

Chapitre 1

MÉTALLURGIE

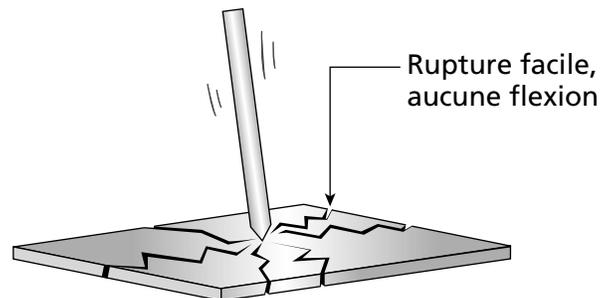
Le travail du soudeur s'effectue sur une vaste gamme de métaux. Afin d'être en mesure de choisir ou de justifier le choix d'un procédé de soudage et d'un métal d'apport approprié, on doit évidemment connaître les propriétés et la soudabilité de la pièce à souder. C'est là que des notions de métallurgie trouvent toute leur utilité. Ce premier chapitre propose donc un aperçu des propriétés physiques de différents métaux et présente, plus particulièrement, les métaux les plus communément soudés.

Propriétés des métaux

Les métaux se distinguent en fonction de différentes caractéristiques qui leur confèrent des propriétés spécifiques. Celles-ci déterminent non seulement leur soudabilité, mais aussi la fonction du métal dans un assemblage.

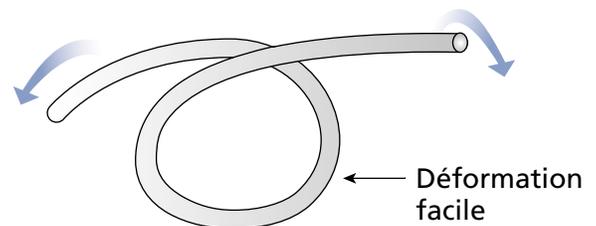
Fragilité

La fragilité désigne la caractéristique d'un métal qui se brise facilement sous l'effet d'un choc ou d'une déformation. Il se déforme peu ou pas du tout, et se casse facilement.



Ductilité

À l'opposé, la ductilité représente la capacité d'un métal à se déformer sans se rompre. Il peut être étiré, allongé ou soumis à des forces de torsion. Les matériaux ductiles sont difficiles à casser parce que les fissures ou les défauts créés par une déformation se propagent difficilement.



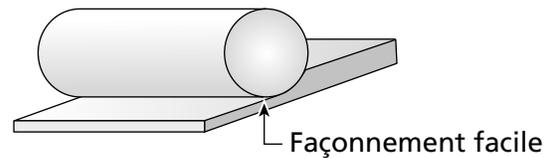
Ténacité

La ténacité correspond à la capacité des matériaux à résister aux chocs sans se briser ni s'écailler. Les marteaux et les équipements utilisés pour déformer ou couper des plaques d'acier (matrices, poinçons, etc.) sont constitués de matériaux de haute ténacité.



Malléabilité

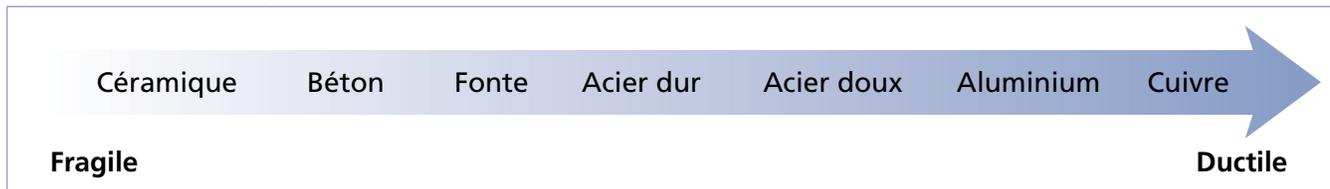
La malléabilité est une caractéristique qui permet au métal de se laisser façonner. Elle réfère à la résistance relative du métal soumis à des forces de compression, comme le forgeage ou le laminage. Un exemple de matériel extrêmement malléable, quoique non soudable, est la pâte à modeler.



Notons que la malléabilité d'un matériau croît avec l'augmentation de la température.

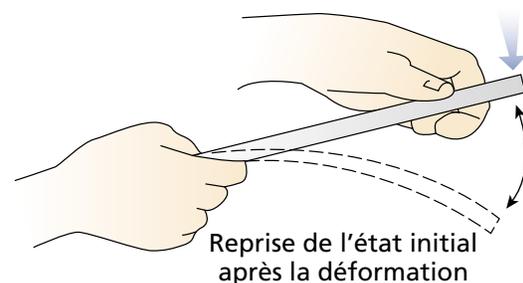
En soudage, on travaille généralement avec des matériaux ductiles et malléables. La figure 1.1 présente certains matériaux en fonction de leur ductilité/malléabilité.

Figure 1.1 Du plus fragile au plus ductile



Élasticité

L'élasticité désigne la capacité d'un matériel à reprendre sa forme originale après avoir subi une déformation. C'est le cas typique d'un ressort qu'on étire puis qu'on relâche.

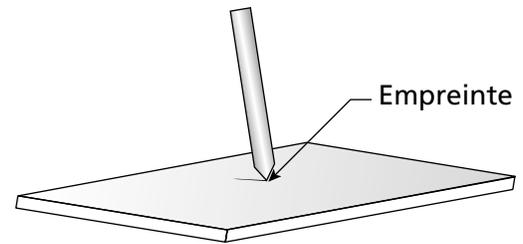


Saviez-vous que...

La plupart des métaux sont élastiques jusqu'à un certain niveau de déformation. Dépassé cette limite, les métaux demeurent déformés en permanence même en enlevant la force exercée; on parle dans ce cas d'une déformation plastique ou irréversible. À la suite d'une déformation encore plus importante, les métaux peuvent subir des ruptures.

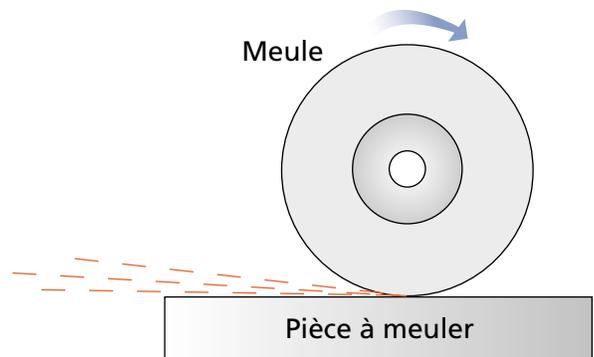
Dureté

La dureté est la capacité d'un corps à résister à la pénétration d'un corps plus dur que lui. Elle se caractérise aussi par sa résistance aux rayures. Le diamant constitue le matériau le plus dur. Les aciers à haute teneur en carbone sont durs, les aciers doux, un peu moins, et l'aluminium est de faible dureté.



Résistance à l'abrasion

Les matériaux durs présentent aussi une bonne résistance à l'abrasion, c'est-à-dire qu'ils ne s'usent pas facilement par frottement. En termes pratiques, ils sont plus difficiles à meuler.



Résistance à la corrosion

La résistance à la corrosion désigne la capacité d'un matériau à ne pas se dégrader sous l'effet de la combinaison chimique de l'oxygène et du métal. Un métal ferreux résistant à la corrosion ne rouille pas ; c'est le cas des aciers inoxydables et de certains autres aciers d'alliage.



Magnétisme

Le magnétisme est une propriété caractéristique des métaux ferreux, qui les rend sensibles aux aimants.



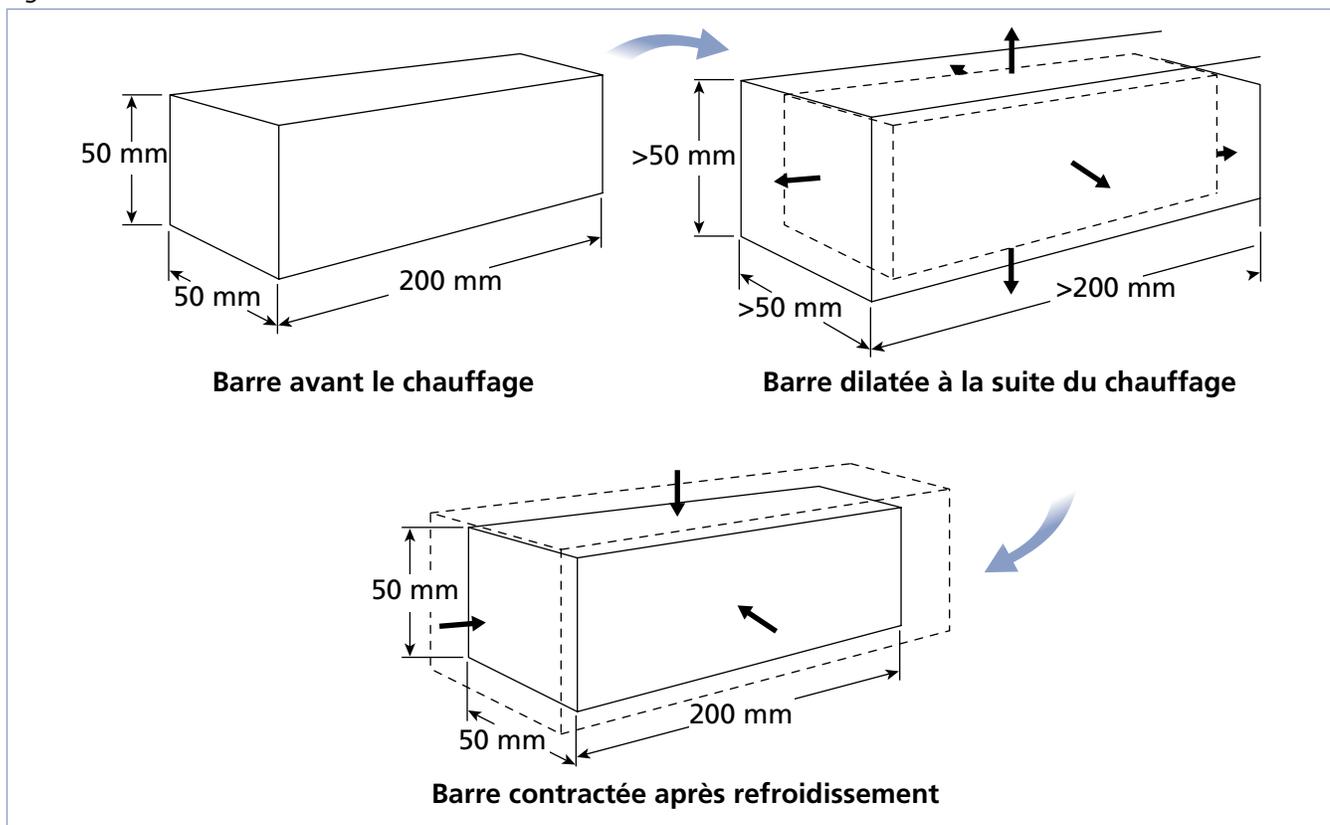
Caractéristiques thermiques et électriques

En soudage, le comportement d'un matériau sous l'effet de la chaleur permet de déterminer sa soudabilité, car la plupart des procédés de soudage impliquent l'application locale de chaleur. Voyons ici trois propriétés thermiques importantes des métaux.

Dilatation et contraction (ou retrait) thermiques

Lorsqu'un matériau est chauffé, il s'étire un peu; c'est ce qu'on appelle la dilatation. À l'opposé, il subit un raccourcissement sous l'effet du froid; c'est la contraction ou le retrait (figure 1.2). Le niveau de dilatation et de retrait d'un métal influe sur sa soudabilité. Plus le métal s'étire ou se raccourcit, plus le risque que des fissures ou des déformations apparaissent est élevé. On définit la capacité de dilatation/retrait des métaux par un coefficient thermique. Ainsi, le coefficient thermique de l'aluminium, par exemple, est plus élevé que celui de l'acier. Pour une même variation de température, l'aluminium se dilate presque deux fois plus.

Figure 1.2 Dilatation et contraction



Point de fusion

Le point de fusion indique la température à laquelle un métal passe de l'état solide à l'état liquide. Le point de fusion est un facteur important pour déterminer la soudabilité d'un métal. Ainsi, plus le point de fusion d'un métal est bas, moins la chaleur nécessaire pour le souder sera élevée.

Le tableau de la figure 1.3 présente les points de fusion de quelques matériaux

Figure 1.3 Points de fusion

Matériau	Température de fusion en °C	Température de fusion en °F
Mercure	-39	-38
Magnésium	650	1 202
Aluminium	660	1 220
Cuivre	1 085	1 985
Nickel	1 453	2 647
Fer	1 535	2 795
Titane	1 660	3 020
Alumine (oxyde d'aluminium)	2 054	3 729
Carbone (diamant)	3 550	6 422

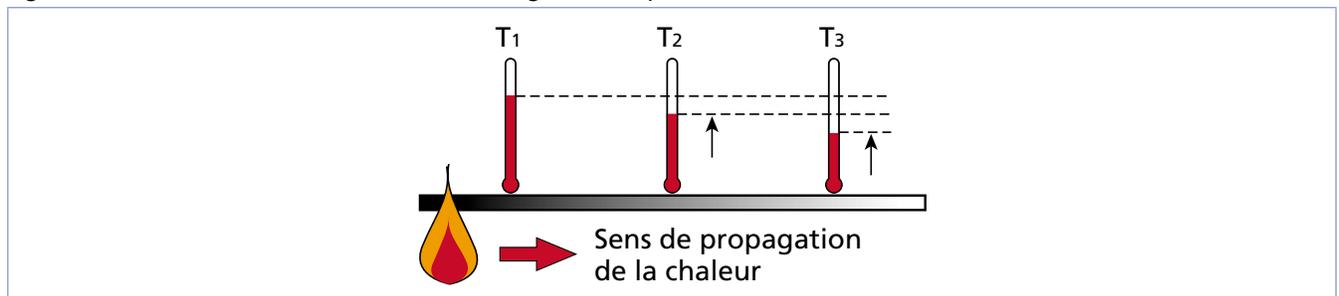


Notez que l'oxydation de l'aluminium a un effet important sur le point de fusion. C'est pour cette raison qu'on doit s'assurer d'enlever la couche d'alumine avant de souder l'aluminium.

Conductivité

La **conductivité thermique** est la capacité d'un matériau à conduire ou à transférer la chaleur (figure 1.4). La conductivité thermique est importante parce qu'elle permet de déterminer le niveau de préchauffage nécessaire et la quantité de chaleur requise pour le soudage. Le cuivre est un très bon conducteur thermique. L'aluminium possède environ la moitié de la conductivité thermique du cuivre, alors que l'acier, seulement un dixième.

Figure 1.4 Conduction de chaleur dans une tige métallique



La **conductivité électrique**, quant à elle, est définie par la capacité d'un matériau à transmettre l'électricité, d'où son importance lorsqu'on a affaire à des procédés de soudage électriques. En général, la conductivité électrique diminue avec la température.



Exercice 1.1

1. Dans la figure 1.5, associez les différentes propriétés des métaux à l'énoncé correspondant.

Figure 1.5

Quelle est la propriété qui...	Propriétés des métaux
a) permet au métal d'être allongé ou déformé sans se rompre? <input type="checkbox"/>	1. Magnétisme
b) permet au métal de reprendre sa forme après avoir été déformé? <input type="checkbox"/>	2. Ductilité
c) permet la transmission de la chaleur dans un métal? <input type="checkbox"/>	3. Résistance à la corrosion
d) facilite le façonnage d'un métal en feuille mince sous un effet de compression? <input type="checkbox"/>	4. Dureté
e) correspond à une bonne résistance à la rupture par choc? <input type="checkbox"/>	5. Ténacité
f) attire les métaux ferreux vers les aimants? <input type="checkbox"/>	6. Fragilité
g) indique la température à laquelle le métal se liquéfie? <input type="checkbox"/>	7. Élasticité
h) permet à la surface d'un métal de résister aux rayures? <input type="checkbox"/>	8. Malléabilité
i) ne supporte pas les efforts de pliage et provoque le bris du matériau lors d'un choc ou d'un impact? <input type="checkbox"/>	9. Conductivité électrique
j) permet au métal de conduire l'électricité? <input type="checkbox"/>	10. Conductivité thermique
k) permet au métal de résister à l'oxydation? <input type="checkbox"/>	11. Point de fusion

Métaux ferreux

Les métaux ferreux contiennent du fer; la plupart sont magnétiques. En soudage, l'intérêt pour les métaux ferreux est grand, car cette catégorie contient tous les aciers. En effet, l'acier est essentiellement composé de fer auquel on a ajouté un faible pourcentage de carbone. Pour former les aciers alliés, on ajoute aussi d'autres métaux qui confèrent à l'alliage des propriétés particulières.

Aciers au carbone

Les aciers au carbone (non alliés) contiennent entre 0,06 et 2,11 % de carbone (en deçà de 0,06 % de carbone, le métal est considéré comme étant du fer). Par ailleurs, sur le marché, on trouve rarement des aciers à teneur en carbone supérieure à 1,7 %.

On distingue quatre catégories d'aciers non alliés en fonction de leur teneur en carbone, comme le montre le tableau de la figure 1.6.

Figure 1.6 Teneur en carbone des aciers

Type d'acier	Teneur en carbone (%)
Acier doux	De 0,06 à 0,2
Acier semi-dur	De 0,2 à 0,5
Acier dur*	De 0,5 à 0,95
Acier extra-dur**	De 0,95 à 2,11

* Les aciers non alliés dont la teneur en carbone dépasse 0,5 % ont généralement une soudabilité très faible ou nulle; ils permettent cependant de fabriquer de très bons outils.

** L'acier extra-dur à teneur en carbone supérieure à 1,7 % ne se trouve pratiquement pas sur le marché.

La figure 1.7 illustre les utilisations possibles des divers types d'aciers en fonction de leur teneur en carbone, tandis que le tableau de la figure 1.8 présente les caractéristiques des trois principaux types d'aciers employés.

Figure 1.7 Utilisations des aciers au carbone

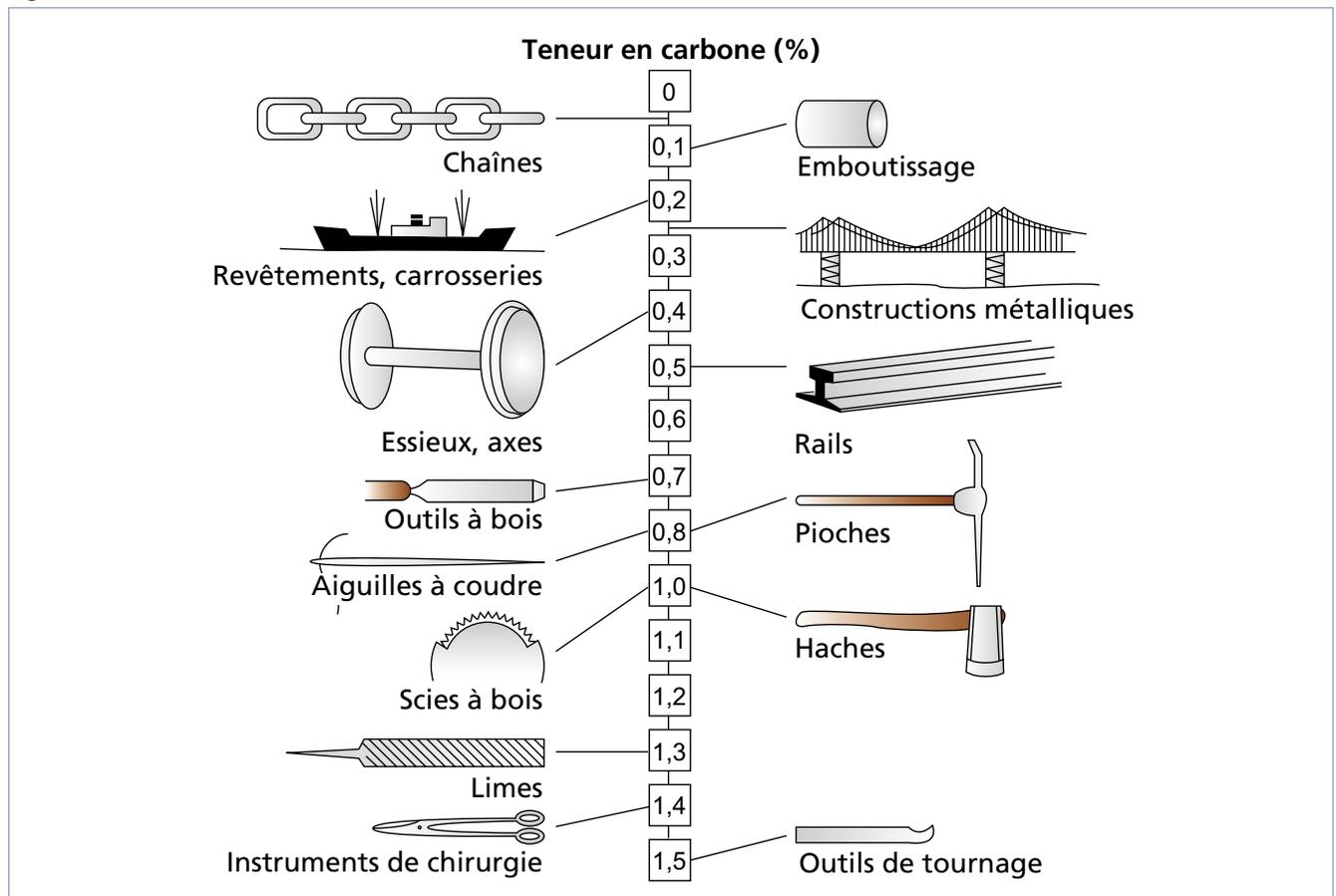


Figure 1.8 Caractéristiques et propriétés des principaux types d'aciers

Type d'acier	Caractéristiques et propriétés
Acier doux	<ul style="list-style-type: none"> – Est le plus largement utilisé dans l'industrie. – Sert à fabriquer des boulons, des écrous, des articles en tôle, etc. – Constitue près de 85 % de la production totale d'acier. – Est malléable, même à froid.
Acier semi-dur	<ul style="list-style-type: none"> – Est plus résistant à la traction que l'acier doux. – Est plus difficile à souder que l'acier doux. – Constitue un acier d'usage général pour la fabrication d'outils (ex. : marteaux, tournevis, ressorts, etc.), d'éléments préfabriqués, de pièces forgées, etc.
Acier dur	<ul style="list-style-type: none"> – S'usine bien mais se soude difficilement; on l'appelle aussi acier à outils, car il sert à la fabrication d'une grande gamme d'outils divers. – Sa teneur élevée en carbone lui procure une grande dureté, mais le rend fragile. – L'assemblage de l'acier dur peut se faire par boulonnage, vissage ou rivetage. – On peut le souder avec des pièces dont le point de fusion est plus bas, par exemple en fondant de l'aluminium directement sur l'acier dur.



En règle générale, plus un acier est dur, moins il est ductile.

On ajoute souvent aux aciers doux et semi-durs quelques additifs (par exemple du silicium, mais en quantité inférieure à 0,06 %, ou du manganèse, en quantité inférieure à 1,2 %) qui servent à stabiliser la structure du métal et à augmenter sa soudabilité. Par ailleurs, on y retrouve quelquefois des résidus du processus de fonte (comme le soufre ou le phosphore), mais la quantité de ces éléments ne dépasse pas 0,06 %.

Structure et traitements des aciers

Les traitements thermiques de l'acier modifient la forme des composés fer-carbone à l'intérieur de sa structure et, par le fait même, ses propriétés.

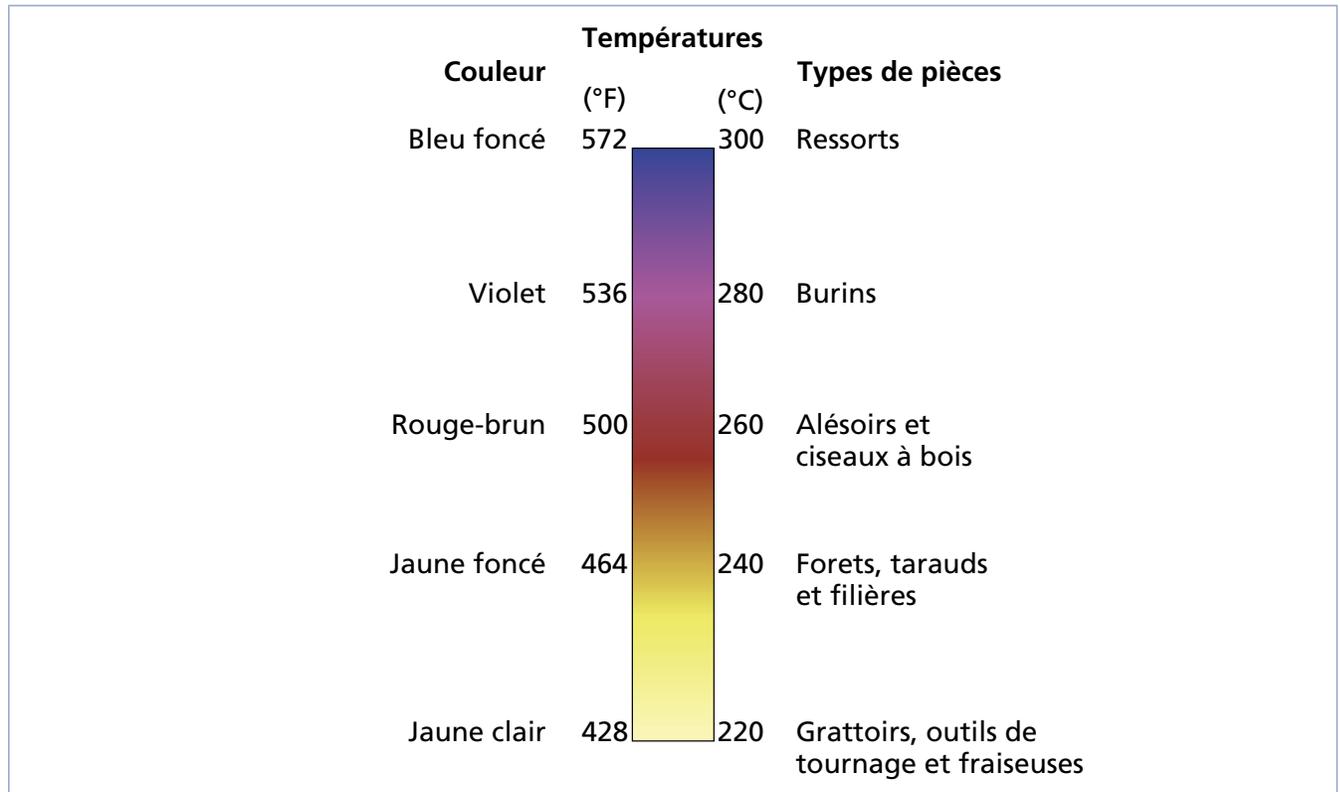
◆ Trempe

Les aciers peuvent être soumis à un traitement thermique, soit la trempe, qui augmente leur dureté. Lorsqu'on trempe un acier, on le chauffe à une température assez élevée pour changer sa structure interne. Une quantité supplémentaire de carbone est absorbée dans le métal, puis on le refroidit rapidement (généralement dans un bain de trempe constitué d'huile). C'est au moment du refroidissement que le durcissement se produit. Un refroidissement rapide amène l'acier à durcir.

◆ **Revenu**

Le revenu est un traitement thermique qui est souvent associé à la trempe. On l'utilise pour augmenter la résistance aux chocs de l'acier trempé, tout en conservant sa dureté. Le revenu s'effectue en chauffant la pièce à des températures plus basses. À mesure que le métal est chauffé, sa couleur varie et on peut déterminer la température de chauffe idéale simplement à partir de la couleur de l'acier (figure 1.9).

Figure 1.9 Variation de la couleur de l'acier en fonction de la température de revenu



◆ **Recuit**

Le recuit vise l'effet contraire de celui de la trempe. On chauffe l'acier à une température un peu moins élevée et on le refroidit lentement. Cela permet de retrouver la structure initiale. Le taux de refroidissement ne doit pas dépasser 50 °C/h et on doit prévoir au moins 24 heures pour refroidir la pièce.

◆ **Normalisation**

La normalisation vise à rendre la structure de l'acier plus homogène et est tout indiquée après un soudage ayant requis beaucoup de chaleur, et ce, dans le but d'éliminer les tensions internes. Pour normaliser une pièce, on la chauffe à 40 ou 50 °C au-dessus de sa température de transformation et on conserve cette température une heure pour chaque 25 mm d'épaisseur de la pièce. Ensuite, on la laisse simplement refroidir à l'air libre.

Aciers alliés

Les aciers alliés sont des aciers contenant des éléments d'alliage supplémentaires qui permettent d'obtenir des propriétés supérieures : augmenter leur dureté, leur résistance à la corrosion, leur élasticité, leur résistance à l'usure, ou encore obtenir une augmentation de leur température critique (il s'agit de la température à laquelle le métal subit une perte de ses propriétés).

On parle d'aciers fortement alliés si les éléments d'alliage comptent pour plus de 5 % de leur composition ; sinon, on les appelle aciers faiblement alliés.

Certains aciers alliés ont été élaborés spécifiquement afin d'augmenter leur soudabilité. Lors du processus de durcissement des aciers (la trempe), les aciers sont chauffés puis refroidis. Lorsque la pièce est mince, le refroidissement se produit également partout ; par contre, pour une pièce épaisse, le centre refroidit moins rapidement que la périphérie, ce qui crée des tensions internes. Des aciers alliés ont donc été développés pour remédier à ce problème.

La figure 1.10 présente les éléments d'alliage les plus fréquemment utilisés, leurs effets sur les aciers, de même que leur utilisation.

Figure 1.10 Éléments utilisés dans la fabrication des aciers alliés

Élément	Symbole chimique	Effets	Utilisation
Aluminium	Al	Sert de décapant pour éliminer les impuretés et améliorer la grosseur du grain ; limite le grossissement du grain.	Fabrication des aciers
Carbone	C	Augmente la dureté et la ténacité. Améliore l'aptitude à la trempe et la résistance à l'usure.	Aciers moulés à basse, moyenne ou haute teneur en carbone, aciers de construction
Chrome	Cr	Augmente la dureté et améliore la résistance à l'usure, sans fragilité. Augmente la ténacité et la résistance à la corrosion. Diminue la ductilité de l'acier.	Aciers inoxydables, outils, turbines, aciers de construction, pièces de machines, récipients sous pression
Cobalt	Co	Maintient la dureté du métal porté au rouge.	Fabrication de fourneaux et d'outils de coupe
Cuivre	Cu	Augmente la résistance à la corrosion atmosphérique ; abaisse la température critique. Réduit l'usinabilité par forgeage, mais n'influe pas sur le soudage réalisé à l'arc électrique ou par procédé oxyacétylénique lorsqu'il est présent dans une proportion supérieure à 0,15 %.	Profilés
Étain	Sn	Est utilisé comme revêtement et pour empêcher la corrosion.	Industrie de mise en conserve

Figure 1.10 Éléments utilisés dans la fabrication des aciers alliés (suite)

Élément	Symbole chimique	Effets	Utilisation
Manganèse	Mn	Affine la structure; augmente la ténacité et la ductilité. Améliore la qualité et le fini de surface, l'aptitude à la trempe, la résistance aux chocs et la résistance à l'usure.	Rails, essieux, barillets d'armes à feu
Molybdène	Mo	Durcit et augmente la ténacité des aciers.	Récipients sous pression, moulage pour applications sous pression, pièces de machines, outils
Nickel	Ni	Résiste aux effets de la chaleur et de la corrosion; améliore la résistance à la traction et la ductilité de l'acier.	Turbines, forgeage industriel pour charpentes à haute résistance, aciers inoxydables, récipients sous pression
Phosphore	P	Augmente la limite apparente d'élasticité et la trempabilité. Améliore les qualités d'usinage. Plus la proportion de phosphore augmente, moins l'alliage est résistant aux chocs.	Aciers faiblement alliés
Plomb	Pb	Améliore l'usinabilité lorsque ajouté à l'étain; est utilisé pour empêcher la corrosion.	Dans un milieu corrosif
Silicium	Si	Est utilisé pour améliorer la résistance à la traction. Agit comme désoxydant en général. Accroît la résistance à la dureté, mais moins que le manganèse.	Moulage de précision, aciers à aimants et pour équipement électrique
Soufre	S	Améliore l'usinabilité. Plus l'alliage contient de soufre, moins il est facile à souder.	Pièces usinées
Titane	Ti	Constitue un agent nettoyant. Préviend la précipitation du carbone dans les aciers inoxydables.	Aciers inoxydables, aciers faiblement alliés
Tungstène	W	Augmente la ténacité, la dureté ainsi que la résistance à l'usure à des températures élevées.	Aciers pour outils à coupe rapide, aimants
Vanadium	V	Procure de la ténacité et de la résistance à la traction. Résiste à l'adoucissement lors de la trempe. Retarde le grossissement du grain à la température critique.	Fabrication d'aciers, d'outils, de pièces de machines

Figure 1.10 Éléments utilisés dans la fabrication des aciers alliés (suite)

Élément	Symbole chimique	Effets	Utilisation
Zinc	Zn	Résiste à la corrosion.	Revêtement de l'acier (galvanisation)
Zirconium	Zr	Est utilisé comme désoxydant, élimine l'oxygène, l'azote et les inclusions d'éléments non métalliques lorsque l'acier est en fusion; structure à grain fin.	Tubes de charpente

Aciers inoxydables

On trouve différents types d'aciers inoxydables qui possèdent tous la caractéristique d'être très résistants à la corrosion. Ce sont des aciers fortement alliés dont les éléments d'alliage constituent plus de 35 % du contenu. On distingue généralement trois catégories d'aciers inoxydables: les aciers austénitiques, ferritiques et martensitiques (figure 1.11).

Figure 1.11 Composition et propriétés des aciers inoxydables

Type d'acier inoxydable	Composition des alliages	Propriétés
Austénitique	Chrome : 14 à 30 % Nickel : 6 à 36 %	<ul style="list-style-type: none"> - Ductile - Tenace - Très résistant à la corrosion - Non magnétique
Ferritique	Chrome : 11 à 27 % Carbone : 0,12 à 0,35 %	<ul style="list-style-type: none"> - Magnétique - Résistant - Ductile - Résistant à la corrosion et à l'oxydation (surtout lorsque le taux de carbone est un peu plus élevé)
Martensitique	Chrome : 4 à 18 % Carbone : pas plus de 0,15 % Autres éléments d'alliage : jusqu'à 3 %	<ul style="list-style-type: none"> - Très rigide et résistant - Magnétique - Fragile

Fontes

Les fontes (figure 1.12) sont des alliages de fer et de carbone, dont la quantité de carbone excède 2,11 %. Elles sont dures, mais fragiles, et sont plus faciles à mouler (par coulage) que l'acier, mais plus difficiles à souder. Le tableau de la figure 1.12 définit les différents types de fontes et leurs propriétés.

Figure 1.12 Propriétés et utilisations des différents types de fontes

Type de fonte	Propriétés	Utilisations
Fonte grise	<ul style="list-style-type: none"> – Économique, la plus répandue – Facilement usinable – Facile à couler – Bonne absorption des vibrations – Grande résistance à l'usure – Bonne conductivité thermique 	<ul style="list-style-type: none"> – Pièces coulées d'usage général – Bâtis pour machines-outils
Fonte blanche	<ul style="list-style-type: none"> – Très dure et fragile – Usinable – Résistante 	<ul style="list-style-type: none"> – Pièces d'usure (ex. : pointe, dents de godets) – Broyeurs – Fonderie d'art
Fonte malléable	<ul style="list-style-type: none"> – Usinable – Moins fragile que la fonte blanche 	<ul style="list-style-type: none"> – Engrenages – Joints de tuyauterie – Bâtis
Fonte nodulaire (ou ductile)	<ul style="list-style-type: none"> – Métal intermédiaire entre la fonte grise et l'acier – Bonne résistance aux chocs – Contient du magnésium. 	<ul style="list-style-type: none"> – Vilebrequins – Pistons – Bâtis
Fonte alliée	<ul style="list-style-type: none"> – Contient des éléments d'alliage comme le nickel, le chrome, le molybdène, le cuivre ou le manganèse (généralement plus de 3 %). – Bonne résistance mécanique – Bonne résistance à l'usure – Bonne résistance à la corrosion – Bonne résistance à la chaleur – Bonne capacité d'amortissement des vibrations 	<ul style="list-style-type: none"> – Industrie automobile (ex. : cylindres, pistons, carters, tambours) – Pièces exposées à l'action d'agents abrasifs



Exercice 1.2

1. Associez les caractéristiques de la colonne de gauche au métal correspondant de la colonne de droite. La même réponse peut convenir à plusieurs énoncés.

Figure 1.13

Caractéristiques		Métaux
a) Métal gris foncé, très ductile et malléable	<input type="checkbox"/>	1. Acier dur
b) Métal malléable résistant à la corrosion	<input type="checkbox"/>	2. Acier doux
c) Métal très commun, dont la teneur en carbone varie entre 0,06 et 0,2 %	<input type="checkbox"/>	3. Acier allié
d) Métal grandement utilisé dans la fabrication d'outils	<input type="checkbox"/>	4. Acier inoxydable
e) Métal malléable additionné d'éléments d'alliage lui conférant des propriétés particulières, sans en diminuer la soudabilité	<input type="checkbox"/>	
f) Métal dont la teneur en carbone varie entre 0,5 et 1,7 %	<input type="checkbox"/>	
g) Type particulier d'alliage contenant jusqu'à 30 % de chrome ou de nickel (ou les deux)	<input type="checkbox"/>	

2. Parmi les caractéristiques et les propriétés suivantes, lesquelles ne conviennent pas à l'acier doux ?

1. Grande dureté	4. Très utilisé
2. Bonne soudabilité	5. Teneur en carbone élevée
3. Malléabilité	6. Coûteux

- a) 1 et 3
- b) 1, 2 et 5
- c) 4 et 6
- d) 1, 5 et 6
- e) 1 à 6
3. Qu'arrive-t-il à un acier refroidi rapidement après un chauffage intense ?
- a) Il durcit.
- b) Il ramollit.
- c) Cela n'a aucun effet.

4. Associez chaque effet de la colonne de gauche au procédé correspondant de la colonne de droite. Un même procédé peut entraîner plusieurs effets.

Figure 1.14

Effets produits		Procédés
a) Réduit les tensions internes causées par la trempe.	<input type="checkbox"/>	1. Trempe
b) Rend l'acier plus mou et plus facile à usiner.	<input type="checkbox"/>	2. Revenu
c) Rend la structure de l'acier plus homogène.	<input type="checkbox"/>	3. Recuit
d) Diminue la fragilité d'une pièce tout en conservant sa dureté.	<input type="checkbox"/>	4. Normalisation
e) Accroît la dureté et la résistance d'une pièce grâce à un refroidissement rapide.	<input type="checkbox"/>	
f) Permet le détrempage d'une pièce.	<input type="checkbox"/>	

Métaux non ferreux

Les métaux non ferreux sont multiples, mais certains sont nettement plus utilisés que d'autres. En règle générale, les métaux non ferreux ne sont pas magnétiques (c'est-à-dire qu'ils ne sont pas attirés par un aimant) et ils résistent à la corrosion.

Aluminium

L'aluminium pur est très malléable et relativement mou (ex. : le papier d'aluminium). Il est généralement utilisé sous forme d'alliage avec d'autres métaux pour fabriquer divers objets (figure 1.15).

Figure 1.15 Exemples d'objets en alliages d'aluminium



Un alliage d'aluminium-magnésium est encore plus léger que l'aluminium pur. Il peut être forgé ou coulé, mais est plus rarement soumis à un traitement thermique. Lorsque l'aluminium est allié à du cuivre, du magnésium, du manganèse, du silicium et du fer, il forme le duralumin, lequel est répandu notamment dans l'industrie des transports. Cet alliage résiste bien à la corrosion et durcit à la température ambiante, tout en demeurant d'une grande légèreté. Quant aux alliages d'aluminium-zinc, ils sont très robustes et durcissent aussi par vieillissement. Enfin, les alliages d'aluminium-silicium sont faciles à couper et malléables. On peut y ajouter du magnésium pour augmenter leur résistance à la corrosion.

Magnésium

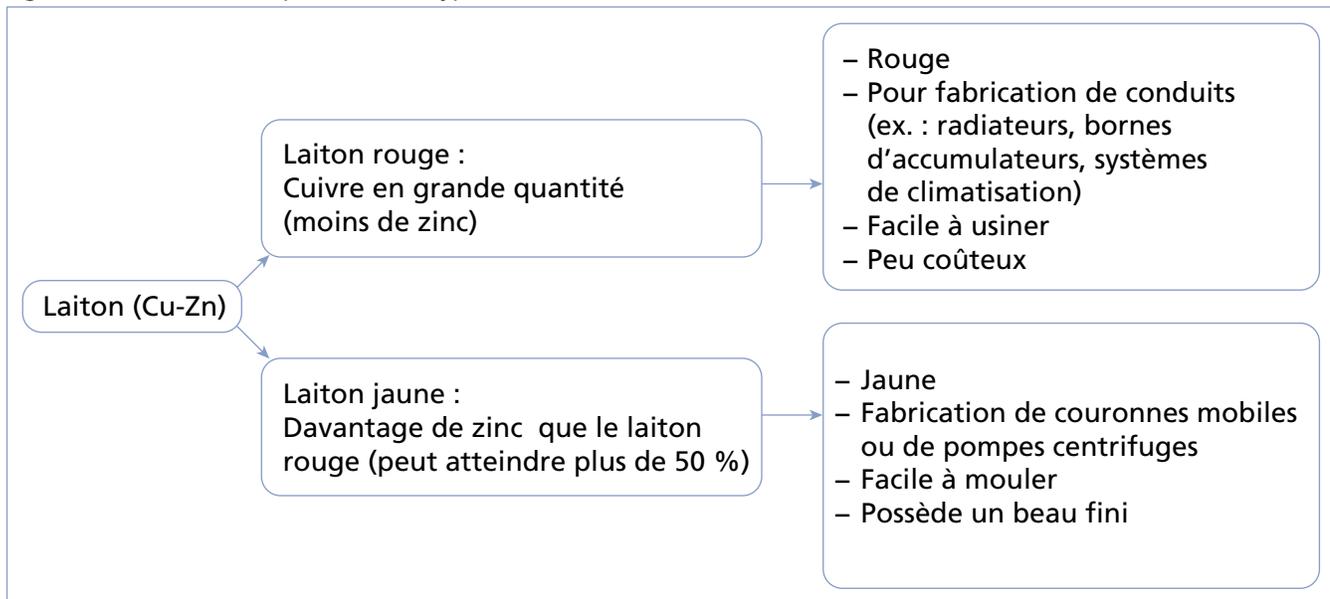
Le magnésium est un métal blanc argenté qui s'enflamme facilement. Les alliages de magnésium sont surtout utilisés dans l'industrie des transports (pièces d'avions ou d'automobiles). Ils sont particulièrement recherchés à cause de leur grande légèreté. Le magnésium peut servir de métal d'alliage à l'acier ou à l'aluminium.

Cuivre

Le cuivre est un métal rougeâtre très ductile et malléable, en plus d'être un excellent conducteur d'électricité. Il possède aussi une bonne résistance aux intempéries et de bonnes caractéristiques mécaniques. Il ternit et se couvre de vert-de-gris. On l'utilise beaucoup dans la fabrication de fils électriques ou en tuyauterie.

Le laiton, quant à lui, est un alliage de cuivre et de zinc. Chaque type de laiton présente des caractéristiques particulières (figure 1.16).

Figure 1.16 Caractéristiques de deux types de laiton



Quant au bronze, c'était originellement un alliage de cuivre-étain. Aujourd'hui, ce terme désigne à peu près tous les alliages de cuivre qui ne sont pas du laiton. On les identifie en fonction de l'élément d'alliage principal. Les principaux métaux d'alliage du bronze sont l'étain (équipements marins, corps de pompes), l'aluminium (engrenages, outils, éléments

de fixation), le nickel (tubes, paliers, corps de valves), le silicium (réservoirs, tuyauterie, engrenages) et le béryllium (ressorts, matrices, filières).

Nickel

Le nickel est un métal blanc grisâtre que l'on trouve le plus souvent comme élément d'alliage. Il est malléable et ductile. Dans un alliage, il augmente la ductilité, la dureté et la résistance des métaux. Les alliages de nickel sont utilisés pour la production de pièces devant supporter des températures élevées (ex. : résistances électriques, évaporateurs et échangeurs, etc.). L'inconel est un alliage de nickel-chrome-fer, tandis que le monel est un alliage de nickel-cuivre; d'autres éléments d'alliage peuvent aussi être présents dans l'un ou l'autre.

Titane

Le titane est un métal blanc brillant que l'on trouve généralement allié à de faibles quantités d'éléments comme l'oxygène, l'azote, le carbone ou l'acier (titane presque pur dont les éléments d'alliage ne dépassent pas 1,5 %).

Les alliages alpha contiennent jusqu'à 7 % d'aluminium et moins de 3 % d'oxygène, d'azote et de carbone; les alliages alpha-bêta sont additionnés, outre l'aluminium, d'éléments supplémentaires tels le chrome, le vanadium ou le molybdène.

Enfin, le titane est utilisé dans l'industrie aérospatiale, chimique ou dans la fabrication d'équipement sportif.



Exercice 1.3

1. Associez chaque définition de la colonne de gauche au métal correspondant de la colonne de droite. Le même métal peut convenir à plusieurs énoncés.

Figure 1.17

Définitions	Métaux
a) Métal rouge-brun, ductile et malléable	<input type="checkbox"/> 1. Aluminium
b) Métal blanc argent pouvant s'enflammer	<input type="checkbox"/> 2. Cuivre
c) Alliage fait de cuivre et de zinc	<input type="checkbox"/> 3. Magnésium
d) Métal commun à tous les bronzes	<input type="checkbox"/> 4. Laiton
e) Métal léger, bon conducteur, résistant à la corrosion et plutôt économique	<input type="checkbox"/> 5. Nickel
f) Métal très bon conducteur d'électricité se couvrant de vert-de-gris sous l'effet de l'humidité	<input type="checkbox"/>
g) Métal blanc-gris utilisé comme élément d'alliage pour augmenter la dureté et la résistance des métaux	<input type="checkbox"/>

2. Parmi les propriétés suivantes, lesquelles ne caractérisent pas l'aluminium ?

1. Léger	4. Conductible
2. Rouille facilement.	5. Robuste
3. Difficile à usiner	6. Malléable

- a) 3 et 6
- b) 2, 3, 4 et 6
- c) 2 et 3
- d) 1, 2 et 4
- e) 1, 5 et 6
- f) 1 à 6

3. Associez chaque alliage au métal qui le compose principalement. Un même métal peut convenir à plusieurs alliages.

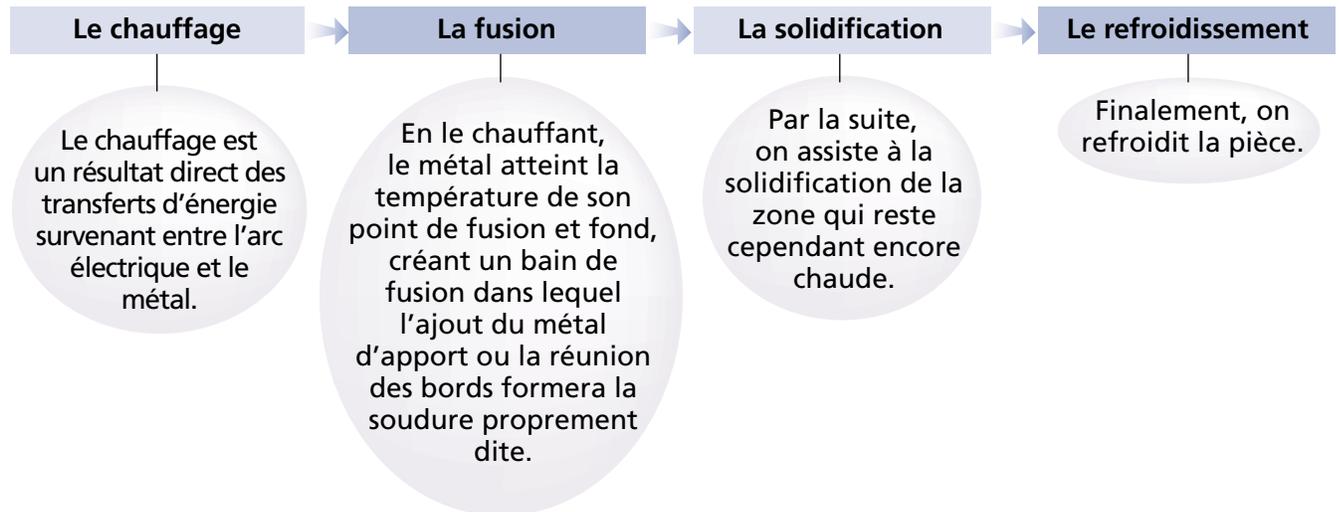
Figure 1.18

Alliages		Métaux
a) Inconel	<input type="checkbox"/>	1. Aluminium
b) Duralumin	<input type="checkbox"/>	2. Cuivre
c) Bronze	<input type="checkbox"/>	3. Nickel
d) Monel	<input type="checkbox"/>	
e) Laiton	<input type="checkbox"/>	

Soudabilité des métaux

La plupart des procédés de soudage entraînent le réchauffement, puis le refroidissement du métal. Ces variations de température ont un impact sur la structure du métal dans la zone soudée. La zone périphérique au bain de fusion, également touchée par cet accroissement de la température, est appelée « zone thermiquement atteinte » ou ZTA.

On peut distinguer quatre étapes importantes lors de l'application d'un procédé de soudage à l'arc :



Facteurs de détermination des effets des opérations de soudage

On compte quatre principaux facteurs qui déterminent les effets des opérations de soudage et qui entrent en considération dans le choix d'un procédé :

- Quantité de chaleur transférée
- Température initiale de la pièce
- Vitesse de refroidissement du métal
- Température atteinte dans la ZTA

Quantité de chaleur transférée

La quantité de chaleur transférée dépend essentiellement du procédé de soudage utilisé (figure 1.19).

Figure 1.19 Coefficients de transmission thermique des procédés de soudage

Procédé de soudage	Coefficients de transmission de la chaleur dans la pièce (%)
Soudage à l'arc submergé (SAW)	90 à 99
Soudage à l'arc sous protection gazeuse avec fil plein (GMAW)	65 à 85
Soudage à l'arc avec fil fourré de flux (FCAW)	65 à 85
Soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW)	50 à 85
Soudage à l'arc sous protection gazeuse avec électrode réfractaire de tungstène (GTAW)	20 à 50

Données provenant du Bureau canadien du soudage

Température initiale de la pièce

La température initiale détermine la vitesse de refroidissement de la pièce et l'humidité qu'elle contient. Un préchauffage approprié permet de diminuer la vitesse de refroidissement et d'assécher les pièces, ce qui atténue les risques d'absorption d'hydrogène.

Vitesse de refroidissement du métal

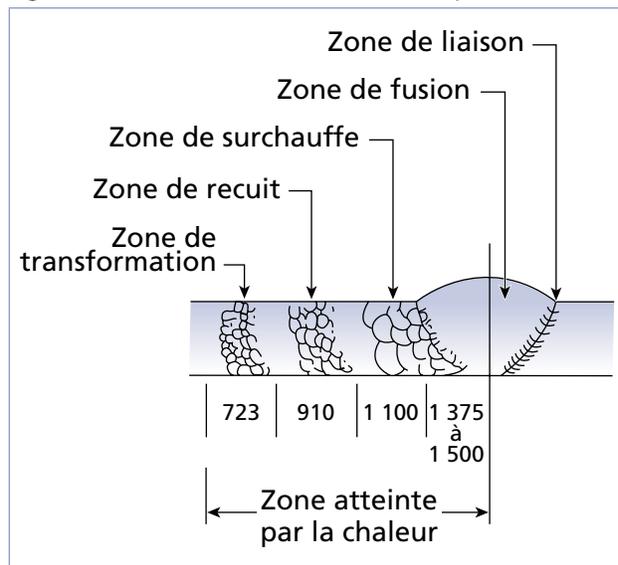
La vitesse de refroidissement dépend de la différence de température entre la pièce et le milieu de refroidissement; plus l'écart est élevé, plus le refroidissement sera rapide. Plus les zones de contact entre le cordon de soudure et le milieu de refroidissement sont étendues, plus le refroidissement sera rapide.

Température atteinte dans la ZTA

La température atteinte dans la ZTA modifie la structure finale du métal dans cette zone. La figure 1.20 illustre l'influence de la température atteinte dans la ZTA dans le cas de l'acier. On remarque que la grosseur des grains est proportionnelle à la chaleur atteinte dans la ZTA.

La conductivité thermique du métal détermine la vitesse à laquelle le métal transfère la chaleur depuis la ZTA, donc la taille des zones atteintes par la chaleur. L'épaisseur des pièces et l'énergie linéaire sont deux facteurs qui influent sur la vitesse de refroidissement et la taille de la ZTA.

Figure 1.20 Différentes zones atteintes par la chaleur



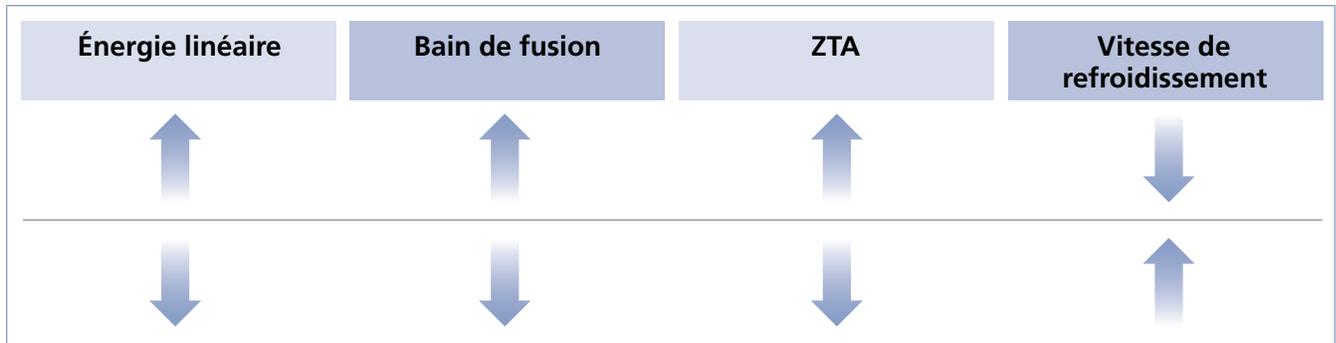
Énergie linéaire

L'énergie linéaire (E_l) correspond à l'énergie transférée au métal de base par unité de longueur de soudure. Elle dépend de la vitesse d'avance (v), de même que de la tension (V) et de l'intensité de courant (I) utilisées : $E_l = \frac{L \times V}{v}$

L'énergie linéaire s'exprime en joules/millimètre (J/mm) lorsque le courant est exprimé en ampères (A), la tension en volts (V) et la vitesse en millimètres/seconde (mm/s).

Plus l'énergie linéaire est élevée, plus la ZTA sera grande et plus la vitesse de refroidissement sera lente (figure 1.21). Par contre, l'épaisseur des pièces provoque l'effet inverse : plus elle est grande, plus la pièce refroidira rapidement et plus la ZTA sera petite.

Figure 1.21 Effets de l'énergie linéaire



Coefficient de dilatation

Les taux de dilatation et de contraction (retrait) de chaque métal ainsi que sa ductilité permettent de prévoir comment le métal réagira lors du soudage. Le coefficient de dilatation représente la valeur de l'augmentation de volume d'un métal sous l'effet de la chaleur en exprimant la valeur de la déformation linéaire. Le tableau de la figure 1.22 présente la valeur des coefficients de différents métaux pour chaque degré Celsius d'augmentation de la chaleur. L'unité de mesure de la dilatation est le micron (μ), lequel est égal à un millionième de mètre ou encore, un millième de millimètre ($1 \mu = 0,001 \text{ mm}$). Les valeurs de dilatation sont valides pour chaque mètre linéaire de métal.

Lorsqu'on connaît la température initiale et la température finale d'un métal, on peut ainsi calculer l'ampleur de sa dilatation (ou de sa contraction, s'il refroidit).

Par exemple, comparons la dilatation d'une barre d'acier à celle d'une barre d'aluminium, d'un mètre chacune, lorsqu'on les chauffe à $400 \text{ }^\circ\text{C}$ à partir d'une température initiale de $20 \text{ }^\circ\text{C}$, soit une augmentation de température de $380 \text{ }^\circ\text{C}$ (figure 1.23).

Pour chaque degré, la barre d'acier se dilate de $12 \mu/\text{m}$ (soit $0,012 \text{ mm/m}$); par mètre, la variation totale sera donc de :

$$380 \text{ }^\circ\text{C} \times 0,012 \text{ mm}/^\circ\text{C} = 4,56 \text{ mm}$$

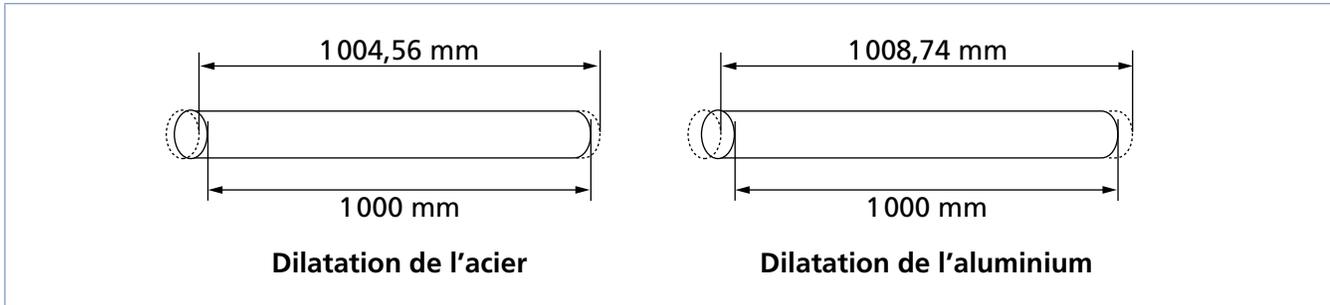
Par contre, la barre d'aluminium se dilate de $23 \mu/\text{m}$ (ou $0,023 \text{ mm/m}$); la variation par mètre sera plutôt de :

$$380 \text{ }^\circ\text{C} \times 0,023 \text{ mm}/^\circ\text{C} = 8,74 \text{ mm}, \text{ ce qui correspond à près de deux fois la valeur de dilatation de l'acier.}$$

Figure 1.22 Coefficients de dilatation linéaire

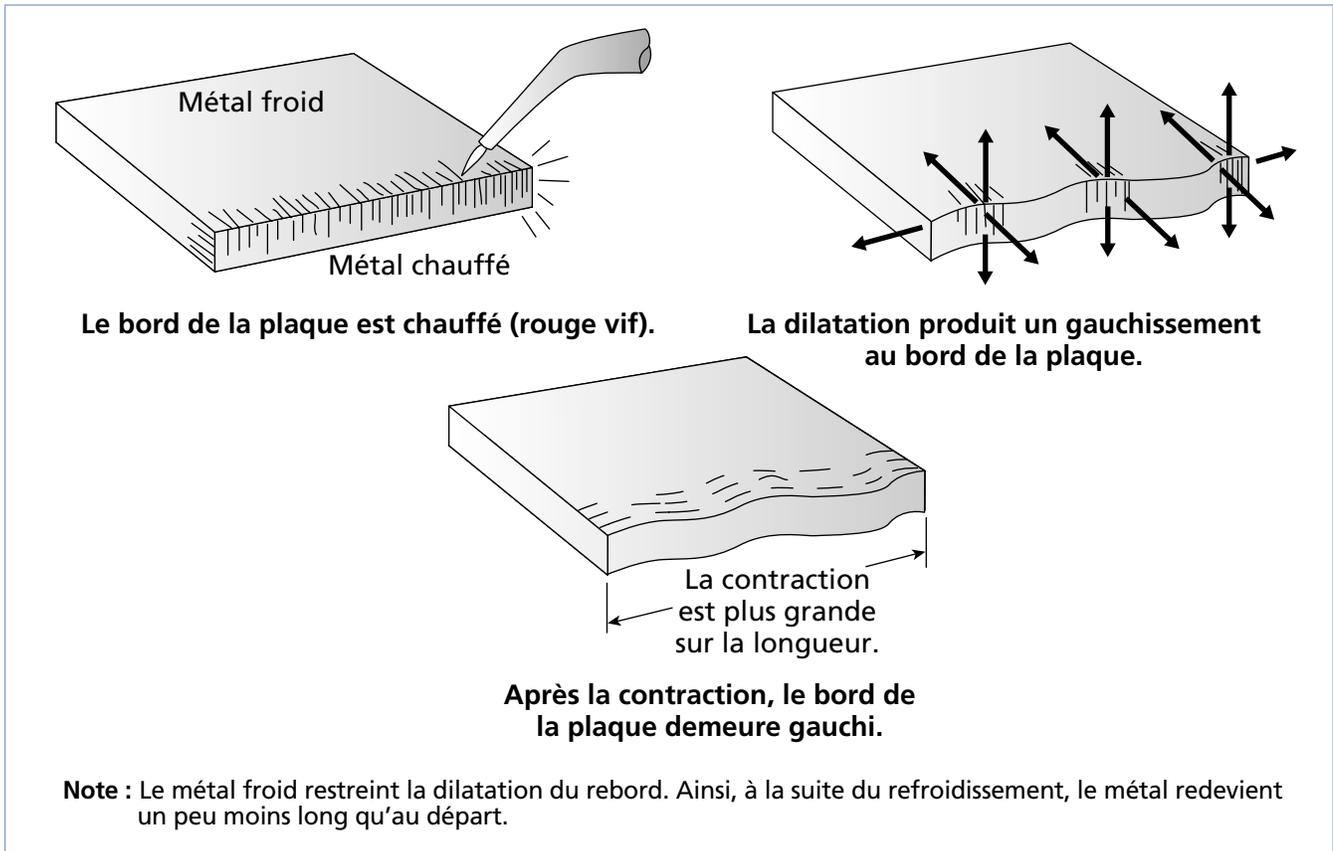
Métal	Coefficients de dilatation en microns (μ)
Acier	12
Aluminium	23
Argent	19
Bronze	18
Cuivre	17
Étain	23
Fer	12
Fonte	11
Laiton	19
Magnésium	23
Or	15
Plomb	29
Tungstène	4
Zinc	30

Figure 1.23 Dilatation de l'acier et de l'aluminium



En soudage, on ajoute généralement un métal d'apport à la pièce soudée, ce qui provoque un retrait (contraction) généralement plus grand que la dilatation qui a eu lieu avant l'ajout du métal d'apport. Par ailleurs, comme la pièce doit être maintenue en place, elle subit des contraintes dans l'espace et ne se dilate généralement pas dans tous les sens de manière égale (figure 1.24). Tous ces facteurs peuvent être à l'origine de déformations dans la pièce soudée. Ces déformations et les moyens de les prévenir seront traités plus en détail au chapitre 6.

Figure 1.24 Refoulement

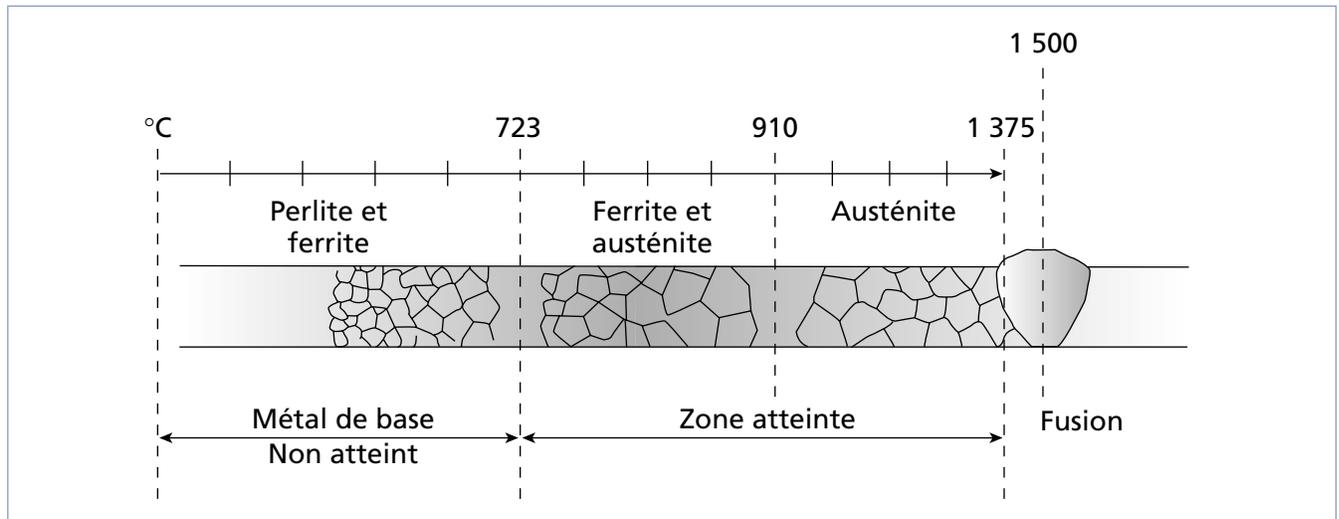


Soudabilité des aciers au carbone et faiblement alliés

La soudabilité des aciers dépend de la structure interne du métal dans la ZTA après le soudage. Afin de préserver les qualités du métal à souder, notamment en ce qui concerne la ductilité, le métal soudé doit retrouver une structure interne similaire à son état initial.

La figure 1.25 illustre l'effet de la température sur les grains de l'acier. Remarquez la zone où on trouve de l'austénite; c'est dans cette zone que, dans le cas où le refroidissement est trop rapide, le métal se solidifie en martensite plutôt qu'en ferrite et en perlite, ce qui crée des tensions internes.

Figure 1.25 Influence de la température sur les grains



Les principaux facteurs qui influent sur la soudabilité du carbone sont les suivants :

- **Trepabilité** : c'est le facteur principal. Il détermine le comportement des aciers lors du refroidissement rapide. Plus l'acier a tendance à adopter une structure martensitique, plus sa fragilité augmente et cela accroît d'autant les risques de fissures.
- **Carbone équivalent** : le carbone équivalent est une mesure qui détermine assez bien la trepabilité de l'acier, car plus la teneur en carbone est élevée, plus l'acier est susceptible de subir la tremp. La soudabilité d'un acier est donc dépendante de son carbone équivalent (figure 1.26).

Figure 1.26 Influence du carbone équivalent sur la soudabilité de l'acier

Carbone équivalent	Indice de soudabilité	Préchauffage
< 0,40	Excellent	Aucun
0,40 à 0,50	Bon	Aucun De 100 à 300 °C
0,50 à 0,60	Moyen	De 100 à 300 °C De 200 à 400 °C
0,60 à 0,70	Médiocre	De 300 à 400 °C
> 0,70	Mauvais	Non soudable

Les métaux suivants entrent dans le calcul du carbone équivalent : le carbone bien sûr (C), le manganèse (Mn), le silicium (Si), le chrome (Cr), le molybdène (Mo), le vanadium (V), le nickel (Ni) et le cuivre (Cu). La formule à utiliser est la suivante :

$$\text{Carbone équivalent} = C + \frac{\text{Mn} + \text{Si} + \text{Cr}}{6} + \frac{\text{Mo} + \text{V}}{5} + \frac{\text{Ni} + \text{Cu}}{15}$$

Dans cette formule, le symbole de l'élément indique son pourcentage de masse dans l'alliage (par exemple, si on a 0,5 % de carbone et 0,03 % de manganèse, alors C = 0,5 et Mn = 0,03).



Plus la teneur en carbone est élevée, plus les aciers sont difficiles à souder.

Soudabilité des aciers inoxydables

Les propriétés physiques qui influent sur la soudabilité de ces aciers, comparativement aux aciers au carbone, sont les suivantes :

- Un point de fusion inférieur : la température nécessaire pour obtenir la fusion du métal est moins élevée ; par conséquent, l'énergie nécessaire pour le soudage sera moindre.
- Une conductibilité thermique plus faible : ce facteur accroît encore l'importance de prévoir une moins grande énergie pour le soudage, car une conductibilité thermique élevée indique que la chaleur sera plus dispersée dans le métal et qu'il y aura des pertes.
- Une résistance électrique plus élevée : plus la résistance électrique est élevée, plus le bain de fusion est facile à créer ; par contre, l'amorçage de l'arc est plus difficile.
- En fait, pour toutes ces raisons, la taille de la ZTA d'un acier inoxydable sera d'environ 50 % plus grande que celle d'un acier au carbone, dans les mêmes conditions.

Il existe plusieurs types d'aciers inoxydables possédant des niveaux de soudabilité différents (figure 1.27).

Figure 1.27 Facteurs influant sur la soudabilité de différents types d'aciers inoxydables

Type d'acier inoxydable	Facteurs influant sur la soudabilité
Austénitique	<ul style="list-style-type: none"> – Coefficient de dilatation supérieur (environ 1,5 fois celui de l'acier au carbone), donc sensible aux déformations – Conductibilité thermique plus faible que celle de l'acier doux, donc une ZTA moins grande pour un même courant – Résistance électrique jusqu'à 6 fois plus élevée que celle de l'acier doux – Point de fusion inférieur à celui de l'acier doux, donc température nécessaire moindre
Martensitique	<ul style="list-style-type: none"> – Coefficient de dilatation inférieur (minimise les déformations lors du soudage) – Conductibilité thermique plus faible que celle de l'acier doux (intensité de courant plus basse) – Résistance électrique de 3 à 6 fois plus élevée que celle des aciers au carbone – Forte tendance à durcir au contact de l'air
Ferritique	<ul style="list-style-type: none"> – Aucun durcissement, même lorsque refroidi rapidement – Le grain grossit si la pièce est chauffée à plus de 870 °C, puis refroidie lentement, ce qui rend la pièce fragile.

Soudabilité des fontes

Les fontes blanches ne se soudent pratiquement pas. Les autres fontes (grises, malléables et nodulaires) peuvent être soudées sous certaines conditions. Ce sont les fontes nodulaires, plus ductiles, qui sont les plus faciles à souder. On ne soude généralement pas de fontes dans l'industrie de la fabrication, sauf dans le cas de certaines opérations de réparation.

Soudabilité des métaux non ferreux

Le tableau de la figure 1.28 rappelle les principaux facteurs influant sur la soudabilité des métaux non ferreux.

Figure 1.28 Facteurs influant sur la soudabilité de certains métaux non ferreux

Métal	Facteurs influant sur la soudabilité
Aluminium	<ul style="list-style-type: none"> – Un coefficient de dilatation élevé, ce qui accroît les risques de déformation du métal lors du refroidissement. – Un point de fusion bas : le bain de fusion est rapidement créé et il est très fluide. – Conductibilité thermique élevée : il y a beaucoup de pertes de chaleur dans le métal, donc la température de soudage doit être plus élevée. – Il y a formation d'oxyde à la surface très dure dont le point de fusion est supérieur à celui de l'aluminium.
Nickel	<ul style="list-style-type: none"> – Il se soude bien même sans préchauffage. – Le métal doit être bien nettoyé pour éliminer la présence d'oxyde sur sa surface. – La pénétration dans le nickel est généralement inférieure à celle de l'acier.
Cuivre	<ul style="list-style-type: none"> – Une conductivité thermique élevée, jusqu'à 50 % plus grande que celle de l'acier (à l'exception de certains alliages de cuivre-nickel). – Un coefficient de dilatation élevé. – Un point de fusion relativement bas et un bain de fusion très fluide. – La composition de chaque alliage peut modifier ses caractéristiques. – La soudabilité du laiton dépend en grande partie de sa teneur en zinc puisque celui-ci se volatilise lors du soudage. Cela peut causer des défauts; les laitons à faible teneur en zinc ont une plus grande soudabilité.
Titane	<ul style="list-style-type: none"> – Presque pur, il possède une excellente soudabilité. – Les alliages alpha se soudent facilement. Ils peuvent être recuits, mais ne peuvent pas être durcis par traitement thermique. – La soudabilité des alliages alpha-bêta varie en fonction des éléments d'alliage qu'ils contiennent ; une grande quantité de chrome, par exemple, diminue beaucoup la soudabilité du métal.



Exercice 1.4

1. Placez dans l'ordre les quatre principales étapes du soudage.

- a) La fusion
- b) La solidification
- c) Le refroidissement
- d) Le chauffage

Ordre :

2. Parmi les éléments suivants, lequel ne constitue pas l'un des quatre principaux facteurs influant sur les opérations de soudage ?

- a) La quantité de chaleur transférée
- b) La température initiale de la pièce
- c) La vitesse de refroidissement
- d) La température de l'air
- e) La température atteinte dans la ZTA

3. Vrai ou faux ?

	Vrai	Faux
a) Plus l'énergie linéaire est élevée, plus le bain de fusion est important.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
b) L'étendue de la ZTA augmente lorsque l'énergie linéaire augmente.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
c) La vitesse de refroidissement est plus lente lorsque l'énergie linéaire est basse.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
d) Plus la vitesse de refroidissement est rapide, plus la dureté des métaux diminue.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
e) Le coefficient de dilatation du laiton est plus élevé que celui du cuivre; par conséquent, lorsqu'il est chauffé, le laiton a moins tendance à changer de dimension que le cuivre.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

4. Quel(s) facteur(s) influe(nt) principalement sur la soudabilité des aciers au carbone et faiblement alliés ?

- | | |
|--------------------------|------------------------------|
| 1. Le carbone équivalent | 4. La propreté de la surface |
| 2. L'épaisseur | 5. La trempabilité |
| 3. La couleur | 6. La coupe |

- a) 1 et 3
- b) 2, 3 et 5
- c) 1, 4 et 6
- d) 2, 5 et 6

- e) 1 et 5
- f) 3 et 4
- g) 5
- h) 1 à 6

5. Quelles propriétés physiques influent sur la soudabilité des aciers inoxydables comparativement aux aciers au carbone ?

- | | |
|-----------------------------------|-------------------------------|
| 1. Leur point de fusion | 4. Leur malléabilité |
| 2. Leur conductibilité thermique | 5. Leur résistance électrique |
| 3. Leur résistance à la corrosion | |

- a) 1, 2 et 5
- b) 1, 2 et 3
- c) 1 et 4
- d) 2, 3 et 5
- e) 2 et 5
- f) 1 et 5

6. Vrai ou faux ?

- | | Vrai | Faux |
|--|--------------------------|--------------------------|
| a) Le point de fusion des aciers inoxydables est plus bas que celui des aciers au carbone. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| b) La résistance à la corrosion des aciers inoxydables est identique à celle des aciers au carbone. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| c) La conductibilité électrique des aciers inoxydables est meilleure que celle des aciers au carbone. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| d) La conductibilité thermique des aciers inoxydables est plus faible que celle des aciers au carbone. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

7. Quel type de fonte se soude le plus facilement ?

- a) La fonte grise
- b) La fonte blanche
- c) La fonte nodulaire

8. Laquelle de ces caractéristiques ne constitue pas un facteur influant sur la soudabilité de l'aluminium ?

- a) Son coefficient de dilatation
- b) Sa malléabilité
- c) Sa conductibilité thermique
- d) La présence d'oxyde à la surface du métal

9. Laquelle de ces caractéristiques ne constitue pas un facteur influant sur la soudabilité du cuivre ?

- a) Sa conductivité électrique
- b) Son coefficient de dilatation
- c) Son point de fusion
- d) Sa dureté

Résumé

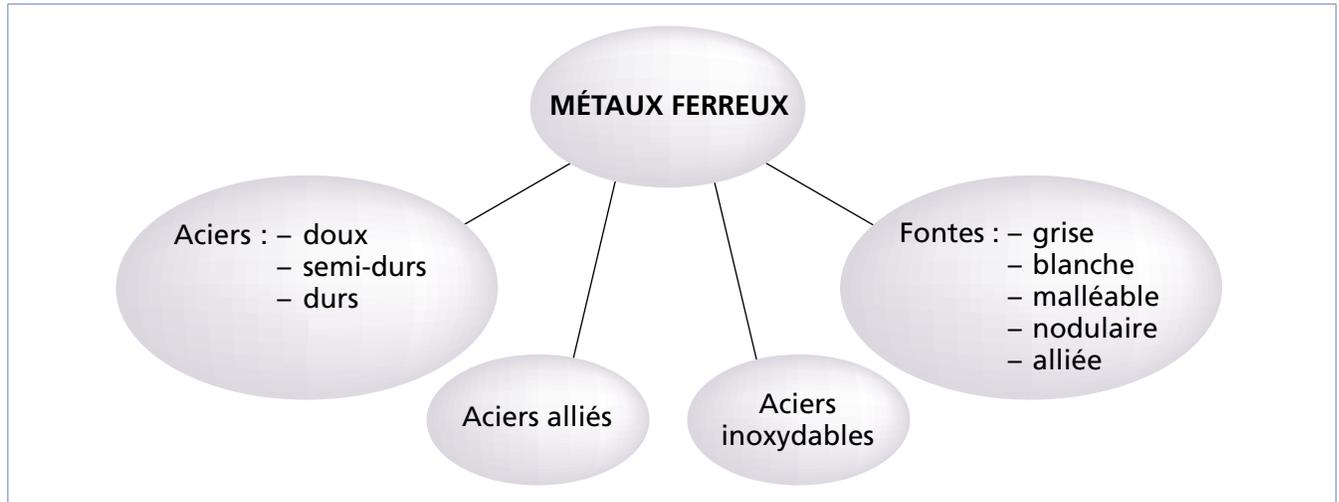
– Le tableau suivant (figure 1.29) résume les différentes propriétés des métaux.

Figure 1.29 Propriétés des métaux

Propriété	Description	Exemples de matériaux
Fragilité	Absence de flexibilité, cassant	Fonte
Ductilité	Tolérance aux déformations (s'allonge, s'étire, se tord) sans rupture	Aluminium, acier doux, cuivre
Ténacité	Résistance aux chocs	Acier
Malléabilité	Mise en forme facile, s'aplatit	Aluminium, acier doux, cuivre
Élasticité	Reprise de sa forme initiale après une déformation	Acier
Dureté	Résistance à la pénétration, aux rayures	Acier dur, fonte
Résistance à l'abrasion	Résistance à l'usure par frottement	Acier allié
Résistance à la corrosion	Résistance à la dégradation chimique causée par l'oxygène	Acier inoxydable, aluminium
Magnétisme	Sensibilité à l'attraction des aimants	Fer, acier
Dilatation/contraction (retrait) thermique	Allongement ou rétrécissement du matériau en fonction de la température	Tous les métaux
Point de fusion	Température à laquelle le métal passe à l'état liquide	Tous les métaux
Conductivité thermique	Capacité de conduire ou de transmettre la chaleur	Aluminium, cuivre
Conductivité électrique	Capacité de conduire l'électricité	Cuivre

- La figure 1.30 présente les quatre catégories de métaux ferreux.

Figure 1.30 Métaux ferreux



- L'acier, et particulièrement l'acier doux, constitue le matériau le plus souvent soudé. Les aciers durs se soudent moins bien. On peut, par contre, les assembler de façon mécanique.
- On obtient des aciers durs en leur faisant subir un traitement thermique, soit la trempe, qui provoque le durcissement du métal tout en augmentant sa fragilité. Il est aussi possible de tremper des aciers doux en surface seulement.
- On utilise surtout les aciers alliés afin d'obtenir un métal qui combine les propriétés de ductilité d'un acier à faible teneur en carbone avec la dureté d'un acier à teneur plus élevée. Par contre, les propriétés particulières des aciers alliés varient en fonction des éléments d'alliage qu'ils contiennent.
- L'acier inoxydable est utilisé principalement pour sa propriété de résistance à la corrosion.
- Les fontes sont surtout utilisées pour être coulées; on les soude rarement.
- Les métaux non ferreux ont, en général, une bonne résistance à la corrosion. Certains, comme l'aluminium ou le magnésium, sont aussi très légers. On utilise le plus souvent les métaux non ferreux sous forme d'alliages. Plusieurs d'entre eux possèdent aussi une bonne conductivité électrique et thermique.
- Les principaux métaux non ferreux et leurs propriétés apparaissent à la figure 1.31.

Figure 1.31 Caractéristiques des métaux non ferreux

Métal	Couleur	Densité	Point de fusion (°C)	Principales propriétés
Aluminium (Al)	Blanc brillant	2,7	660	<ul style="list-style-type: none"> – Léger – Ductile – Malléable – Bon conducteur – Forme une couche d'oxyde d'aluminium.
Étain (Sn)	Blanc	7,3	232	<ul style="list-style-type: none"> – Malléable – Ductile – Très mou – Faible résistance mécanique – N'est pas touché par l'eau ou l'air.
Plomb (Pb)	Gris bleuâtre	11,3	327	<ul style="list-style-type: none"> – Malléable – Ductile – Mou – Résistant à la corrosion – Mauvais conducteur
Zinc (Zn)	Blanc bleuâtre	7,2	419	<ul style="list-style-type: none"> – Cassant (à la température ambiante) – Malléable (200 °C) – Résistant à la corrosion
Magnésium (Mg)	Blanc argenté	1,7	650	<ul style="list-style-type: none"> – Malléable – Ductile – Résistant à la corrosion – Inflammable – Faible résistance mécanique
Argent (Ag)	Blanc brillant	10,5	950	<ul style="list-style-type: none"> – Malléable – Ductile – Très bon conducteur
Cuivre (Cu)	Rouge-brun	8,9	1083	<ul style="list-style-type: none"> – Malléable – Ductile – Conducteur – Forme une couche de vert-de-gris lorsqu'il est exposé à l'humidité.
Manganèse (Mn)	Grisâtre	7,4	1245	<ul style="list-style-type: none"> – Cassant – Très dur – Résistant – S'oxyde facilement.
Nickel (Ni)	Blanc grisâtre	8,9	1455	<ul style="list-style-type: none"> – Malléable – Ductile – Résistant à la corrosion
Titane (Ti)	Blanc brillant	5,0	1660	<ul style="list-style-type: none"> – Résistant à la corrosion – Charge à la rupture élevée – Bonnes propriétés mécaniques à haute température

- Les principaux facteurs influant sur la soudabilité d'un métal sont :
 - la quantité de chaleur transférée au métal de base (selon le procédé de soudage utilisé);
 - la température atteinte dans la ZTA qui dépend, entre autres, de la conductivité thermique du métal et du procédé de soudage;
 - la température initiale de la pièce qui influe, notamment, sur sa vitesse de refroidissement;
 - la vitesse de refroidissement du métal, laquelle détermine la possibilité de modifications structurelles du métal pouvant altérer ses propriétés de base.
- L'épaisseur des pièces et l'énergie linéaire du procédé de soudage influent sur la vitesse de refroidissement et la taille de la ZTA.
- La soudabilité des aciers au carbone et faiblement alliés dépend fortement de leur teneur en carbone (ou carbone équivalent), de même que de leur trempabilité. Une teneur élevée en carbone équivalent de même qu'une tendance élevée à la trempe rendent le soudage difficile.
- Les aciers inoxydables requièrent une intensité de courant plus faible que les aciers au carbone pour être soudés. Leur point de fusion est plus bas, leur conductivité thermique plus faible et leur résistance électrique plus élevée que celle des aciers non alliés.
- Les fontes sont vulnérables aux déformations lorsque soudées, notamment à cause de leur fragilité.
- L'aluminium a un point de fusion assez bas et un bain de fusion très fluide. Par ailleurs, on trouve souvent des dépôts d'oxyde à sa surface. Ces éléments doivent être pris en considération lors du soudage de l'aluminium, afin d'éviter les déformations.
- Le cuivre et ses alliages présentent généralement une forte conductivité thermique et électrique. Il est important de les préchauffer.

