes de 400 x 830 mm, de hauteur 500 mm. L'amenée de courant y est faite par des tiges de fer scellées à la fonte, boulonnées sur des barres d'aluminium, fixées elles-mêmes par des agrafes sur les deux barres collectrices en aluminium de chaque cuve.



1.1-3 Schéma d'une cuve à aluminium à anodes précuites

1.2 Traitements thermiques des aciers et des fontes

Exploitation pratique du diagramme fer-carbone métastable pour les aciers au carbone (non alliés)

C'est un diagramme d'équilibre binaire fer-carbone, sans autres éléments chimiques. Les constituants obtenus sont le résultat d'un refroidissement lent. Il ne donne aucune indication sur la nature des constituants issus d'un refroidissement rapide et violent.

Le diagramme va permettre, en fonction de la teneur en carbone :

- de déterminer la température de mise en solution du carbone dans le fer gamma (austénite) indispensable à atteindre pour effectuer un traitement thermique fondamental (trempe, recuit), ou palier de mise en solution,
- d'identifier la nature des constituants de la structure, au cours d'un refroidissement lent (recuit), et à la température ambiante,
- de modaliser les mouvements des éléments dans l'état solide au cours du refroidissement.

Les constituants de structure à l'état normalisé

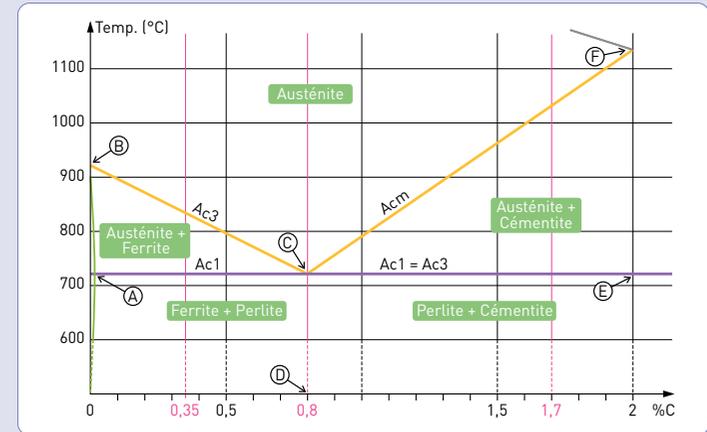
Constituants d'équilibre du diagramme fer-carbone rencontrés dans les aciers à l'état recuit et dans les fontes

- **La ferrite** : solution solide de carbone dans le fer alpha (cubique centré) (dans les fontes, elle contient d'autres éléments, comme le silicium). Elle possède un faible pouvoir de dissolution du carbone (0,006% à température ambiante). Elle est relativement tendre (HB = 80), peu résistante (Rm = 300 N/mm²), très ductile (A% = 25), très résiliente (K = 30 daj/cm²), ferromagnétique jusqu'à 768°C (point de Curie), très sensible aux basses températures.
- **L'austénite** : solution solide d'insertion d'atomes de carbone dans le fer gamma (cubique à faces centrées). Dans les fontes, elle retient des éléments gamma-gènes (C, Ni, Cu, Mn). Son domaine s'étend, pour les points extrêmes, de 723°C à 1493°C. Le fer gamma dissout très bien le carbone, sa solubilité maximale est de 2,06% à 1147°C, pour décroître à 0,85% à 723°C (point eutectoïde).

Le fer gamma (austénite) est amagnétique. Ce constituant est pour les aciers et les fontes, dans leurs traitements thermiques (trempes et certains recuits), un état de référence autorisant, soit un retour à l'état initial de la structure, soit le point de départ d'un traitement.

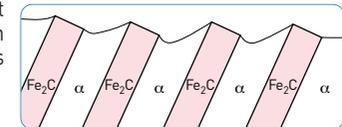
L'austénite est tendre, ductile (comme toutes les cristallisations CFC). La décomposition de l'austénite au seuil de 723°C donne de la ferrite et de la cémentite, formant un agrégat eutectoïde appelé perlite.

1.2-1 Diagramme fer-carbone



- Ac1 : lieu des températures définissant la limite inférieure du domaine d'existence de l'austénite.
- Ac2 : lieu des températures définissant la perte des propriétés magnétiques (point de Curie).
- Ac3 : lieu des températures d'équilibre définissant la limite supérieure du domaine d'existence de la ferrite.
- AcM : lieu des températures d'équilibre définissant la limite supérieure du domaine d'existence de la cémentite dans un acier hypereutectoïde.

- **La cémentite** est un carbure de fer, chimiquement défini Fe₃C à 6,67% de carbone. Ce constituant est très dur et très fragile (HB = 750). Très présent dans les fontes blanches, en agrégat dans les aciers, nuisible dans les fontes grises.
- **La perlite** (eutectoïde), agrégat de lamelles alternées de ferrite et de cémentite, provient de la décomposition de l'austénite. Ce constituant contenant 0,85% de carbone, offre une dureté usinable (HB = 200), une bonne résistance (Rm = 850 N/mm²) et un allongement correct (A% = 10). La perlite offre un excellent compromis entre les propriétés mécaniques dureté-traction-résilience.



1.2-2 Représentation schématisée du relief d'une perlite attaquée, vue en coupe (structure lamellaire)

Constituant	Rm	A	HB
Ferrite	28 daN/mm ²	50%	80
Perlite	80 daN/mm ²	10%	200
Cémentite	-	0%	700

1.2-3
Propriétés
mécaniques
des constituants
de structure
des aciers
normalisés

Constituants de la trempe

- **Martensite** : c'est une solution d'insertion sursaturée de carbone dans le fer gamma. C'est le constituant de trempe le plus dur (en fonction de la teneur en carbone HV = 800), mais il est fragile. Elle est obtenue par refroidissement rapide et de ce fait pénètre plus ou moins au cœur de la pièce. Elle est très dure, difficilement usinable et assez fragile.
- **Bainite** : c'est un agrégat de ferrite et de carbures. C'est un constituant qui présente les mêmes phases que la perlite (ferrite et cémentite, mais de structure particulièrement fine, souvent en aiguilles ce qui lui confère de bonnes propriétés mécaniques. Elle est dure et assez facile à usiner.

Traitements thermiques dans la masse des produits ferreux

Les termes suivants sont issus des normes correspondantes ou simplement des termes reconnus par la profession. Le seul but de ces définitions est de faciliter la lecture et la compréhension des différents tableaux et guides de choix de l'ouvrage.

Recuit

Il a pour but de faire disparaître les états hors équilibre provenant des traitements antérieurs, thermiques ou mécaniques.

- Chauffage en général au dessus de la température d'austénitisation (autour de 850°C selon le pourcentage de carbone et des éléments d'addition).
- Maintien isotherme.
- Refroidissement lent à vitesse très inférieure à la vitesse critique de trempe.

La structure obtenue est du type ferrite-perlite. L'état recuit correspond aux valeurs minimales de ténacité et aux valeurs maximales de ductilité. Il existe de nombreuses variantes de ce traitement, mais en pratique, un même recuit peut combiner les effets des recuits typiques suivants.

- **Recuit d'homogénéisation**, surtout effectué sur les aciers bruts composés de coulée pour supprimer l'hétérogénéité chimique. La pièce est portée à une température aussi élevée que possible sans atteindre le solidus réel. Pratiquement,

la température est de l'ordre de (Ac3 + 200°C). La durée de ce traitement est de plusieurs heures. Le métal qui a été surchauffé est suivi d'un recuit de régénération.

- **Recuit de régénération**, surtout effectué sur des pièces ayant été surchauffées dans le but d'affiner et d'uniformiser le grain. La pièce est portée à une température de (Ac3 + 50°C) pendant une durée juste nécessaire à la chauffe à cœur puis est refroidie à l'air.
- **Recuit de normalisation**. C'est une variante du recuit de régénération qui s'applique aux pièces brutes de forgeage ou de laminage. Il s'effectue dans les mêmes conditions de chauffe, la pièce étant ensuite refroidie à l'air calme.
- **Recuit complet**. Couramment appelé «recuit», il est effectué sur des pièces ayant subi des traitements thermiques ou mécaniques dont on désire supprimer les effets (constituants durs) pour en faciliter l'usinage. La pièce est portée à (Ac3 + 50°C) environ 30 minutes puis est refroidie lentement à l'air ou au four. Il existe deux variantes de ce traitement :
 - recuit d'adoucissement, effectué sur les aciers autotrepants et sur les fontes. La pièce est chauffée à une température inférieure au point de transformation Ac1 pendant 6 à 8 heures puis est refroidie à l'air libre. Cette basse température évite la réalisation d'une trempe ;
 - recuit de coalescence, effectué sur des aciers à fort pourcentage de carbone (100 C6, Z 200 C 13...), dans le but d'obtenir l'adoucissement maximal. La pièce est chauffée aussi en dessous de Ac1, mais pendant 30 heures, puis est refroidie à l'air libre.
- **Recuit de détente** effectué sur des pièces après moulage ou soudage pour éliminer les tensions internes avant l'usinage. La pièce est chauffée vers 600°C pendant environ 1 heure puis refroidie à l'air libre.
- **Recuit de recristallisation** effectué sur des pièces écrouies à une température de l'ordre de 600°C.

Durcissement par trempe

Le durcissement par trempe a pour but d'augmenter la ténacité des produits ferreux.

Pour la nuance considérée :

- chauffage à la température d'austénitisation (au-dessus de Ac3),
 - maintien à cette température,
 - refroidissement rapide à une vitesse choisie supérieure à la vitesse critique de trempe. La pénétration de la trempe dans la pièce dépendra de cette vitesse et de la masse de la pièce.
- Les pièces en acier doivent posséder un pourcentage minimum de carbone (en pratique 0,2% minimum). La structure obtenue est constituée de martensite, de bainite ou des deux à la fois. Ce traitement doit obligatoirement être suivi d'un revenu.

- **Trempabilité.** Aptitude d'un volume de métal à acquérir une certaine dureté par trempé de la surface au cœur, pour des conditions de refroidissement données : aptitude à donner lieu aux transformations martensitiques et/ou bainitiques. La trempabilité est souvent caractérisée par l'évolution de la dureté en fonction de la distance à une surface refroidie (essai Jominy).

Revenu

Il est effectué après le durcissement par trempé sur les produits ferreux pour amener les caractéristiques mécaniques à un niveau souhaité.

La pièce est chauffée à une température très inférieure à la température d'austénitisation puis refroidie. En pratique, la température de revenu est choisie entre 200 et 600°C selon les caractéristiques mécaniques désirées, l'acier considéré et l'usage de la pièce. Le résultat obtenu dépend donc de l'état structural après trempé, de la température de revenu et de la durée de ce revenu.

En résumé :

- pour obtenir de grandes duretés et de grands résistances mécaniques, le revenu sera effectué vers 200°C ;
- pour obtenir un bon compromis, donc une résistance correcte et une bonne résilience, le revenu est effectué entre 500 et 650°C dans le cas des traitements dans la masse. Il est déconseillé, pour les aciers alliés, d'effectuer des revenus dans la zone 300-500°C. Ils entraînent une baisse importante de résilience et par suite une fragilisation de la pièce (zone de fragilité de revenu).

Revenu de détente. Il est effectué à une température inférieure à 200°C sur des structures martensitiques (trempé complète), sur des pièces d'acier à haute résistance. Il diminue légèrement la résistance à la rupture mais augmente la limite élastique et améliore la ductilité.

Etats de livraison

Cas des aciers de construction.

- Etat naturel : c'est l'état du produit tel qu'il sort du laminoir. Au-dessous de 0,2% de carbone, les aciers de construction peuvent être utilisés dans cet état. Au-dessus de 0,2%, il est nécessaire de prévoir un laminage à température contrôlée ou de faire suivre le laminage d'un recuit.
- Etat normalisé : c'est l'état du recuit défini ci-dessus, les caractéristiques proposées par les fabricants sur les fiches matière sont des caractéristiques minimales garanties.
- Etat adouci : cet état correspond à une dureté minimale garantie.
- Etat prétraité : c'est l'état trempé et revenu pour les caractéristiques prévues par la norme ou sur accord à la commande.

Principaux traitements superficiels thermochimiques des produits ferreux

Les traitements thermochimiques permettent d'obtenir des caractéristiques particulières à la surface d'une pièce sans altérer les caractéristiques dans la masse. Selon leur principe, ils améliorent principalement une ou plusieurs des caractéristiques suivantes : la dureté en surface, la résistance à l'usure, la résistance à la corrosion et le comportement en frottement. Par exemple, pour un pignon, il est souhaitable d'obtenir une grande dureté en surface (pièce frottante) et une bonne résistance à cœur (résistance à des contraintes de masse).

Traitements de diffusion

Le matériau d'apport diffuse dans le substrat à haute température et réagit avec lui.

- **Aluminisation.** Ce traitement qui s'effectue en général sur les aciers a pour objet un enrichissement superficiel en aluminium. Il est surtout utilisé comme protection contre la corrosion et l'oxydation à haute température.
- **Bleuissement.** Ce traitement est effectué en milieu oxydant. La surface polie du produit ferreux se recouvre d'une couche mince d'oxydes adhérente de couleur bleue.
- **Boruration.** La couche superficielle de la pièce est enrichie en bore. Ce traitement assure une dureté très élevée de 1800 à 2000 HV, une bonne tenue à l'usure et à la corrosion. Tous les aciers, sauf rapide et inox, peuvent subir ce traitement mais les éléments d'alliage et le carbone diminuent l'épaisseur de la couche borurée. Traitement possible sur fonte.
- **Carbonitruration.** Comme pour la cémentation, apport de carbone en surface mais avec en plus introduction d'azote dans l'atmosphère du four entre 600 et 850°C ou dans un bain. Ce traitement est aussi obligatoirement suivi d'une trempé. Par rapport à la cémentation, il donne d'excellents résultats sur des aciers non alliés, non trempants. La carbonitruration gazeuse est la plus employée. Ce traitement permet d'atteindre une dureté en surface de 700 à 900 HV.
- **Cémentation.** Ce traitement s'effectue en général sur des aciers à faible pourcentage en carbone (C < 0,25% peu ou faiblement trempant), possédant une bonne ductilité dans la masse, en vue d'augmenter la dureté superficielle. Il consiste :
 - à apporter du carbone en surface par chauffage au four à température d'austénitisation (vers 900°C) en présence de ciment solide, liquide ou gazeux. Ce dernier procédé est le plus utilisé (précis et rapide) ;

- à effectuer un cycle de trempe suivi d'un revenu à basse température. Il y a possibilité de ne pas traiter toute la pièce (usinage des surfaces cémentées avant la trempe ou protection par cuivrage de surfaces avant la cémentation). La pièce conserve donc ses caractéristiques à cœur et présente une couche supérieure très dure (jusqu'à 2 mm) obtenue par le durcissement par trempe (700 à 800 HV). La déformation impose une rectification après traitements.
- **Chromisation.** La surface de la pièce est enrichie en chrome :
 - chromisation douce sur des aciers à faible pourcentage de carbone. Elle permet d'installer une couche riche en chrome qui résiste bien à la corrosion ;
 - chromisation dure sur des aciers à fort pourcentage de carbone : elle offre des surfaces de dureté très élevée (1600 à 1800 HV) qui résistent bien au frottement et à la corrosion sèche mais qui sont très fragiles.
- **Nituration.** Ce traitement s'effectue cette fois sur un métal déjà trempé et revenu, donc sur des pièces qui possèdent des caractéristiques mécaniques élevées dans la masse. Il peut se pratiquer sur des pièces finies. Il permet d'atteindre des duretés en surface très élevées (600 à 1500 HV) suivant le type de traitement. Il est particulièrement adapté aux pièces sollicitées aux chocs et à l'usure par frottement. Il augmente la limite d'endurance. Industriellement, il existe deux types de nituration :
 - nituration traditionnelle (en atmosphère gazeuse). Elle se pratique sur des aciers alliés contenant du chrome et de l'aluminium (exemple : 40 CAD 6.12, voir 6.10.1). La surface est enrichie en azote par chauffage vers 500°C en présence de gaz d'ammoniac. Le durcissement est obtenu grâce à la formation de nitrures de chrome et d'aluminium. La zone nitrurée est très mince (0,5 mm après 50 heures). (Peut être réalisé en bains de sels) ;
 - nituration ionique. Elle s'effectue à l'intérieur d'une enceinte à atmosphère raréfiée, en présence d'hydrogène et d'azote à l'état de plasma. Cet état est obtenu en établissant une différence de potentiel (jusqu'à 1500 V) entre la pièce (cathode) et l'enceinte du four (anode). Cette configuration permet d'atteindre des températures entre 400 et 600°C. Ce procédé présente l'avantage d'être non polluant et permet de traiter des nuances d'acier très diverses, des aciers XC aux aciers fortement alliés (6.10.1). Les fontes modérément alliées (Cr et Al) peuvent être nitrurées (FGS et MN conviennent).

- **Sulfonituration.** Ce traitement augmente la résistance à l'usure en améliorant considérablement le frottement par autolubrification. La profondeur traitée est de 0,2 à 0,5 mm. La surface de la pièce est enrichie en soufre par chauffage vers 570°C dans un bain de sels pour le Sulfinuz, entre 560 et 570°C dans un bain contenant soufre et azote pour le Sursulf (procédé HEF). Tous les métaux ferreux peuvent être sulfonitrurés.
Un autre traitement (conservation), le Sulf BT (sulfuration) à basse température s'effectue par électrolyse en bain de sels à 190°C sur des aciers et sur des fontes. La pénétration est moins grande que pour la sulfonituration, mais la température plus basse n'occasionne pas de revenu parasite. Aucune reprise d'usinage ne doit être faite après le traitement. Ce traitement ne peut pas s'appliquer sur des aciers contenant plus de 12% de chrome. Les aciers cémentés trempés, les aciers et les fontes trempés peuvent recevoir ce traitement.
- **Trempe superficielle.** Ce traitement (de transformation structurale) est réservé aux aciers non alliés pour traitements thermiques ou pour certains aciers faiblement alliés, en vue d'un durcissement superficiel. En général, la pièce a été préalablement traitée dans la masse (trempe et revenu) pour une bonne résilience à cœur. Elle est ensuite réchauffée en surface en vue d'une nouvelle trempe plus dure.

Choix du traitement superficiel de diffusion réservé aux produits ferreux

1.2-4

Traitement	Épaisseur traitée	Dureté de la couche	Avantages	Inconvénients
Cémentation en bain de sels ou gazeuse	Jusqu'à 3 mm	700 HV jusqu'à 200°C	<ul style="list-style-type: none"> - Procédé simple. - Utilisation souple. - Prix de revient faible. - Adapté aux aciers à bas pourcentage de carbone. - En cémentation gazeuse les déformations sont plus faibles : c'est la plus utilisée en série. 	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessité d'un cycle de trempe et revenu après traitement. - Déformation des surfaces traitées qui impose une rectification finale. - En cémentation liquide, les bains sont toxiques et dangereux.
Nitruration gazeuse	0,2 à 0,6 mm	600 à 1200 HV jusqu'à 400°C	<ul style="list-style-type: none"> - Faible déformation ne nécessitant pas de reprise. - Dureté élevée. - Mise en œuvre facile. - Prix de revient faible. - S'effectue sur un métal déjà traité. 	<ul style="list-style-type: none"> - Faible profondeur durcie. - Couche fragile. - Contraintes de contact admissibles en fatigue limitées. - Utilisation d'aciers spéciaux. - Reprise mécanique difficile. - Temps de traitement long.
Nitruration ionique	Jusqu'à 0,5 mm	800 à 1500 HV	<ul style="list-style-type: none"> - Dureté élevée, pas de déformation. - Etat de surface conservé. - Cycle plus simple qu'en nitruration gazeuse (plus rapide). - Gamme de métaux ferreux plus large qu'en nitruration gazeuse. 	<ul style="list-style-type: none"> - Difficulté de traitement des alésages. - Résistance à la corrosion moyenne. - Investissement important.
Carbonitruration	De 0,1 à 0,9 mm	700 à 900 HV	<ul style="list-style-type: none"> - Traitement favorable aux contraintes de fatigue en flexion, en torsion, et aux contraintes de fatigue superficielles (roulement). - Carbonitruration liquide : mise en œuvre simple. - Carbonitruration gazeuse : procédé souple, intégration possible en production. 	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessité comme en cémentation de faire suivre d'un cycle de trempe et revenu. - Carbonitruration liquide : lavage des pièces après traitement et manutention importante. - Carbonitruration gazeuse : coût élevé
Boruration	0,02 à 0,4 mm	1600 à 2000 HV	<ul style="list-style-type: none"> - Dureté très élevée, bonne tenue à l'usure. - Gamme de métaux ferreux large : aciers, fontes frittées. - Intégration possible en production. 	<ul style="list-style-type: none"> - Couche très fragile. - Recuit de régénération ultérieur. - Aucune reprise possible après traitement. - Gonflement du quart de l'épaisseur. - Besoin d'un état de surface initial. - Prix de revient élevé.
Sulfonitruration en bains de sel Suraulf	0,5 mm	1,7 à 3 fois la dureté initiale	<ul style="list-style-type: none"> - Bonne résistance à l'usure et au grippage. - Bonne amélioration de la résistance à la fatigue [augmentation des contraintes de compression]. - Temps de traitement rapide. - Prix de revient bas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Pas de reprise d'usage après traitement (éventuellement un rodage). - Gonflement de la pièce, impose une sous-cotation. - Faible résistance à la corrosion.
Chromisation dure	0.02 mm	1600 à 1800 HV	<ul style="list-style-type: none"> - Dureté très élevée, très bonne résistance à l'usure (frottement et abrasion). - Bonne résistance aux chocs thermiques. - Traitement possible après chromisation. - Agrément alimentaire. 	<ul style="list-style-type: none"> - Prévoir une surépaisseur de dépôt : aucune retouche possible après chromisation. - Déformation possible en cours de traitement. - Prix de revient élevé. - Déconseillé comme durcissement des portées de joints dynamiques.

Choix du traitement superficiel par transformation structurale réservé aux produits ferreux (trempe superficielle)

La dureté minimale de la couche traitée dépend du pourcentage de carbone (0,12% à 0,55%), la dureté varie entre 420 et 720 HV. La limite de fatigue peut être améliorée de 10 à 80% par ce traitement.

1.2-5

Trempe superficielle	Épaisseur traitée	Risque de déformation	Avantages	Inconvénients
Induction	> 0,3 mm	Faible	<ul style="list-style-type: none"> - Faible déformation après traitement. - Automatisation possible. - Bien adapté aux grandes séries. - Mise en œuvre rapide. - Cadence élevée. - Utilisation d'acier peu coûteux. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mise au point du traitement parfois délicate. - Limitée à des épaisseurs faibles. - Procédé limité par la forme de la pièce.
Chalumeau	> 1 mm	Moyenne	<ul style="list-style-type: none"> - Déformations relativement faibles. - Automatisation possible. - Mise en œuvre rapide. - Possibilité de traiter des pièces de grandes dimensions (coût acceptable) et des pièces de formes complexes. - Bien adapté aux séries petites et moyennes. - Utilisation d'aciers peu coûteux. 	<ul style="list-style-type: none"> - Matériel souvent mal utilisé. - Procédé limité par la forme de la pièce.

Nouveaux procédés en cours d'industrialisation

Traitement	Épaisseur traitée	Dureté de la couche	Avantages	Inconvénients
Impulsions	> 0,01 mm	Faible	<ul style="list-style-type: none"> - Déformation extrêmement faible (faibles profondeurs de traitement). - Automatisation possible. 	Difficilement utilisable pour des épaisseurs supérieures à 0,5 mm.
Plasma	> 0,01 mm	Faible	<ul style="list-style-type: none"> - Déformation extrêmement faible (faible profondeur du traitement). - Bien adapté au traitement en continu (lames et fils). - Automatisation possible. 	<ul style="list-style-type: none"> - Savoir-faire en cours de développement. - Peu adapté aux grosses pièces.
Laser	> 0,01 mm	Faible	<ul style="list-style-type: none"> - Précision du traitement. - Grande gamme de profondeurs possibles. - Possibilité de traiter des endroits difficilement accessibles aux autres procédés. - Déformation faible pour les faibles épaisseurs. - Automatisation possible. 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût extrêmement élevé. - Noircissement des surfaces à réaliser parfois avant traitement. - Maintenance délicate.
BE Bombardement électronique	> 0,01 mm	Très faible	<ul style="list-style-type: none"> - Précision du contour du traitement. - Faibles déformations. - Absence d'oxydation sur les pièces. - Automatisation possible. 	- Utilisation du vide.

Traitements réservés aux aluminiums et alliages d'aluminium

Traitement de durcissement structural

- Mise en solution

Le traitement de mise en solution solide consiste, par un maintien à la température élevée, à dissoudre les éléments d'alliage qui se trouvent en phases séparées dans le métal de base. Si la solution solide ainsi obtenue est refroidie brutalement, on obtient un état trempé.

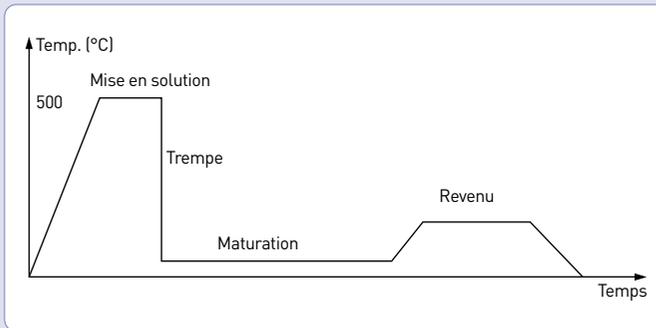
- Maturation

La maturation, ou vieillissement naturel, consiste, après la trempe, à durcir les alliages à traitements thermiques par un séjour à température ordinaire.

- Revenu

Dans le cas des aluminiums et alliages d'aluminium, le revenu consiste, par un maintien à environ 200°C, à accélérer l'évolution des caractéristiques mécaniques, en particulier à augmenter la limite élastique. C'est un revenu de durcissement.

Les traitements de trempe et revenu nécessitent une grande précision (dispersion inférieure ou égale à 5°C).



1.2-6 Séquence typique de durcissement structural d'un aluminium

Données complémentaires
pour une meilleure approche
du chapitre

APPROCHE TECHNICO-ECONOMIQUE

Ch. 3 - **Notions élémentaires
de mécanique**

Ch. 8 - **Vocabulaire du métier
de la fixation**

BIBLIOTHEQUE & OUTILS

Ch. 9 - **Eléments chimiques et
leurs principales caractéristiques**

Ch. 32 - **Tables de conversion
des duretés**

Ch. 33 - **Classification des aciers
inoxydables couramment
utilisés en boulonnerie-visserie**

ENVIRONNEMENT & LEGISLATION

Ch. 12 - **Usages de la profession
et préconisations générales**

2

Matériaux

2.0 Désignation des aciers

Plusieurs normes régissent la classification et la désignation des aciers couramment utilisés pour la production de fixation.

NF EN 10020 : Définition et classification des nuances d'aciers (à partir de leur composition chimique)

NF EN 10027-1 : Système de désignation des aciers : désignation symbolique (à partir de leur emploi et de leurs caractéristiques)

NF EN 10027-2 : Système de désignation des aciers : désignation numérique (à partir de leur emploi et de leurs caractéristiques)

NF EN 10079 : Définition des produits en acier

ISO 15510 : Classification et désignation des aciers inoxydables

Par ailleurs, sont aussi utilisées des dénominations d'origine américaine (codification **AISI** ou **UNS/ASTM**) ou japonaise (codification **JIS**).

Pour certaines applications particulières, il est recommandé de se reporter aux normes spécifiques existantes, par exemple la norme **NF EN 10095** pour les aciers et alliages de nickel réfractaires ou la norme **NF EN 10269** pour les aciers et alliages de nickel pour éléments de fixation utilisés à température élevée et/ou à basse température.

2.0-1

Type d'aciers	Symboles	Symboles de caractéristiques	Symboles additionnels	Exemples
Aciers à béton	B	Valeur spécifiée de la limite d'élasticité en MPa	Lettre indiquant la classe de ductilité, suivie si besoin de 1 ou 2 chiffres	B500A : Acier pour béton armé de limite d'élasticité spécifiée égale à 500 MPa et de classe de ductilité A
Produits plats pour formage à froid	D	Lettre C (laminé à froid), D (laminé à chaud pour formage direct à froid) ou X (conditions de laminage non spécifiées) suivies de 2 chiffres correspondant à une aptitude croissante au formage à froid	Oui : Voir NF EN 10027-1	DX53D+Z275 : Acier à bas carbone d'un produit plat pour emboutissage profond, avec revêtement de zinc de masse nominale de 275 g/m ² sur les deux faces
Acier de construction mécanique	E	Valeur spécifiée d'une limite d'élasticité de référence pour une épaisseur donnée, en MPa	Lettre G (autres caractéristiques), suivie de 1 ou 2 chiffres ou lettre C (destiné à l'étrépage)	E335G C : Acier de construction mécanique de limite d'élasticité spécifiée égale à 335 MPa pour les épaisseurs nominales ≤ 16 mm avec aptitude complémentaire à l'étrépage à froid

La norme NF EN 10020

La norme **NF EN 10020** définit le terme « acier » et établit :

- La classification en aciers non alliés, aciers inoxydables et autre aciers alliés suivant la composition chimique.

- La classification des aciers non alliés, aciers inoxydables et autres aciers alliés en fonction des principales classes de qualité définies selon les principales caractéristiques de propriétés ou d'application.

Le terme « acier » est défini comme « matériau contenant en masse plus de fer que de tout autre élément et dont la teneur en carbone est généralement inférieure à 2% et qui contient d'autres éléments. Un nombre limité d'aciers au chrome peut avoir une teneur en carbone supérieure à 2% mais cette valeur de 2% est la teneur limite qui sépare l'acier de la fonte ».

Désignation symbolique selon NF EN 10027-1

La désignation est composée d'une lettre symbole du type d'acier suivie de lettre(s) et d'une valeur numérique représentatives de la caractéristique essentielle (par exemple indiquant les propriétés mécaniques Re en Mpa) et éventuellement de symboles additionnels. Dans le cas d'aciers moulés, la désignation est précédée de la lettre G (exemple : GS235).

En général, les différents caractères de la désignation sont écrits sans espaces entre eux.

Type d'aciers	Symboles	Symboles de caractéristiques	Symboles additionnels	Exemples
Produits plats laminés à froid en acier à haute résistance pour emboutissage à froid	H	Une lettre C, D ou X suivie de la valeur minimale d'élasticité en MPa ou deux lettres CT, DT ou XT suivie de la valeur minimale spécifiée de la résistance à la traction en MPa. Lettre C (laminé à froid), D (laminé à chaud pour formage direct à froid) ou X (conditions de laminage non spécifiées)	Oui : Voir NF EN 10027-1	HCT980X+ZA200 : produit plat laminé à froid pour formage à froid de valeur minimale spécifiée de résistance à la traction égale à 980 MPa, avec revêtement de zinc-aluminium de masse nominale 200g/m ² sur les deux faces
Aciers pour tubes de conduite	L	Valeur spécifiée d'une limite d'élasticité de référence en MPa	Oui : Voir NF EN 10027-1	L245GA : Acier pour tubes de conduite de valeur spécifiée de la limite d'élasticité pour le corps du tube égale à 245 MPa et de classe de prescription A
Aciers magnétiques pour applications électriques	M	Centuple des pertes totales en W/kg suivi d'un tiret, du centuple de l'épaisseur nominale en mm et du type de produit (voir NF EN 10027-1)	Non	M400-50A : Acier pour applications électriques à grains non orientés sous forme de bandes et tôles laminées à froid et livrées à l'état fini, de pertes totales spécifiques maximales égales à 4 W/kg à 50 Hz et 1,5 T, d'épaisseur nominale 0,50 mm
Aciers pour appareils soumis à la pression : bouteilles de gaz, chaudières...	P	Valeur spécifiée d'une limite d'élasticité de référence en MPa	Oui : Voir NF EN 10027-1	P355NL1 : Acier pour appareil à pression de limite d'élasticité de référence égale à 355 MPa, pour les épaisseurs nominales ≤ 16 mm, livré à l'état normalisé, et d'énergie minimale de rupture en flexion par choc dans la direction transversale, pour une température d'essai de -40°C, égale à 27 joules
Aciers pour ou sous forme de rails	R	Dureté Brinell minimale spécifiée (HBW)	Oui : Voir NF EN 10027-1	R320Cr : Acier pour rail de fourchette de dureté Brinell 320 à 360, à 1% de Cr, non traité thermiquement

2.0-1 (suite)

Type d'aciers	Symboles	Symboles de caractéristiques	Symboles additionnels	Exemples
Aciers de construction y compris les aciers à grains fins	S	Valeur spécifiée d'une limite d'élasticité de référence en MPa	Oui : Voir NF EN 10027-1	S235J0 : Acier de construction de limite d'élasticité de référence spécifiée égale à 235 MPa, pour les épaisseurs nominales < 16 mm, et d'énergie minimale de rupture en flexion par choc pour une température d'essai de 0°C, égale à 27 joules
Aciers pour emballage (fer noir, fer blanc, fer chromé)	T	Lettre H (pour les produits recuit continu) ou S (pour les produits recuit base) suivie de la valeur nominale d'élasticité en MPa	Non	STH580 : Acier pour emballage, de limite d'élasticité nominale de 580 MPa
Aciers pour béton précontraint	Y	Valeur spécifiée de la résistance à la traction en MPa	Oui : lettre liée au type de produit et à son process de fabrication	Y1960C : acier de précontrainte de résistance à la traction spécifiée de 1960 MPa, livré sous forme de fil tréfilé

Exemple de désignation symbolique complète : **S355MC** désigne un acier de construction avec une limite d'élasticité de référence à 355 MPa, obtenu par laminage thermomécanique (M) écroui à froid (C).

Désignation numérique selon NF EN 10027-2

La désignation est composée d'un nombre fixe de chiffres afin de faciliter le traitement de données par rapport au système de désignation symbolique. Cette norme est prévue pour les nuances d'aciers définies dans les normes européennes et est aussi utilisable pour les nuances d'aciers nationales et les aciers de marque.

Structure des numéros :

- 1. Pour Acier
- XX Groupe d'acier (selon tableau 2.0-2)
- XX Numéro d'ordre alloué par le Bureau Européen d'Enregistrement
- Dans le projet en cours de révision de la norme, le numéro d'ordre devient à 4 positions, les deux positions complémentaires ne pouvant être allouées que si les 2 premières positions sont entièrement allouées.

Groupe d'acier ^{a,b}

2.0-2

Aciers non alliés					Aciers alliés								
Aciers de base		Aciers de qualité			Aciers de qualité			Aciers spéciaux					
				Aciers spéciaux			Aciers à outils	Aciers divers	Aciers inoxydables et réfractaires	Aciers de construction, aciers pour appareils à pression			
00 Aciers de base	90 Aciers de base			10 Aciers à propriétés physiques particulières			20 Cr	30	40 Aciers inoxydables avec Ni < 2,5 % sans Mo, Nb et Ti	50 Mn, Si, Cu	60 Cr-Ni avec ≥ 2,0 % Cr < 3 % Cr	70 Cr Cr-B	80 Cr-Si-Mo Cr-Si-Mn-Mo Cr-Si-Mo-V Cr-Si-Mn-Mo-V

Groupe d'acier ^{a, b}

2.0-2 (suite)

Aciers non alliés			Aciers alliés										
Aciers de base		Aciers de qualité		Aciers spéciaux	Aciers de qualité		Aciers spéciaux						
							Aciers à outils	Aciers divers	Aciers inoxydables et réfractaires		Aciers de construction, aciers pour appareils à pression		
		01	91	11			21	31	41	51	61	71	81
		Aciers de construction d'usage général avec $R_m < 500$ MPa		Aciers de construction et aciers pour appareils à pression avec $C < 0,50$ %			Cr-Si Cr-Mn Cr-Mn-Si		Aciers inoxydables avec Ni $< 2,5$ % et Mo, mais sans Nb et Ti	Mn-Si Mn-Cr		Cr-Si Cr-Mn Cr-Mn-B Cr-Si-Mn	Cr-Si-V Cr-Mn-V Cr-Si-Mn-V
		02	92	12			22	32	42	52	62	72	82
		Autres aciers de construction d'usage spécial non destinés au traitement thermique, avec $R_m < 500$ MPa		Aciers de construction et aciers pour appareils à pression avec $C \geq 0,50$ %			Cr-V Cr-V-Si Cr-V-Mn Cr-V-Mn-Si	Aciers rapides avec Co		Mn-Cu Mn-V Si-V Mn-Si-V	Ni-Si Ni-Mn Ni-Cu	Cr-Mo avec $< 0,35$ % Mo Cr-Mo-B	Cr-Mo-W Cr-Mo-W-V
		03	93	13			23	33	43	53	63	73	83
		Aciers avec une teneur moyenne en C $< 0,12$ % ou $R_m < 400$ MPa		Aciers de construction, pour appareil à pression et de construction mécanique avec $C \geq 0,50$ %			Cr-Mo Cr-Mo-V Mo-V	Aciers rapides sans Co	Aciers inoxydables avec Ni $\geq 2,5$ % mais sans Mo, Nb et Ti	Mn-Ti Si-Ti	Ni-Mo Ni-Mo-Mn Ni-Mo-Cu Ni-Mo-V Ni-Mn-V	Cr-Mo avec Mo $\geq 0,35$ %	
		04	94	14			24	34	44	54	64	74	84
		Aciers avec une teneur moyenne en C $\geq 0,1$ % et $< 0,25$ % ou $R_m \geq 400$ MPa et < 500 MPa					W Cr-W	Acier résistant à l'abrasion	Aciers inoxydables avec Ni $\geq 2,5$ % et Mo, mais sans Nb et Ti	Mo Nb, Ti, V W			Cr-Si-Ti Cr-Mn-Ti Cr-Si-Mn-Ti
		05	95	15			25	35	45	55	65	75	85
		Aciers avec une teneur moyenne en C $\geq 0,25$ % et $< 0,55$ % ou $R_m \geq 500$ MPa et < 700 MPa		Aciers à outils			W-V Cr-W-V	Aciers pour roulement	Aciers inoxydables avec additions particulières	B Mn-B $< 1,65$ % Mn	Cr-Ni-Mo avec Mo $< 0,4$ % + Ni < 2 %	Cr-V avec $< 2,0$ % Cr	Aciers de nitruration

Groupe d'acier ^{a,b}

2.0-2 (suite)

Aciers non alliés				Aciers alliés									
Aciers de base		Aciers de qualité		Aciers de qualité		Aciers spéciaux							
						Aciers à outils	Aciers divers	Aciers inoxydables et réfractaires	Aciers de construction, aciers pour appareils à pression				
		06 Aciers avec une teneur moyenne en C ≥ 0,55 % ou Rm ≥ 700 MPa	96	16 Aciers à outils			26 W, à l'exclusion des groupes 24, 25 et 27	36 Matériaux aux propriétés magnétiques particulières sans Co	46 Alliages de Nickel pour usage à haute température et résistant aux produits chimiques	56 Ni	66 Cr-Ni-Mo avec Mo < 0,4 % + Ni ≥ 2 % Ni < 3,5 %	76 Cr-V avec Cr < 2,0 %	86 Aciers non destinés à un traitement thermique par l'utilisateur Aciers à haute résistance soudables
		07 Aciers à teneur plus élevés en P ou en S	97	17 Aciers à outils			27 avec Ni	37 Matériaux aux propriétés magnétiques particulières avec Co	47 Aciers réfractaires avec Ni < 2,5 %	57 Cr-Ni avec < 1,0 % Cr	67 Cr-Ni-Mo avec Mo < 0,4 % + Ni ≥ 3,5 % Ni < 5 % ou Mo ≥ 0,4 %	77 Cr-Mo-V	87 Aciers non destinés à un traitement thermique par l'utilisateur Aciers à haute résistance soudables
				18 Aciers à outils	08 Aciers à propriétés physiques particulières	98	28 Autres	38 Matériaux aux propriétés magnétiques particulières, sans Ni	48 Aciers réfractaires avec ≥ 2,5 % Ni	58 Cr-Ni avec ≥ 1,0 % Cr < 1,5 % Cr	68 Cr-Ni-V Cr-Ni-W Cr-Ni-V-W	78	88 Aciers non destinés à un traitement thermique par l'utilisateur Aciers à haute résistance soudables
				19	09 Aciers pour autres domaines d'application	99	29	39 Matériaux aux propriétés magnétiques particulières, avec Ni	49 Matériaux avec propriétés à température élevées	59 Cr-Ni avec Cr ≥ 1,5 % Cr < 2,0 %	69 Cr-Ni, Cr-Ni, à l'exception des classes 57 à 68	79 Cr-Mn-Mo Cr-Mn-Mo-V Cr-Mn-Mo-Ni	89 Aciers non destinés à un traitement thermique par l'utilisateur Aciers à haute résistance soudables

a La classification des groupes d'acier est conforme à la classification des aciers selon EN 10020. **b** Les informations suivantes sont données dans les cases du Tableau : le numéro du groupe d'acier (en haut à gauche) ; la caractéristique principale du groupe d'acier ; Rm = résistance à la traction. Les valeurs limites pour la composition chimique et la résistance à la traction sont données uniquement à titre indicatif.

Désignation symbolique par la composition chimique selon NF EN 10027-2

Le système de désignation dépend de l'appartenance de l'acier à l'un des 4 groupes prévus.

Aciers non alliés

A l'exclusion des aciers de décolletage, avec une teneur moyenne en masse de manganèse inférieure à 1% :

La désignation commence par un C (pour Carbone) suivie par le centuple de la teneur moyenne spécifiée en carbone, exprimée en pour cent. Elle peut être suivie d'un symbole additionnel constitué d'une lettre.

Exemple : C35E désigne un acier de teneur moyenne en carbone égale à 0,35% avec une teneur maximale en soufre spécifiée de 0,045% (pour la lettre E).

Aciers faiblement alliés

Aciers non alliés avec une teneur moyenne en masse de manganèse $\geq 1\%$, aciers non alliés de décolletage et aciers alliés (à l'exclusion des aciers rapides) dont la teneur moyenne de chaque élément d'alliage est inférieure à 5% en masse :

La désignation se compose dans l'ordre du centuple de la teneur moyenne spécifiée en carbone exprimée en pour cent, suivie des symboles chimiques d'alliage des éléments qui caractérisent l'acier dans l'ordre décroissant de leur teneur, suivis de nombres séparés par des traits d'union représentant respectivement la teneur moyenne de ces éléments en pourcentage, multipliée par un facteur dépendant de l'élément d'alliage. Ce facteur est de 4 pour Cr, Co, Mn, Ni, Si, W, de 10 pour Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr, de 100 pour Ce, N, P, S et de 1000 pour B.

Exemple : 36NiCrMo16 désigne un acier de teneur moyenne en carbone de 0,36%, de teneur moyenne en nickel égale à 4% et contenant du chrome et du molybdène.

Aciers fortement alliés

Aciers inoxydables et autres aciers alliés (à l'exclusion des aciers rapides) dont la teneur moyenne en masse d'au moins un élément d'alliage est $\geq 5\%$

La désignation commence par la lettre X, suivie par le centuple de la teneur moyenne spécifiée en carbone exprimée en pour cent, puis des symboles chimiques des éléments d'alliage dans l'ordre décroissant de leur teneur et de nombres séparés par des traits d'union représentant la teneur moyenne de ces éléments en pourcentage, arrondie à l'entier le plus proche et classés dans le même ordre que les symboles chimiques.

Exemple : X2CrNiMo17-12-2 désigne un acier inoxydable de teneur moyenne spécifiée en carbone de 0,02%, contenant environ 17% de chrome, 12% de nickel et 2% de molybdène.

Aciers rapides

La désignation commence par les lettres HS (pour « high speed ») suivie par des nombres entiers séparés par des traits d'union, représentant les teneurs en masse exprimées en pourcentage des éléments tungstène, molybdène, vanadium et cobalt.

Exemple : HS2-0-1-8 désigne un acier rapide contenant environ 2% de tungstène, 0% de molybdène, 1% de vanadium et 8% de cobalt.

Désignation numérique selon ISO 15510 (aciers inoxydables)

La désignation est composée de 4 parties, avec une structure **XXXX-YYY-ZZ-T**. **XXXX** est un rappel de la codification européenne selon NF EN 10027-2, en excluant les caractères « 1. ».

YYY est un renvoi aux codes **AISI**.

ZZ est un code **ISO**.

T est une codification d'origine de la normalisation de la composition : **C** pour la Chine, **E** pour l'Europe, **I** pour l'ISO, **J** pour le Japon, **U** pour les USA et **X** pour une origine partagée par plus de deux normes.

Exemple de désignation comparée selon différentes normes, pour une composition similaire

1.4306	selon NFE EN 10027-2 (désignation numérique)
Z3CN 18 10	selon norme française annulée NFA 35 573
X2CrNi19-11	selon NFE EN 10088-3
4306-304-03-I	selon norme ISO 15510
304 L	selon appellation AISI (USA)
S30403	selon appellation UNS / ASTM (USA) ou GB
SUS304L	selon appellation JIS (Japon)

2.1 Aciers réfractaires

La norme européenne NF EN 10095 donne la définition suivante des nuances d'aciers et alliages réfractaires : *«Matériaux qui sont utilisés à plus de 550°C (point Wüstite) compte tenu de leur excellente résistance aux effets des gaz chauds et des produits de combustion, ainsi qu'à l'influence des sels et des métaux fondus, mais qui possèdent également de bonnes caractéristiques mécaniques lorsqu'ils sont soumis à une contrainte de courte et longue durée».*

Lorsque les aciers sont maintenus sous charge pendant des temps assez longs, on constate une déformation progressive du métal. Ce phénomène de viscosité, appelé **fluage**, est nul ou négligeable à température ambiante ou aux températures peu élevées, inférieures à 300°C. Par contre son importance croît lorsque la température augmente. Pour un acier donné et à une température donnée, la vitesse de déformation, dite **vitesse de fluage**, d'abord grande, diminue assez vite puis reste constante pendant un temps variable. Ensuite elle croît jusqu'à la rupture du métal.

Les aciers réfractaires sont classés suivant le domaine de température dans lequel ils peuvent être utilisés.

Jusqu'à 400°C, les aciers au carbone non allés peuvent convenir, mais il faut tenir compte dans les calculs de la réduction de la limite élastique. Elle peut par exemple, pour un même acier, passer de 350 MPa à température ambiante à 180 MPa à 400°C, soit près de 50% de réduction. Les phénomènes de fluage sont peu sensibles. A partir de 400°C, ils deviennent importants et il convient de travailler avec des aciers alliés.

Jusqu'à 500°C, voir 550°C, on utilise des aciers relativement peu alliés. Ils sont notamment utilisés pour les appareils de pression fonctionnant à chaud, les chaudières ou les tubes et tuyauteries. D'autres aciers, contenant chrome, molybdène et vanadium (respectivement 1%, 1%, 0,2% ou 1,25%, 0,5% et 0,2%) sont utilisés dans les mêmes applications, mais aussi pour les grosses pièces de forge ou pour la boulonnerie à chaud. Pour ces aciers, la limite d'emploi est de 550°C. Par contre à ce niveau de température, l'oxydation par l'air, la vapeur ou les gaz de combustion devient incompatible avec des emplois de longue durée. On doit alors employer des aciers à plus forte teneur en chrome.

De 440°C à 600°C, on utilise des aciers à 5% ou 12% de chrome. L'acier à 5% de chrome, avec en général des additions de molybdène et de vanadium, est utilisé dans l'industrie pétrolière car résistant très bien à l'hydrogène et aux hydrocarbures sous pression. A 55°C, la charge de rupture au bout de 100000 heures varie de 60 à 100 MPa selon la composition et le traitement thermique. Les aciers à 12% de chrome, avec des additions de tungstène, molybdène,

vanadium, niobium résistent à l'oxydation jusqu'à 650°C et sont couramment utilisés dans le domaine 500-600°C. Leurs caractéristiques (vitesse de fluage et charge de rupture) sont nettement plus élevées que celles des aciers précédents. La charge de rupture au bout de 100000 heures est de 150 à 200 MPa à 550°C et de l'ordre de 100 MPa à 600°C. Cette amélioration de performances a une influence significative sur le rendement des machines concernées.

Au-delà de 600°C et jusqu'à 700°C, on utilise des aciers austénitiques de type 18-10 avec des additions de molybdène, titane, niobium pour améliorer les caractéristiques de fluage. Il est alors nécessaire de passer la teneur en nickel jusqu'à 12 et 15% pour que l'acier conserve sa structure purement austénitique, sans ferrite qui induirait des risques de fragilisation par maintien prolongé au-delà de 650°C. Les caractéristiques de fluage varient beaucoup d'une fabrication à l'autre, étant très sensibles à l'action de très petites quantités d'oligo-éléments et donc au mode d'élaboration.

Au-delà de 700°C, les aciers austénitiques ne sont plus suffisants pour conserver une charge de rupture acceptable dans la plupart des applications. Il faut utiliser des «superalliages» dont le domaine d'utilisation monte à 900°C. Ces alliages doivent leur rigidité à chaud à la précipitation de carbures ou de composés intermétalliques dans une matrice constituée d'une austénite fer-chrome-nickel et éventuellement de cobalt. Dans certains de ces alliages, la base est le nickel ou le cobalt. Les éléments provoquant les précipitations durcissantes sont très souvent le molybdène, le titane, le niobium ou l'aluminium. Ces superalliages sont très nombreux et de nouvelles formulations apparaissent régulièrement. Leurs caractéristiques dépendent souvent du mode d'élaboration. En particulier la fusion sous vide a permis une nette amélioration des performances.

Au-delà de 950°C, il convient d'utiliser d'autres types de solutions, tels que les céramiques ou les métaux à haut point de fusion, comme le molybdène.

Désignation

La norme européenne NF EN 10095 a défini :

- 6 nuances d'aciers réfractaires ferritiques,
- 14 nuances d'aciers réfractaires austénitiques,
- 1 nuance d'acier réfractaire austénoferritique,
- 5 nuances d'alliages de nickel austénitiques.

La norme précise par ailleurs que 14 nuances d'aciers retenues dans les normes NF EN 10088-1 et NF EN 10028-7 peuvent être utilisées comme aciers réfractaires.

La désignation numérique est obligatoire pour les nuances d'aciers définies dans les normes européennes, et facultative pour les nuances d'aciers nationales ou les aciers de marque.

Les numéros d'aciers établis conformément à ce système ont un nombre fixe de digits. Ils sont en conséquence mieux adaptés pour le traitement des données que les noms des aciers établis selon la partie 1 de la norme NF EN 10027.

Chaque numéro d'acier ne doit se référer qu'à une seule nuance d'acier. Un numéro alloué à une nuance d'acier ne doit pas, en principe, être alloué à une autre nuance d'acier, même si la nuance d'origine a été supprimée

Les numéros d'aciers sont alloués par le Bureau Européen d'Enregistrement.

Exemple : **X12CrNi23-13** ou **1.4833**

- **Selon la norme NF EN 10027-2**

X12CrNi23-13.

Acier avec teneur en C $\leq 0,15\%$.

Éléments d'alliage : chrome et nickel.

Teneurs moyennes 23% de chrome et 13% de nickel.

- **Selon la norme NF EN 10095**

1.4833.

1 : acier

48 : numéro du groupe d'acier (défini dans un tableau en fonction du type d'acier allié ou non, de sa qualité, de sa résistance ou de son analyse).

33 : numéro d'ordre.

Résistance à l'oxydation à haute température dans l'air

L'oxydation dans l'air constitue le mode le plus classique de corrosion à chaud. La résistance à l'oxydation des aciers et alliages réfractaires résulte de la formation d'une couche d'oxyde adhérente et peu perméable.

Pour que la couche d'oxyde soit protectrice, il est indispensable que l'oxygène ne puisse être en contact avec le métal de base. Cette condition est vérifiée pour un certain nombre de métaux que l'on trouve dans les aciers et alliages réfractaires et qui sont essentiellement :

- le chrome, qui crée un oxyde unique Cr_2O_3
- l'aluminium avec Al_2O_3
- le silicium avec SiO_2 .

Avec ces métaux, la couche d'oxyde en surface croît jusqu'à une certaine épaisseur et se stabilise, protégeant le matériau sous-jacent pour peu que l'adhérence soit

assurée et qu'il n'y ait pas d'écaillage (d'origine thermique ou mécanique).

L'addition de certains éléments peut favoriser la résistance à l'oxydation, lorsqu'ils sont ajoutés en faible, voire très faible teneur pour améliorer la tenue au fluage. On peut citer :

- le molybdène
- le tungstène
- le vanadium
- le zirconium
- le thorium
- l'yttrium.

Le molybdène doit être limité à une teneur de 5 à 6%, sous peine d'oxydation catastrophique par création d'un oxyde volatil vers 800°C. Il en va de même pour le tungstène vers 1000°C.

La teneur en vanadium soit être limitée en raison de l'oxydation catastrophique que cet élément peut engendrer dès 660°C par formation d'un oxyde fusible. Le vanadium est par ailleurs à proscrire lorsque l'alliage est exposé aux gaz de combustion de certains pétroles riches en cet élément.

Calcium, zirconium, thorium et yttrium ont un effet d'accrochage de la couche d'oxyde.

2.2 Aciers inoxydables

Résistance à la corrosion

À l'exception de certains métaux précieux comme l'or ou le platine, les métaux extraits de minerais ont toujours tendance à retourner à un état combiné, s'altérant au contact de l'atmosphère, de l'eau ou de toute substance corrosive industrielle.

Les aciers dits «inoxydables» ne possèdent pas une résistance généralisée et absolue à la corrosion. Ils se présentent sous forme d'alliages ayant des aptitudes à résister à une ambiance particulière pendant une durée donnée. Leur résistance provient de leur capacité à s'auto-protéger par la formation spontanée à leur surface d'un film complexe d'oxydes et d'hydroxydes de chrome, appelé «couche passive» qui protège le substrat métallique de la corrosion généralisée et des attaques localisées. Cette couche extrêmement mince (de l'ordre de 1 à 2 μ) rend négligeable la couche de corrosion.

Les types de corrosion les plus sévères pour les aciers inoxydables sont la corrosion par piqûres, la corrosion cavernueuse et la corrosion intergranulaire.

La composition chimique des aciers inoxydables détermine leur comportement au regard de ces différents types de corrosion. Les éléments les plus influents sont le chrome (Cr), le nickel (Ni), le molybdène (Mo) et le cuivre (Cu). La faible teneur en carbone est essentielle pour préserver les propriétés mécaniques des éléments de fixation pouvant être utilisées à des températures élevées.

Alliages fer-carbone-chrome

Le carbone mis en contact à chaud avec le chrome crée une précipitation de carbure de chrome diminuant la tenue à la corrosion. On réduit cette diminution par l'emploi de stabilisants (titane, niobium) et en diminuant le taux de carbone. Selon la composition chimique de l'alliage on obtient différents types d'aciers ayant des comportements différents.

Les aciers inoxydables peuvent être classés en quatre grandes familles possédant chacune leurs propres caractéristiques :

- les aciers inoxydables austénitiques,
- les aciers inoxydables martensitiques,
- les aciers inoxydables ferritiques,
- les aciers inoxydables austéno-ferritiques (aussi appelés «duplex»).

Les aciers inoxydables austénitiques (nuances A1 à A5)

Ce sont de loin les plus connus et les plus employés. Ils contiennent, outre une teneur en chrome minimale de 17%, du nickel (à hauteur de 7% ou plus) et des additions éventuelles de molybdène, titane, niobium...

Afin de réduire la susceptibilité à l'érouissage, du cuivre peut être ajouté.

Leurs caractéristiques mécaniques en traction sont généralement modestes

mais peuvent être, pour certaines nuances, considérablement accrues par érouissage. Ils sont par contre très indiqués, de par leur absence de fragilité à basse température, pour les emplois cryogéniques.

Leur tenue à la corrosion augmente avec les teneurs en chrome et molybdène. Leur résistance à l'oxydation croît avec leur teneur en chrome : les standards à 18% de chrome résistent en atmosphère oxydante non sulfureuse jusque vers 800°C. Au-delà, il faut s'orienter vers des nuances dites «réfractaires», nettement plus alliées.

L'introduction d'éléments stabilisants tels que le titane ou le niobium permet d'éviter la corrosion intergranulaire, en particulier sur les soudures, et accroît la résistance mécanique à haute température.

Aciers de nuance A1

Les aciers de nuance A1 sont tout spécialement destinés à l'usinage. Du fait du haut taux de soufre contenu, ce groupe d'aciers à une résistance moindre à la corrosion que les aciers au taux de soufre normal.

Aciers de nuance A2

Les aciers de nuance A2 sont les plus utilisés, notamment pour les équipements de cuisine, les appareils destinés à l'industrie chimique, les éléments de fixation...

Les aciers de ce groupe ne conviennent pas pour les utilisations en acide non oxydant et comprenant des agents au chlore, comme les piscines ou l'eau de mer.

Aciers de nuance A3

Les aciers de nuance A3 sont des aciers inoxydables stabilisés avec les mêmes propriétés que les aciers de nuance A2.

Aciers de nuance A4

Les aciers de nuance A4, alliés en molybdène, sont «résistants à l'acide» et donnent une meilleure résistance à la corrosion. Cette nuance est très utilisée dans l'industrie de la cellulose puisque cette nuance d'acier est développée pour l'acide sulfurique porté à ébullition (d'où le nom «résistant à l'acide»). Il convient également dans une certaine mesure aux environnements chlorés. L'A4 est aussi fréquemment utilisé par l'industrie alimentaire et la construction navale.

Aciers de nuance A5

Les aciers de nuance A5 sont des aciers stabilisés «résistants aux acides» avec les mêmes propriétés que les aciers de nuance A4.

Les aciers inoxydables martensitiques (nuances C1 à C4)

Ces aciers contiennent en général 12 à 19% de chrome, leur teneur en carbone variant de 0,08 à 1,2%. Ils peuvent contenir du nickel et du molybdène ainsi que

certaines éléments d'addition tels que cuivre, titane ou vanadium. Ils sont souvent livrés à l'état recuit. Il est évidemment recommandé de les utiliser - au même titre que les aciers pour la construction mécanique - à l'état trempé revenu, représentant le meilleur compromis entre résistance à la corrosion et propriétés mécaniques. Ils présentent un intérêt certain lorsque la température de service n'excède pas 650°C (exemple des turbines de production d'énergie). Dans la pratique, on les utilise :

- soit après trempe et revenu de détente vers 200°C, ce qui permet de conserver la résistance mécanique maximale,
- soit après trempe et revenu entre 55° et 700°C, assurant ainsi un meilleur compromis résistance / résilience / tenue à la corrosion.

Ces aciers permettent d'associer une résistance à la corrosion intéressante à des propriétés mécaniques équivalentes à celles des aciers alliés de haut de gamme. Ils peuvent être écrouis pour l'obtention d'une meilleure résistance et sont magnétiques.

Aciers de nuance C1

Les aciers de nuance C1 ont une résistance à la corrosion limitée. Ils sont utilisés dans les pompes, les turbines et la coutellerie.

Aciers de nuance C3

Les aciers de nuance C3 ont une résistance à la corrosion limitée, même si elle est meilleure que celle des aciers de nuance C1. Ils sont utilisés dans les pompes et les valves.

Aciers de nuance C4

Les aciers de nuance C4 ont une résistance limitée à la corrosion. Ils sont destinés à l'usinage et sont, pour le reste, similaires aux aciers de nuance C1.

Les aciers inoxydables ferritiques (nuance F1)

Ce sont des alliages fer-chrome ou fer-molybdène dont la teneur en chrome varie de 10,5% à 28% et dont la teneur en carbone n'excède pas 0,08%. Ces aciers ne contiennent en général pas de nickel.

D'autres éléments d'addition - tels que Ti, Nb ou Zr - peuvent être introduits en vue d'améliorer certaines propriétés telles que soudabilité, résistance à la corrosion ou aptitude au formage à froid.

Les aciers ferritiques à teneur élevée en carbone (>20%) sont essentiellement utilisés pour leur résistance à la corrosion remarquable (super-ferritiques) et à l'oxydation à chaud.

Certaines nuances alliées au molybdène et/ou au titane possèdent une résistance à la corrosion comparable à celle des aciers austénitiques.

Ces aciers ne prennent pas la trempe et sont utilisés à l'état recuit. Ils sont très sensibles au grossissement de grain à haute température mais peuvent cependant être employés jusque vers 800°C en atmosphère oxydante (certains au-delà). A haute température, du fait de l'absence de nickel, ils sont souvent

plus résistants aux atmosphères sulfureuses que les aciers austénitiques. Leur fragilité à basse température les destine peu aux applications cryogéniques. Contrairement aux idées reçues, le fait que cette famille d'aciers soit magnétique n'est en aucun cas corrélé à une mauvaise résistance à la corrosion. Certaines nuances ont dans ce domaine des propriétés comparables, voire supérieures à celles des aciers austénitiques les plus courants.

Aciers de nuance F1

Les aciers de nuance F1 ne peuvent pas être écrouis normalement et devraient même dans certains cas, ne pas l'être. Les aciers de nuance F1 sont magnétiques. Les aciers de ce groupe sont normalement utilisés pour des équipements simples, à l'exception des «super-ferritiques» dont le taux de C et N est très bas. Ces aciers peuvent être utilisés dans des environnements très chlorés.

Désignation

Le système de désignation des nuances d'acier inoxydable et des classes de qualité pour les produits de fixation est illustré dans le tableau 2.2-1. La désignation du matériau se compose de deux groupes de caractères séparés par un trait d'union. Le premier désigne la nuance d'acier, le deuxième la classe de qualité. La désignation des nuances d'acier (premier groupe) se compose d'une lettre qui désigne le groupe d'acier :

- **A** pour l'acier austénitique,
- **C** pour l'acier martensitique,
- **F** pour l'acier ferritique.

Cette lettre est suivie d'un chiffre qui désigne la variation de la composition chimique dans ce groupe d'acier.

La désignation de la classe de qualité (deuxième groupe) consiste en deux chiffres indiquant 1/10ème de la résistance à la traction de l'élément de fixation.

- Exemple : A2-70

Désigne un acier austénitique écroui à froid, dont la résistance minimale à la traction est de 700 N/mm² (700 MPa).

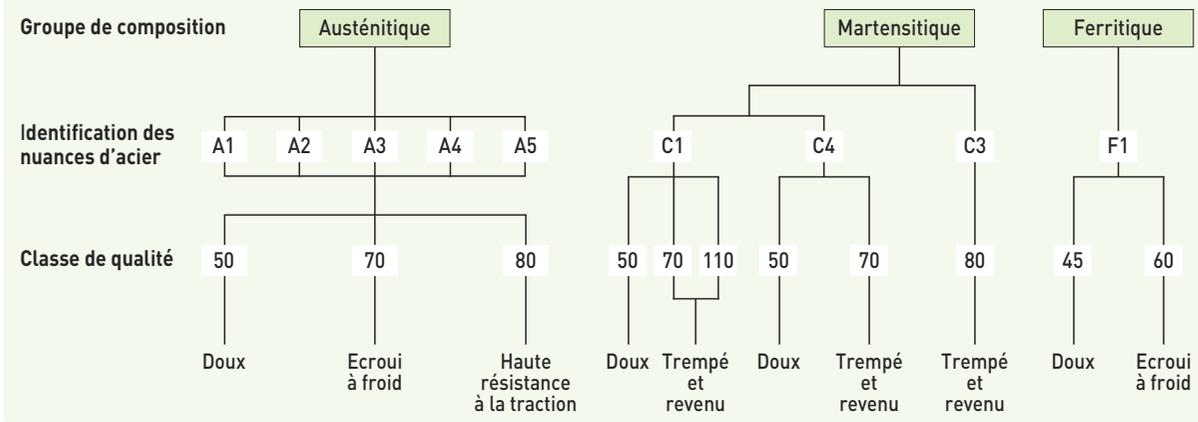
- Exemple : C4-70

Désigne un acier martensitique trempé et revenu, dont la résistance minimale à la traction est de 700 N/mm² (700 MPa).

Le marquage des aciers inoxydables à faible teneur en carbone n'excédant pas 0,03% peut être complété par la lettre L : exemple A4L-80.

Avvertissement : les normes de référence ISO 3506-1 et ISO 3506-2 sont actuellement en révision. Les nouvelles versions introduiront de nouvelles nuances notamment les aciers "Duplex".

2.2-1. Système de désignation des nuances d'acier inoxydable et des classes de qualité pour les vis et goujons



Principales caractéristiques des aciers inoxydables

2.2-2

Composition chimique [%]	Austénitiques					Martensitiques			Ferritiques F1
	A1	A2	A3	A4	A5	C1	C3	C4	
C	0,12	0,1	0,08	0,08	0,08	0,09 à 0,15	0,17 à 0,25	0,06 à 0,15	0,12
Si	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Mn	6,5	2	2	2	2	1	1	1,5	1
P	0,2	0,05	0,045	0,045	0,045	0,05	0,04	0,06	0,04
S	0,15 à 0,35	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,15 à 0,35	0,03
Cr	16 à 19	15 à 20	17 à 19	16 à 18,5	16 à 18,5	11,5 à 14	16 à 18	12 à 14	15 à 18
Mo	0,7	- [5]	- [5]	2 à 3	2 à 3	-	-	0,6	- [6]
Ni	5 à 10	8 à 19	9 à 12	10 à 15	10,5 à 14	1	1,5 à 2,5	1	1
Cu	1,7 à 2,25	4	1	1	1	-	-	-	-
Notes	[2] [3] [4]	[7] [8]	[9]	[8] [10]	[9] [10]	[10]		[2] [10]	[11] [12]

1. Sauf indications contraires, les valeurs sont maximales.
2. Le soufre peut être remplacé par le sélénium.
3. Si Ni < 8%, le Mn doit être de 5%.
4. Pas de limite de Cu pourvu que Ni > 8%.
5. Le fabricant peut choisir d'inclure du Mo. Toutefois si certaines applications exigent une limitation, elle doit être stipulée à la commande.
6. Le fabricant peut choisir d'inclure du Mo.
7. Si Cr < 17%, le Ni doit être de 12% minimum.
8. Pour les aciers austénitiques au C maximum de 0,03%, la teneur en azote est limitée à 22%.
9. Doit contenir du Ti ≥ 5xC jusqu'à 0,8% maximum pour stabilisation et doit être marqué selon ce tableau ou doit contenir du niobium (colombium) et/ou du tantalum ≥ 10xC jusqu'à 1% maximum pour stabilisation et être marqué selon ce tableau.
10. Le fabricant peut choisir d'augmenter la teneur en carbone lorsque que l'obtention des caractéristiques mécaniques pour les diamètres supérieurs l'exige mais ne doit pas dépasser 0,12% pour les aciers austénitiques.
11. Peut contenir du Ti ≥ 5xC jusqu'à 0,8% maximum.
12. Peut contenir du niobium (colombium) et/ou du tantalum ≥ 10xC jusqu'à 1% maximum.

Aciers inoxydables	Ferritiques et semi-ferritiques	Austénitiques					Martensitiques	A durcissement structural	Réfractaires
		Sans molybdène	Avec molybdène	Stabilisés	A bas taux de carbone	Austéno-ferritiques			
Exemples de nuances d'aciers inoxydables									
NFA	Z8C17	Z6CN18-10	Z6CND17-11	Z6CNT8-10	Z3CN18-10	Z5CND27-05Az	Z20C13	Z7CNU17-04	Z12CN25-20
DIN	1.4016								
AISI	430								
Caractéristiques mécaniques									
Résistance Rm	++	++	++	++	+	+++	+++	++++	++
Résistance Re	++	+	+	+	+	++	+++	++++	++
Dureté	+++	+	+	+	+	+++	++++	-	-
Résilience	+	+++	+++	+++	+++	+++	+	+	++
Usinabilité	++	+	+	+	+	+	+++	+	+
Soudabilité	+	++	++	++	+++	++	-	-	++
Trempabilité	+	+	+	+	-	+	++++	+	+
Amagnétisme	-	+	+++	+	+	-	-	-	-
Résistance à la corrosion									
A froid	+	+++	+	+++	++	++	++	++++	+++
A température ambiante	+	++	+++	+++	++	+++	+++	++++	+++
A chaud	+	+	+	++	++	+++	+++	++++	+++++
Aux piqûres	+	+	+++	+	+	+++	-	+++	+++
Intergranulaire	+	-	-	+++	+++	-	-	+++	+++
Sous contrainte	+	-	-	-	-	+++	-	+++	+++

- mauvais, + faible, ++ modéré, +++ bon, ++++ élevé, +++++ excellent

2.3 Métaux non ferreux

Cuivre et alliages de cuivre

Cuivres affinés (NF A 51-050)

Les cuivres non alliés ont une teneur minimale en cuivre de 99,85% de la masse. Leur désignation ISO comporte le symbole chimique international de l'élément (Cu), suivi d'une série de caractères alphabétiques majuscules se référant au type de cuivre :

- **ETP** : affiné électrolytiquement, non désoxydé, à conductivité garantie,
- **FRHC** : affiné thermiquement, non désoxydé, à conductivité garantie,
- **FRTP** : affiné thermiquement, à conductivité non garantie,
- **DHP** : affiné thermiquement ou électrolytiquement, phosphore résiduel fort,
- **DLP** : affiné thermiquement ou électrolytiquement, phosphore résiduel faible,
- **OF** : désoxydé,
- **OFE** : exempt d'oxygène, de haute pureté.

Exemple : Cu-ETP

Alliages de cuivre (NF A 02-009)

La désignation des alliages de cuivre comporte le symbole chimique international Cu, suivi des symboles des éléments d'alliage et d'un nombre entier indiquant leur teneur en %.

Les éléments d'alliage sont rangés par ordre de teneurs décroissantes : alliage de cuivre à 15% de zinc et 13% d'aluminium.

Exemple : Cu Zn 15 Al 13

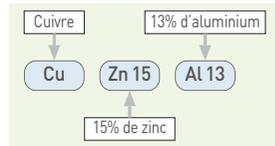
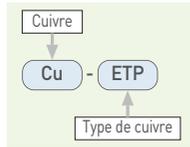
Propriétés : plus grande dureté que le cuivre affiné, meilleure usinabilité facilitant la mise en forme.

Si la teneur en élément d'alliage est inférieure à 1% elle n'est pas indiquée sauf pour distinguer deux nuances voisines, par exemple Cu Ag 0,05 et Cu Ag 0,1.

Cuivres alliés

Les alliages de cuivre sont appelés par le mot cupro associé à l'élément principal d'alliage (par exemple Cu Be 2 est un cupro-béryllium) sauf pour les alliages courants :

- laitons (cuivre-zinc),
- bronzes (cuivre-étain),
- maillechorts (cuivre-nickel-zinc),
- cupro-nickels (cuivre-nickel),
- zamak (cuivre-zinc-aluminium-manganèse) ...



Alliages de nickel

La désignation des alliages de nickel reprend le même principe que celui des alliages de cuivre.

Exemple : Ni Mo 16 Cr 15 W

Alliage de nickel à 16% de molybdène, 15,5% de chrome, 4,00% de tungstène (autres éléments : C ≤ 0,02 - Co ≤ 2,50 - Mn ≤ 1,00 - Fe ≤ 4,00).

Propriétés : excellente tenue à la corrosion.

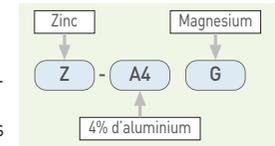
Autres alliages non ferreux

Alliages de zinc (NF A 02-004)

Exemple : Z-A4 G

Alliage de zinc à l'aluminium (4%) et au magnésium : désignation courante du zamak 3.

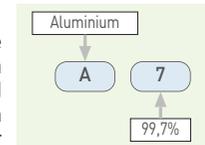
La norme NF A 02-004 n'est officiellement plus utilisée pour désigner les alliages d'aluminium corroyés (voir paragraphe «Produits corroyés»).



Aluminiums affinés (NF A 02-004)

La désignation d'un métal pur se fait par un groupe de lettres (symboles AFNOR) qui correspondent à ce métal, suivi d'un groupe de chiffres (de 0 à 99) qui indiquent l'indice de pureté chimique, selon un échelonnement particulier à chaque métal : **A7** pour un aluminium à 99,7%.

Exemple : A7



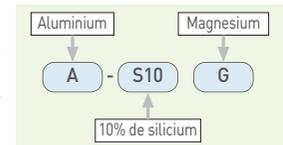
Alliages d'aluminium (NF A 02-004)

La désignation d'un alliage se fait par deux groupes de lettres et de chiffres :

- une lettre (ou des lettres) désigne(nt) le métal de base,
- un deuxième groupe séparé du premier par un tiret, comporte les lettres symbolisant les principaux éléments d'addition, respectivement suivis par des nombres indiquant les valeurs nominales de ces éléments.

Exemple : A-S10 G

Alliage d'aluminium de fonderie au magnésium (**G**) à 10% de silicium (**S10**).



Produits corroyés (NF EN 573-2 et NF A 02-121/1994)

Aluminium non allié corroyé

Toutes les indications doivent être placées entre crochets et suivre la désignation à quatre chiffres. La lettre W doit être séparée de la désignation qui suit par un tiret.

Exemple : EN AW-1199[Al 99,99]

- **EN** : préfixe,
- **AW** : produit corroyé,
- **1199** : composition chimique,
- **[Al 99,99]** : désignation chimique facultative indiquant la teneur nominale de l'élément considéré.

Alliage d'aluminium corroyé

Lorsqu'il est nécessaire de faire figurer plusieurs éléments d'addition, ces derniers sont ordonnés par teneurs nominales décroissantes ou par ordre alphabétique s'ils sont de même teneur.

Exemple : EN AW-6061[Al Mg1 Si Cu]

Alliage d'aluminium à haute pureté

Il est nécessaire d'indiquer en clair la teneur spécifiée élevée.

Exemple : EN AW-5305[Al 99,85 Mg1]

Composition chimique des produits corroyés

Système de désignation numérique (système à quatre chiffres).

Groupe d'alliages

Le premier des quatre chiffres indique le groupe d'alliage comme suit :

- aluminium à 99,0% minimum et plus : 1xxx (série 1000)
- alliages d'aluminium groupés par éléments d'addition principaux :

2.3-1

Série	Désignation	Élément d'alliage principal	Phase principale présente dans l'alliage
1000	1xxx	Aluminium (Al) : 99% minimum	
2000	2xxx	Cuivre (Cu)	Al ₂ Cu - Al ₂ CuMg
3000	3xxx	Manganèse (Mn)	Al ₆ Mn
4000	4xxx	Silicium (Si)	
5000	5xxx	Magnésium (Mg)	Al ₃ Mg ₂
6000	6xxx	Magnésium et silicium	Mg ₂ Si
7000	7xxx	Zinc (Zn)	MgZn ₂
8000	8xxx	Autres éléments	
9000	-	Non utilisé	

Groupe 1xxx

Le deuxième chiffre indique les modifications dans les limites d'impuretés ou dans les éléments d'addition.

Si le deuxième chiffre est un zéro, il s'agit d'un aluminium non allié ayant des limites d'impuretés naturelles. Les chiffres 1 à 9 indiquent un contrôle spécial d'une ou plusieurs impuretés ou éléments d'addition particuliers.

Les troisièmes et quatrièmes chiffres indiquent le pourcentage minimum d'aluminium. Les deux derniers chiffres donnent la teneur en aluminium minimale au dessus de 99% à 0,01% près. Par exemple l'alliage 1350 contient au moins 99,50% d'aluminium.

Groupes 2xxx à 8xxx

Dans ces groupes, le deuxième chiffre indique les modifications de l'alliage. Si le deuxième chiffre est un zéro, il s'agit de l'alliage original. Les chiffres 1 à 9 qui sont attribués consécutivement, indiquent les modifications de l'alliage.

Les troisièmes et quatrièmes chiffres n'ont pas de signification spéciale mais servent seulement à identifier les différents alliages d'aluminium dans le groupe.

Nota : il existe un système numérique de désignation similaire pour les alliages d'aluminium de fonderie.

États métallurgiques des métaux et alliages non ferreux corroyés (NF A 02-006 à 008)

Il est possible d'utiliser deux modes de désignation des états métallurgiques :

- l'indice de résistance qui indique la valeur minimale de la résistance à la traction du produit,
- le symbole caractérisant les traitements thermiques et/ou mécaniques subis par le métal.

Indice de résistance

Il est composé de la lettre **R** et d'un ou deux chiffres qui indiquent la résistance à la traction minimale par 1/10 de sa valeur en N/mm². Cette valeur est arrondie au nombre entier supérieur lorsque le dernier chiffre est égal ou supérieur à 5. Le cas échéant, une lettre complémentaire **A** (pour distinguer deux pièces ayant même résistance à la traction mais une limite élastique ou un allongement plus élevé) ou la lettre **L** (laqué).

Exemple : 6060 R19

Alliage d'aluminium corroyé (A GS) avec Rm mini = 190 N/mm².

Symbole caractérisant le traitement

Il est composé :

- de l'état métallurgique de base (lettre **F, M, O, H, T** ou **W**),
- du moyen principal d'obtenir cet état (subdivisions en un ou plusieurs chiffres),

- des variantes conventionnelles en fin de désignation (voir ci-après).

Exemple : Cu Sn6 P H13

Alliage de cuivre écroui, obtenu par écrouissage, de bonne résistance.

Symbole de l'état métallurgique de base

- **F** : état brut de fabrication. Etat d'un produit obtenu par déformation plastique sans que ses caractéristiques mécaniques soient définies,
- **M** : état brut de fabrication (pour cuivre et alliages de cuivre). Etat d'un produit obtenu par déformation plastique sans que ses caractéristiques mécaniques soient définies,
- **O** : état recuit. Etat d'un produit corroyé ayant subi un recuit complet,
- **H** : état écroui : état d'un produit ayant subi des déformations plastiques en vue de lui conférer des caractéristiques mécaniques déterminées,

- **T** : état durci par traitements thermiques. Les traitements thermiques considérés sont des combinaisons de tout ou partie de l'ensemble des traitements suivants : mise en solution (séparée ou non), trempe, maturation, revenu, avec application éventuelle de déformations plastiques,
- **W** : mise en solution (trempé).

Dans le cas des aluminiums et alliages d'aluminium, les états de base **F** et **O** ne comportent pas de subdivision.

Pour les cuivres et alliages de cuivre, l'état **M** comporte des subdivisions qui permettent de différencier les états bruts de presse (1, 2 ou 3), l'état **O** comporte des subdivisions liées à la grosseur du grain (**O** et **OS**) ou liées à l'aptitude à l'emboutissage (**OX**).

Les tableaux 2.3-2, 2.3-3 et 2.3-4 reprennent les subdivisions des états **H** et **T**, les plus utilisées.

Subdivisions des états H et T, les plus utilisées

Cuivres et alliages de cuivre

2.3-2

Symbole	Première subdivision	Définition	Deuxième subdivision
H	1	Ecrouissage seul.	Les chiffres 1, 2, 3..., désignation choisie dans l'ordre numérique et pour l'ordre croissant des valeurs de résistance mécanique du métal.
	2	Ecrouissage seul suivi d'un recuit partiel.	
	3	Ecrouissage suivi d'un traitement de détente.	

2.3-3

Symbole	Première subdivision	Définition
T	A	Refroidissement contrôlé après fabrication à température élevée.
	B	Mise en solution et trempe.
	C	Refroidissement contrôlé après fabrication à température élevée et déformation à froid.
	D	Mise en solution, trempe et déformation à froid.
	E	Refroidissement contrôlé après fabrication à température élevée et revenu.
	F	Mise en solution, trempe et revenu.
	G	Refroidissement contrôlé après fabrication à température élevée, déformation à froid et revenu.
	H	Mise en solution, trempe, déformation à froid et revenu.
	K	Refroidissement contrôlé après fabrication à température élevée, revenu et déformation à froid.
L	Mise en solution, trempe, revenu et déformation à froid.	

Aluminiums et alliages d'aluminium

2.3-4

Symbole	Première subdivision	Définition	Deuxième subdivision	Définition
H	1	Ecrouissage seul.	2	Etat 1/4 dur
			4	Etat 1/2 dur
	2	Ecrouissage seul suivi d'un recuit partiel.	6	Etat 3/4dur
			8	Etat dur
	3	Ecrouissage suivi d'un traitement de détente.	9	Etat extra-dur
T	1	Refroidi après transformation à chaud et mûri.	1	Revenu favorisant la ductibilité
	2	Refroidi après transformation à chaud, écroui et mûri.		
	3	Mise en solution séparée, trempé, écroui et mûri.		
	4	Mise en solution séparée, trempé et mûri.	6	Revenu favorisant la résistance
	5	Refroidi après transformation à chaud et revenu.		
	6	Mise en solution séparée, trempé et revenu.	51	Relaxation par traction contrôlée
	7	Mise en solution séparée, trempé et sur-revenu.		
	8	Mise en solution séparée, trempé, écroui et revenu.		
	9	Mise en solution séparée, trempé, revenu et écroui.	52	Relaxation par compression contrôlée
	10	Refroidi après transformation à chaud, écroui et revenu.		
		53	Relaxation par traction-compression	

Modes d'obtention et états de livraison des métaux et alliages non ferreux moulés en fonction de leur traitement thermique (NF A 02-002)

2.3-5

Mode d'obtention		Etat de livraison	
Y0	Non défini.	0	Aucun traitement ou non spécifié.
Y1	Lingot.	1	Recuit.
Y2	Sable.	2	Trempé.
Y3	Coquille par gravité.	3	Trempé et revenu.
Y4	Sous pression.	4	Trempé et mûri.
Y5	Par concrétation.	5	Stabilisé.
Y6		6	Trempé et stabilisé.
Y7	Coulée continue.	7	
Y8	Centrifugation.	8	
Y9	Suivant prescription.	9	Suivant prescription.

2.4 Matériaux thermoplastiques et thermodurcissables

2.4-1

Matières thermoplastiques

Les matières thermoplastiques se ramollissent sous l'action de la chaleur et durcissent en se refroidissant de façon réversible. Elles sont réutilisables.

Nuances et symboles	TLU ^(a)	T°C fusion ^(b)	TRP ^(c)	R _m (MPa) ^(d)	E (MPa) ^(e)	Densité g/cm ³ ^(f)	Usinage ^(g)	Montage ^(h)	Utilisations
Acétate de cellulose : CA	60	260	4	30-60	2000	1,3	3	4	Jouets. Emballages.
Acrylonitrile butadiène styrène : ABS	70	150	2	18-65	2500	1,05	4	3	Carrosserie automobile. Jouets. Armoires de toilette. Planches à voile.
Polyamide (nylon) : PA 6.6	120	260	1	65	1100-2800	1,1	4	4	Roues. Engrenages. Coussinets. Clipsage.
Polycarbonate : PC	120	240	4	60	2240	1,05	4	2	Visières de casques. Vitres de sécurité. Biberons.
Polyéthylène haute densité : PEHD	80	130	2-3	25-39	500-1100	0,95	4	4	Films agricoles. Rails de glissement. Tuyaux souples. Flacons. Bidons.
Polyméthacrylate de méthyle : PMMA (plexiglas)	90	140	4	49-77	3200	1,15	4	4	Plaques pour vitres. Hublots. Optique. Eclairage automobile (plexiglas).
Polyoxyméthylène / Polyacétal : POM	110	165	1	70	3000	1,41	4	2	Eléments de machine. Robinets. Engrenages.
Polypropylène : PP	80	170	1-4	31	1200	0,9	4	4	Tuyaux. Gains. Cordes. Films alimentaires.
Polytétrafluoroéthylène : PTFE (teflon)	260	320	-	14-50	2700-7500	2,1	4	-	Bagues. Patins de glissement. Joints. Tuyauterie.
Polychlorure de vinyle : PVC									
	souple	35	1-4	10-20	25		-	-	Tubes. Tuyaux. Gains de fils électriques.
rigide	50	200	1-4	50	2830	1,38	3	3	Gouttières. Fenêtres. Flacons.

(a) TLU : température limite d'utilisation (b) TF : température de fusion (c) TRP : transparence (d) R_m (e) E : module d'élasticité de Young (f) D : densité (g) Usinage (h) Montage (g) 1 : difficile / (g) 2 : possible / (g) 3 : moyen / (g) 4 : bon (h) 1 : difficile / (h) 2 : possible / (h) 3 : moyen / (h) 4 : bon.

2.4-2

Matières thermodurcissables

Les matières thermodurcissables se ramollissent sous l'action de la chaleur et durcissent en se refroidissant de façon irréversible. Elles ne sont pas réutilisables.

Nuances et symboles	TLU ^(a)	TRP ^(b)	R _m (MPa)	E (MPa) ^(c)	Usinage ^(d)	Montage ^(d)	Utilisations
Polyépoxydes : EP	120	2	28	2400	3	3	Jouets. Emballages.
Phénoplaste : PF	120	1	30	7000	3	4	Carrosserie automobile. Jouets. Armoires de toilette. Planches à voile.
Polyester : UP	150	1	30	700	3	4	Roues. Engrenages. Coussinets. Clipsage.
Polyuréthane : PUR, rigide	105	2	1,2	700	4	-	Visières de casques. Vitres de sécurité. Biberons.
Silicone : SI	220	1	7	-	2	1	Films agricoles. Rails de glissement. Tuyaux souples. Flacons. Bidons.

(a) TLU : température limite d'utilisation (b) TRP : transparence (c) E : module d'élasticité de Young (d) 1 : difficile / (d) 2 : possible / (d) 3 : moyen / (d) 4 : bon

Classement alphabétique des symboles usuels

Matières thermoplastiques

ABS	Polyacrylonitrile-butadiène-styrène
AMMA	Polyacrylonitrile-méthacrylate de méthyle
ASA	Polyacrylonitrile-styrène-acrylate
C	Cellulose
CA	Acétate de cellulose
CAB	Acétobutyrate de cellulose
CAP	Acétopropionate de cellulose
CMC	Carboxyméthyl-cellulose
CN	Nitrate de cellulose
CP	Propionate de cellulose
CS	Caséine
EC	Ethyl-cellulose
EVAC	Polyéthylène-acétate de vinyle
FEP	Polyéthylène-propylène perfluoré
MBS ou SBMMA	Polystyrène-butadiène-méthacrylate de méthyle
PA	Polyamide
PAN	Polyacrylonitrile
PB	Polybutène-1 ou polybutylène
PBTP	Polybutylène téréphtalate
PC	Polycarbonate
PCTFE	Polychlorotrifluoréthylène
PE	Polyéthylène
PEBD	Polyéthylène basse densité
PEHD	Polyéthylène haute densité
PEOX	Polyoxyéthylène
PET	Polyéthylène téréphtalate
PMMA	Polyméthacrylate de méthyle
PMP	Polyméthyl-4-pentène-1
POM	Polyoxyméthylène / Polyacétal (Delrin)

PP	Polypropylène
PPO	Polyoxyphénylène
PPOX	Polyoxypropylène
PPS	Polysulfure de phénylène
PS	Polystyrène
PSU	Polysulfone
PTFE	Polytétrafluoroéthylène
PVA	Polyacétal de vinyle
PVAC	Polyacétate de vinyle
PVAL	Polyalcool de vinyle
PVB	Polybutyral de vinyle
PVC	Polychlorure de vinyle
PVDC	Polychlorure de vinylidène
PVDF	Polyfluorure de vinylidène
PVF	Polyfluorure de vinyle
PVFM	Polyformal de vinyle
PVK	Polycarbazol de vinyle
PVP	Polypyrrolidone de vinyle
SAN	Polystyrène-acrylonitrile
SBMMA ou MBS	Polystyrène-butadiène-méthacrylate de méthyle
SMS	Polystyrène-méthylstyrène
VCE	Polychlorure de vinyle-éthylène
VCEMA	Polychlorure de vinyle-éthylène-acrylate de méthyle
VCMA	Polychlorure de vinyle-acrylate de méthyle
VCVAC	Polychlorure de vinyle-acétate de vinyle
VCCDC	Polychlorure de vinyle-chlorure de vinylidène

Matières thermodurcissables

CF	Crésol-formol
EP	Polyépoxyde
MF	Mélatamine-formol
PDAP	Polyphthalate de dialyne
PF	Phénol-formol
PI	Polyimide
PPX	Polyparaxylène
PUR	Polyuréthane
SEMP	Polymaléate-phthalate d'éthylène réticulé par le styrène silicone
SI	Silicone
UF	Urée-formol
UP	Polyester insaturé