

# LA MÉTALLURGIE ET LA METALLURGIE DU SOUDAGE

## PRINCIPES FONDAMENTAUX ET NOTIONS

Cet article a pour but de rappeler le rôle de la métallurgie ainsi que sa particularité en soudage. Nous développerons également, sommairement, les premières notions de métallurgie générales qui permettent de comprendre le fonctionnement métallurgique d'un métal de base (le métal qui va être soudé).

Enfin, nous concluons par un résumé des notions métallurgiques apportées.

Par Laurent Carbonell (Institut de Soudure - France)

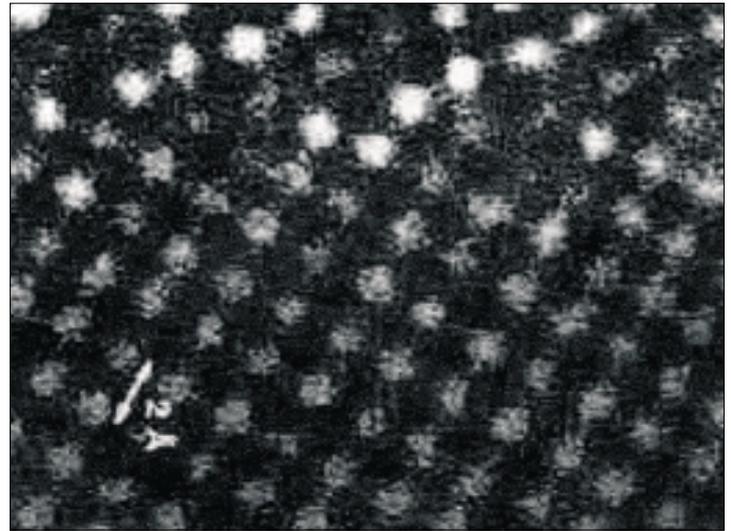


Figure 1: Structure d'un alliage métallique (vu au microscope électronique)

### RÔLE DE LA MÉTALLURGIE ET DE LA MÉTALLURGIE DU SOUDAGE

#### • RÔLE DE LA MÉTALLURGIE

En amont de toute fabrication, le concepteur fait le choix du matériau potentiellement le plus apte à supporter les conditions de service auxquelles sera soumis le produit fabriqué.

En pratique, ce sont principalement les propriétés mécaniques des matériaux, qui guident les concepteurs dans ce choix. Par exemple, on choisira un alliage de haute résistance à la traction pour fabriquer une charpente métallique soumise à des efforts de traction élevés, ou un acier résistant au choc, pour fabriquer un essieu de camion. Or, les propriétés d'un matériau

dépendent de sa structure métallurgique (arrangement interne de la matière).

Aussi, le rôle principal de la métallurgie est-il de comprendre le fonctionnement métallurgique d'un matériau, ou encore, plus simplement dit, de savoir comment 'façonner, ou faire évoluer' sa structure métallurgique, afin de maîtriser ses propriétés.

#### • QU'EST CE QUI PEUT FAIRE VARIER LA STRUCTURE DES MATÉRIAUX?

La structure métallurgique (donc les propriétés) des matériaux évolue principalement avec:

- la composition chimique (nature et quantité des éléments présents dans le matériau);
- le traitement thermique (voire thermo-mécanique) que le matériau reçoit lors de sa fabrication; c'est à dire de la façon précise avec laquelle il est

chauffé puis refroidi au cours de sa mise en forme, ou après (citons par exemple le traitement thermique de trempe et de revenu).

- la façon dont il est mis en forme; on distinguera notamment les produits moulés (fabriqué par fusion/solidification) et les produits mis en forme par déformation à chaud (p.e. laminage, forgeage...).

#### • RÔLE DE LA MÉTALLURGIE DU SOUDAGE

Lors d'une opération de soudage, en terme métallurgique, tout est remis en question; les structures des pièces à assembler tendent à évoluer lors du soudage. En effet, dans la plupart des cas, chauffés puis refroidis par la source de chaleur de soudage, les matériaux assemblés subissent un nouveau traitement thermique. De plus, s'il s'agit de soudage par fusion:

- d'une part, les matériaux assemblés peuvent prendre une nouvelle composition chimique s'ils sont mélangés à une composition chimique différente, par ex. celle du métal d'apport
- et dans tous les cas, ils quittent la structure du métal de base pour passer (au moins dans un premier temps) par une structure brute de solidification, de type produit moulé (dans la région où ils sont fondus puis à nouveau solidifiés). Le rôle principal de la métallurgie du soudage est de connaître la façon dont évolue la structure métallurgique d'un matériau soudé dans les régions où il est modifié par le soudage (régions soudées), et ce dans le but de maîtriser les propriétés d'une soudure.

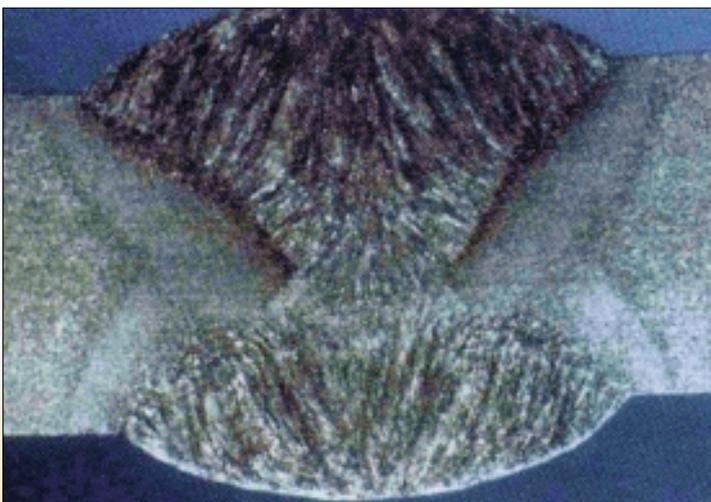
(Figure 1: Structure d'un alliage métallique, vu au microscope électronique, et figure 2: Macrographie d'une soudure d'acier)

#### • COMPRENDRE LE COMPORTEMENT MÉTALLURGIQUE

Pour comprendre le comportement métallurgique d'un métal de base au soudage il faut connaître et étudier:

- Avant toute chose, le fonctionnement métallurgique du matériau qui va être soudé; ce matériau est appelé par le métallurgiste du soudage: métal de base (MB).
  - La façon dont une soudure chauffe et refroidit dans le temps et dans l'espace (traitement thermique au soudage), ainsi que les facteurs d'influence (énergie, épaisseur soudée...); on parle d'aspect thermique de l'opération de soudage.
  - Les modifications subies par le métal de base dans les régions où il a chauffé et refroidi sans fondre; cette région est appelée: zone affectée thermiquement (ZAT). Et s'il s'agit de soudage par fusion:
  - Les modifications subies par le métal de base dans les régions où il a chauffé, fondu, refroidi (après solidification) et éventuellement modifié chimiquement (s'il y a eu utilisation d'un métal d'apport); cette région est appelée: zone fondue (ZF).
  - Les modifications particulières qui peuvent s'opérer à la frontière de la ZF et de la ZAT; cette région est appelée la zone de liaison (ZL).
- (Figure 3: Métal de base, zone affectée thermiquement, soudure,

Figure 2: Macrographie d'une soudure d'acier



source de chaleur, métal d'apport, zone de liaison)

## NOTIONS GÉNÉRALES

Dans ce chapitre, nous donnons un aperçu des premières notions sur le plan du fonctionnement métallurgique d'un métal de base.

## STRUCTURE

Les propriétés des matériaux dépendent de leur structure... Comment peut-on définir, plus précisément, la structure métallurgique d'un matériau? La structure d'un matériau correspond à la manière dont les éléments qui le constituent sont arrangés dans l'espace. Selon le moyen utilisé pour l'observer, la structure de la matière peut s'étudier suivant trois niveaux d'examen:

- à l'œil on examine la structure macrographique de la matière ou structure d'ensemble, la résolution est de l'ordre de 1 mm;
  - au microscope optique on examine la structure micrographique ou arrangement granulaire, la résolution est de l'ordre de 0,001 mm (micron);
  - d'autres moyens de laboratoire, comme la diffraction X, voire le microscope à transmission, permettent de conceptualiser l'arrangement des atomes (que l'on peut assimiler à des sphères); on parle alors de structure cristalline, l'échelle de mesure est de l'ordre de 0,000000 1 mm (Angström). Si seulement l'une de ses trois structures évolue dans un matériau, les propriétés de ce matériau évoluent. Nous allons étudier cela avec un plus de détail en commençant par la structure cristalline.
- (Figure 4: Macrographie: structure d'ensemble, on voit par exemple un fibrage. Micrographie: on voit des grains. Structure cristalline: on voit des atomes)

Figure 4: Macrographie, micrographie et structure cristalline

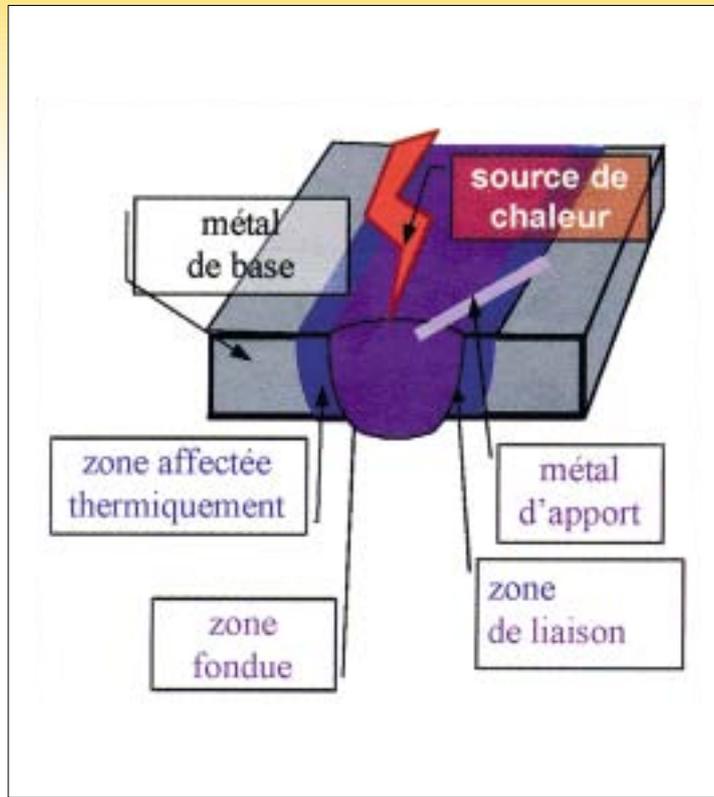
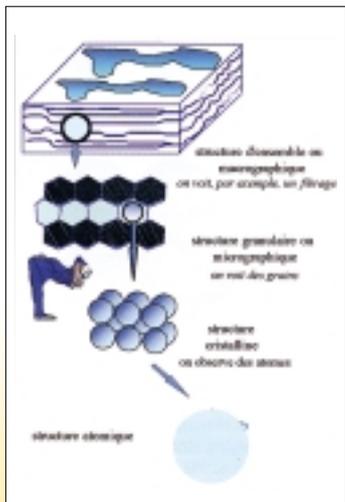


Figure 3: Métal de base, zone affectée thermiquement, soudure, source de chaleur, métal d'apport, zone de liaison

## STRUCTURE CRISTALLINE

### • QU'EST-CE QU'UNE STRUCTURE CRISTALLINE?

Parlons tout d'abord, pour mémoire, des liaisons qui lient les atomes. À l'état liquide, les liaisons qui existent entre les atomes, sont très faibles, suffisamment faibles pour que l'attraction de la pesanteur puisse faire couler les matériaux liquides en attirant au sol leurs atomes comme on déverserait des billes. (Figure 5: Schématisation d'un métal liquide)

À l'état solide, deux types de liaison peuvent lier les atomes:

- Les liaisons chimiques, très

fortes, qui lient entre eux des atomes différents (cas où ils présentent des affinités chimiques particulières) pour en faire des composés chimiques très durs; comme par exemple les céramiques, ou encore les carbures qu'on trouve dans la structure des aciers.

- Les liaisons métalliques, ou ioniques, qui lient entre eux les atomes métalliques, avec des liaisons plus faibles que les liaisons chimiques, pour donner les métaux (solides) qui, comme chacun sait, sont plus mous que les céramiques ou le carbure.

Lorsque des atomes métalliques se lient entre eux à l'état solide (par exemple quand ils se solidifient), ils ne s'ordonnent pas dans l'espace n'importe comment, mais tendent à prendre un arrangement régulier, 'en ne se gênant pas les uns les autres d'un point de vue mécanique'. L'aspect géométrique que prend cet arrangement à l'échelle de l'atome est appelé:

Schématisation d'un métal liquide (photo 5), d'un réseau cristallin à l'équilibre (photo 6) et d'un réseau hors équilibre (photo 7)

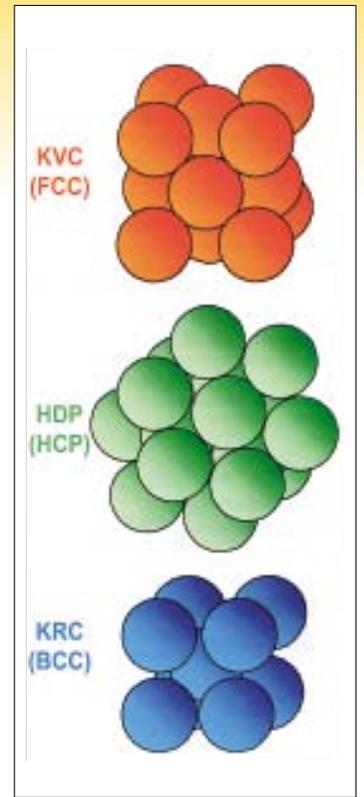
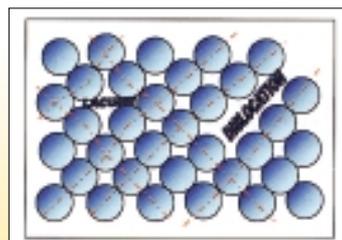
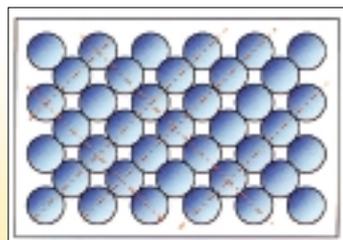
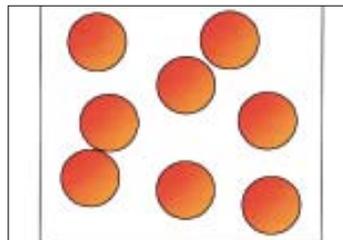


Figure 8: Différents réseaux cristallins selon le type de maille

structure cristalline ou réseau cristallin.

### • DIVERSITÉS CRISTALLINES

- Réseau à l'équilibre: lorsque l'arrangement cristallin est proche de la perfection, le réseau est dit à l'équilibre, dans ce cas la matière présente son plus bas niveau de contrainte interne, 'il y a peu de coincement entre les atomes'. La matière est stable et tend à ne plus évoluer dans le temps. (Figure 6: Schématisation d'un réseau cristallin à l'équilibre)
  - Réseau hors équilibre: Lorsque l'édification du réseau cristallin a été perturbée, par exemple lors de sa solidification ou après déformation mécanique, ou dans certains cas de refroidissement rapide (trempe), de nombreuses imperfections, ou défauts d'empilement, apparaissent dans les cristaux, qui est alors 'distordu'. Ces défauts sont du type:
    - lacune, il manque un atome
    - ou dislocation, il manque un plan d'atome.
- Dans ce cas on dit que la matière est hors d'équilibre, ce qui la distingue de la matière à l'équilibre, 'il y a coincement entre les atomes', le niveau de contrainte interne est plus élevé qu'à l'équilibre. Les réseaux hors équilibre n'ont pas les mêmes propriétés que les réseaux hors équilibre. Par exemple: ils sont souvent nettement plus durs. (Figure 7: Schématisation d'un réseau hors équilibre)
- Remarque: naturellement les

matériaux métalliques déséquilibrés cherchent à retrouver l'état d'équilibre, cela explique beaucoup de phénomènes métallurgiques...

– Mailles: On distingue également les réseaux cristallins selon le plus petit type d'arrangement qu'ils présentent, naturellement, d'un point de vue géométrique, on parle de maille. À l'équilibre, pour les éléments métalliques il n'y a que trois possibilités. Les mailles sont cubique à face centrée (C.F.C), hexagonal compact (H.C.) ou cubique centrée (C.C). Les mailles C.F.C et les mailles H.C. sont dites compactes ou denses car les atomes présents sont tous très proches les uns des autres. On verra plus loin que ceci explique pourquoi le cuivre, le nickel, l'aluminium (C.F.C.) ou le titane et le zirconium (H.C.) sont des matériaux facilement déformables, alors que le fer ou le chrome (CC) sont plus difficilement déformables. (Figure 8)

• **AGITATION THERMIQUE & DIFFUSION**  
Les atomes ne sont pas fixes au sein du réseau: ils vibrent, et ceci d'autant plus que la température est élevée. On appelle ça l'agitation thermique. Par exemple, à température ambiante, les atomes de fer vibrent à 1013 hertz, c'est à dire qu'ils quittent leur position moyenne pour y revenir un million de fois par seconde! Cette agitation thermique favorise le déplacement des atomes au sein du réseau cristallin. On parle de diffusion. Lors de la diffusion, les atomes cheminent par le biais des lacunes et des dislocations. Cela explique par exemple pourquoi, on utilise la chaleur, le traitement thermique, pour bouger les atomes, lorsque l'on veut modifier une structure métallurgique, afin de modifier les propriétés du matériau qu'elle constitue...

• **COMPORTEMENT MÉCANIQUE, STRUCTURES CRISTALLINES ET PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES**

Quels liens peut-on faire entre structures cristallines et propriétés? Pour répondre à cette question, nous parlerons tout d'abord de comportement et de propriétés mécaniques, et ce, en se limitant à présenter, succinctement, trois types de comportement, soit le comportement élastique, le comportement plastique et le comportement fragile.

– **Comportement élastique**  
Le comportement élastique correspond à une déformation très faible d'un alliage métallique qui s'annihile quand on supprime la contrainte qui l'a créé. Lors de cette déformation, les atomes du réseau cristallin s'écartent sur de très faibles distances.

(Figure 9: Schématisation du comportement élastique)

– **Comportement plastique**

Le comportement plastique correspond à une déformation qui subsiste dans le matériau alors que la contrainte qui l'a créé a été supprimée (si l'on exclu toutefois le retour élastique). Cette fois, les atomes se déplacent sur de grandes distances tout en restant liés, la déformation est d'ailleurs observable à l'œil. On explique ce phénomène par le mouvement des dislocations; dislocations préexistantes dans le métal, avant déformation plastique, puis qui se créent de plus en plus au fur et à mesure de la déformation. Par le biais des mouvements de dislocation, des couches de matière glissent les unes sur les autres suivant les plans de forte densité atomique ou plans denses, directions où les atomes, au contact, se poussent les uns les autres, de proche en proche, sous l'effet des contraintes pour générer des déformations plastiques. La quantité de déformation plastique totale que peut prendre un matériau, avant rupture (ductile),

**À BASSE TEMPÉRATURE LES MATÉRIAUX SONT SUSCEPTIBLES DE RUPTURE FRAGILE, CAR LE PEU D'AGITATION THERMIQUE QU'ILS PRÉSENTENT, GÈNE LES GLISSEMENTS**

est appelé allongement pour cent (A%). En terme de contrainte, la quantité d'effort nécessaire, par mm<sup>2</sup>, pour amener un matériau à rupture, (ductile ou non), est appelé charge de rupture (Rm en N/mm<sup>2</sup>).

Toujours en terme de contrainte, la limite pour un matériau donné, entre le comportement élastique pur et le comportement plastique, ou autrement dit l'effort nécessaire par mm<sup>2</sup>, pour amener un matériau à déformation plastique, est appelé: limite d'élasticité (Re en N/mm<sup>2</sup>).

Les valeurs de A% de Re et de Rm sont mises en évidence par l'essai de traction.

(Figure 10: Rupture ductile lors d'un essai de traction)

– **Comportement fragile**

Parlons maintenant du comportement fragile; un matériau au comportement fragile offre peut de résistance aux chocs, il peut se rompre très facilement 'comme du verre' et sans déformation plastique, même si le choc auquel il est soumis est peu énergétique. Dans ce cas, la rupture se fait de façon nette et brutale. Quand il s'agit de rupture transcristalline ou transgranulaire (nous verrons plus loin ce qu'est un grain), la rupture se fait entre les atomes situés sur les plans de faible densité atomique ou plan non dense (là où les atomes ne sont pas en

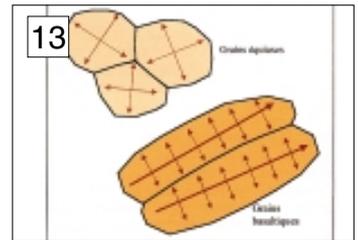
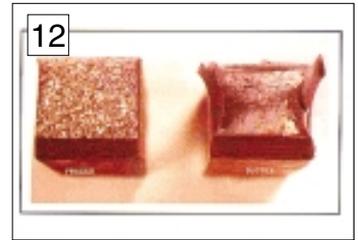
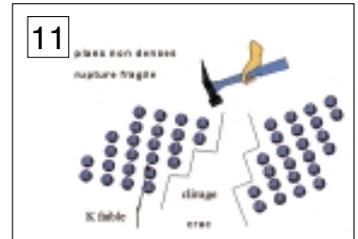
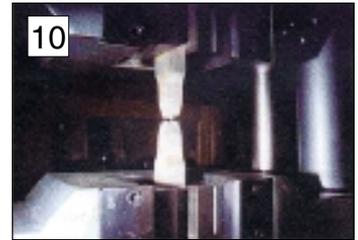
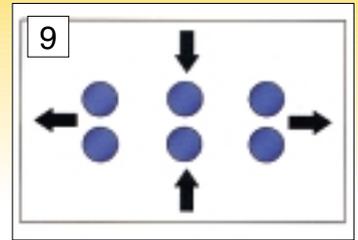
contact) car se sont les lieux où les liaisons sont les plus faibles, on parle alors de clivage. La résistance d'un matériau à la rupture fragile (KV ou KU) se mesure en joule. Cette valeur est mise en évidence lors de l'essai de flexion par choc. (Figure 11: Schématisation de la rupture fragile)

Remarque: lorsque la rupture est purement fragile, c'est-à-dire sans aucune déformation plastique, alors Re et Rm sont confondus. Parlons maintenant du lien que l'on peut faire entre structures cristallines et propriétés mécaniques.

Le comportement mécanique d'un matériau dépend, principalement: de la facilité avec laquelle ses couches d'atomes peuvent glisser; ou plus exactement de la facilité avec laquelle une contrainte peut déplacer des dislocations jusqu'à créer une déformation plastique.

par exemple:  
- Les structures hors d'équilibre sont de plus haute limite d'élasticité que les structures d'équilibre, car le grand nombre de perturbations cristallines qu'elles présentent gêne les glissements (ou mouvement des dislocations).  
En effet, les nombreuses dislocations présentes se gênent entre elles dans leur déplacement, de la même façon qu'un trafic routier serait perturbé par la présence d'un grand nombre de voitures se déplaçant en même temps...

- Les structures C.F.C, plus denses, se plastifient facilement car elles présentent beaucoup de directions de forte densité atomique où les atomes, au contact, sont prompts à se pousser les uns les autres pour générer des déformations plastiques. Dans le même ordre d'idée, les structures C.F.C. sont souvent quasiment insensibles à la rupture fragile, car elles contiennent beaucoup de directions de forte densité atomique, ce qui facilite les



**LÉGENDE DES FIGURES 9 AU 16**

- Figure 9: Schématisation du comportement élastique
- Figure 10: Rupture ductile lors d'un essai de traction
- Figure 11: Schématisation de la rupture fragile
- Figure 12: Éprouvettes rompues après essais de flexion par choc
- Figure 13: Forme des grains
- Figure 14: Grains équiaxes d'acier traité thermiquement
- Figure 15: Grains basaltiques de cuivre moulé
- Figure 16: Dendrites vues au microscope électronique

glissements, et aucun plan de suffisamment faible densité atomique pour permettre les clivages.  
 - Notons aussi l'effet de la température. À basse température les matériaux sont susceptibles de rupture fragile, car le peu d'agitation thermique qu'ils présentent, gêne les glissements. (Tableau: Résumé du lien qui existe entre structures, températures et propriétés mécaniques)  
 (Figure 14: Structure à l'équilibre, structure hors équilibre, structure C.F.C., structure C.C., haute température, basse température, H = dureté)

### STRUCTURE GRANULAIRE OU MICROGRAPHIQUE

Que voit-on lorsque l'on observe des cristaux métalliques au microscope? La construction du réseau cristallin se fait par

#### LA CONSTRUCTION DU RÉSEAU CRYSTALLIN SE FAIT PAR GERMINATION PUIS CROISSANCE

germination puis croissance. Par exemple lors d'une solidification, dans le creuset qui contient le métal liquide, la direction que prend la construction de chacun des nombreux germes cristallins qui se forment en début de solidification, s'orientent dans l'espace de façon tout à fait aléatoire. De ce fait chaque germe formé est différemment orienté de ses voisins. Ensuite chaque germe se développe sous la forme d'un cristal, relativement équilibré si la température est suffisante pour permettre la diffusion. Par contre, en fin de croissance, les cristaux formés ne peuvent se joindre les uns aux

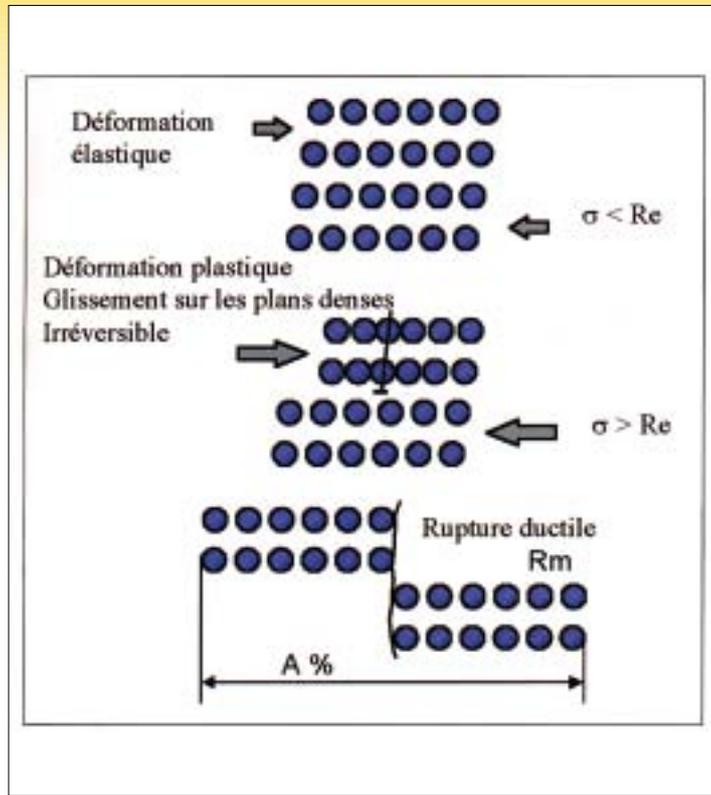


Figure 17: Schématisation du comportement plastique

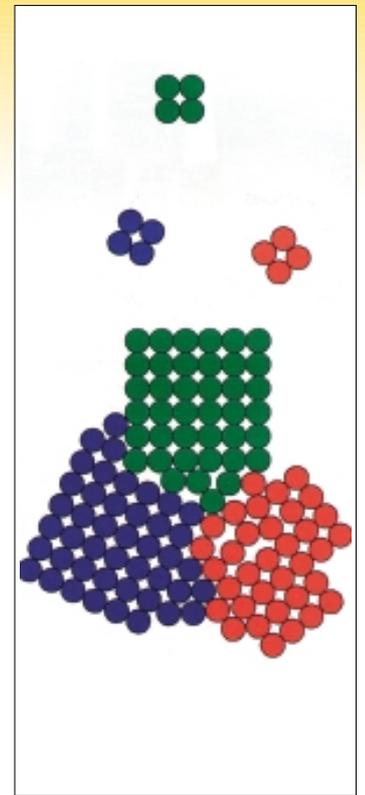


Figure 18: Schématisation de la germination et de la croissance cristalline d'un matériau métallique

autres que par le biais de réseaux déséquilibrés, qui cherchent à s'adapter aux différences d'orientations des réseaux. Le résultat de ce mode de construction cristalline est un agrégat de réseaux cristallins, relativement équilibrés, et surtout désorientés les uns par rapport aux autres, qui sont liés entre eux par des réseaux cristallins déséquilibrés. Ces réseaux cristallins équilibrés, désorientés les uns par rapport aux autres, sont appelés 'grains', les réseaux déséquilibrés qui lient ses grains entre eux sont appelés 'joints de grain'. Lorsque après préparation

métallographique spéciale, on observe la coupe d'un matériau métallique au microscope, les cristaux apparaissent sous la forme de grain et de joint de grain, on parle de structure granulaire ou micrographique.

• **DIVERSITÉ GRANULAIRE**  
 Comment distingue-t-on les diverses structures granulaires? On distingue tout d'abord les grains par leur forme.  
 - Grains équiaxes  
 Lorsque la croissance des grains se fait de façon quasi uniforme dans toutes les directions, par exemple lors d'un traitement thermique, ils prennent des formes

d'équilibre proche de la sphère, on parle de grains équiaxes.  
 - Grains basaltiques  
 Lorsque la croissance des grains se fait selon une direction privilégiée, notamment lors d'une solidification, ils prennent des formes allongées, moins équilibrées aux extrémités, et suivent des directions de croissance de type arborescente, on parle de construction dendritique. Ces grains sont dits basaltiques.

(Figure 13: Grains équiaxes, grains basaltiques, forme des grains - Figure 14: Grains équiaxes d'acier traité thermiquement - Figure 15: Grains basaltiques de cuivre moulé - Figure 16: Dendrites vues au microscope électronique)

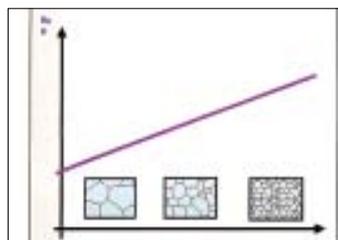
- Tailles de grains  
 On distingue ensuite les grains selon leur taille. Pour des raisons qui seront expliqués plus loin dans cet article, la taille des grains peut être très variable. Cette taille est normalisée suivant un indice de taille de grain. On parle de grain fin quand l'indice de taille de grain est supérieur à 6 et de gros grains lorsque l'indice de taille de grain est de l'ordre de 2.

• **STRUCTURES GRANULAIRES ET PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES**  
 Quels liens peut-on faire entre structures granulaires et propriétés?  
 Tout d'abord signalons que les grains équiaxes présentent des propriétés mécaniques quasi isotropes, c'est à dire les mêmes

Tableau: Résumé de la relation entre la structure, la température et les propriétés mécaniques

	Re	A%	K	H
STRUCTURE A L'EQUILIBRE				
STRUCTURE HORS EQUILIBRE				
STRUCTURE C.F.C				
STRUCTURE C.C				
HAUTE TEMPERATURE				
BASSE TEMPERATURE				
<b>H = dureté</b>				

En haut (Figure 19): Schématisation de la loi de Petch et Hall; en bas (Figure 20): grains d'acier normalisé



dans toutes les directions, alors que les grains basaltiques présentent des propriétés anisotropes. Cela étant dit, le plus important est de savoir que c'est surtout la taille des grains qui est prépondérante sur la tenue des alliages en traction et aux chocs. Petch et Hall ont démontré que la limite d'élasticité d'un matériau augmentait quand le diamètre des grains diminuait. Il en va de même pour la résistance au choc. (Figure 20: Schématisation de la loi de Petch et Hall)

En effet, plus les joints de grains sont nombreux, plus il y a d'obstacles aussi bien aux glissements qu'au passage des clivages.

(Figure 21: fer et aciers transformables, régénération et surchauffe, quelque soit l'état initial)

• **ÉVOLUTION DE LA TAILLE DES GRAINS**  
 - Comment peut-on faire évoluer la taille des grains?  
 Nous nous limiterons à présenter trois phénomènes métallurgiques qui agissent sur la taille des grains des alliages métalliques: la régénération des aciers transformables, la surchauffe et l'écroissage/recristallisation.

**LE FER ET LA PLUPART DES ACIERS CHANGENT DE STRUCTURE CRISTALLINE AVEC LA TEMPÉRATURE**

transformables

Le fer et la plupart des aciers (aciers non et faiblement alliés et aciers inoxydables martensitiques notamment) sont dits transformables. C'est à dire qu'ils changent de structure cristalline avec la température. A température ambiante, ils sont cubiques centrés. Passé, au chauffage une température, appelée A3, ils deviennent totalement cubiques à faces centrées, pour redevenir cubiques centrés lorsqu'ils retournent à température ambiante. A3 se situe aux alentours de 900 °C. Cette particularité cristalline s'accompagne d'une particularité granulaire: le changement de structure cristalline s'accompagne d'un affinement de grains. On parle de phénomène de régénération. (Figure 20: Grains d'acier normalisé)

Ce phénomène est largement mis à profits par les métallurgistes lors du traitement thermique des aciers transformables; en effet pour affiner leurs grains, il suffit de chauffer ces aciers juste au-dessus de leur température de transformation, A3, puis de les laisser refroidir à l'air calme. On

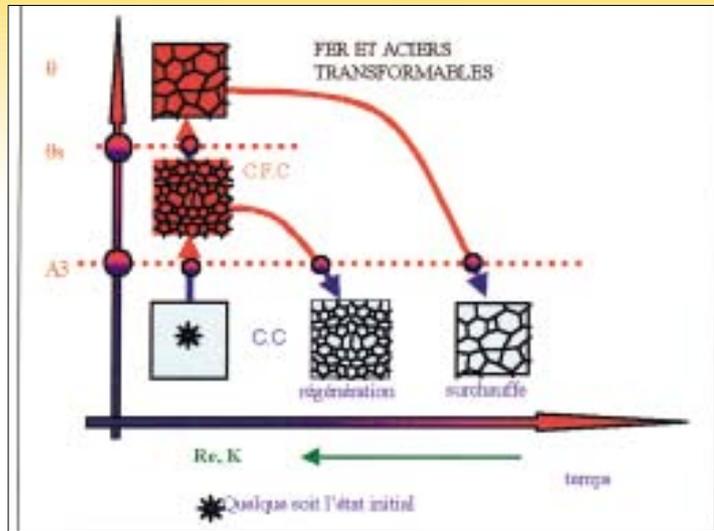


Figure 21: Fer et aciers transformables

parle de traitement thermique de normalisation.

- Surchauffe  
 Les structures granulaires présentent des imperfections de réseau aux joints de grains, si bien que lorsqu'un alliage métallique est porté à haute température, par exemple quelques dizaines de degrés au-dessous de la température de fusion, l'agitation thermique devient telle que les réseaux cristallins tendent à se réunir entre eux, en prenant les mêmes alignements, et ce en effaçant les imperfections de réseau situées au joint des grains. Le résultat de ce mécanisme cristallin est simple: les grains, se réunissant entre eux, deviennent moins nombreux et par conséquent plus gros. Étant donné que les propriétés mécaniques chutent quand la taille des grains augmente, les métallurgistes parlent de surchauffe.

- Écroissage/recristallisation et surchauffe  
 Un alliage déformé à froid est dit écroû. L'écroissage crée un réseau cristallin déséquilibré, instable, qui cherche à évoluer

vers l'état d'équilibre. Si un alliage suffisamment écroû est réchauffé, il recristallise, afin de retourner vers un état d'équilibre plus stable; alors, de nouveaux grains se forment. On peut affiner des grains en réchauffant un alliage fortement écroû, juste au-dessus de sa température de recristallisation. ce principe est notamment utilisé lors du laminage contrôlé.

Par contre, comme tous les alliages, un alliage écroû, porté à trop haute température verra ses grains grossir (phénomène de surchauffe).

Nota: la température de recristallisation des alliages est sensiblement égale à la moitié de leur température de fusion. Remarque sur l'effet mécanique de l'écroissage: lorsqu'un alliage métallique est écroû, le nombre important de dislocations qui se crée dans l'alliage, tend à rendre difficile les mouvements de glissement, glissements qui sont moteurs des déformations plastiques. Pratiquement, le résultat est que l'écroissage à pour effet mécanique d'augmenter

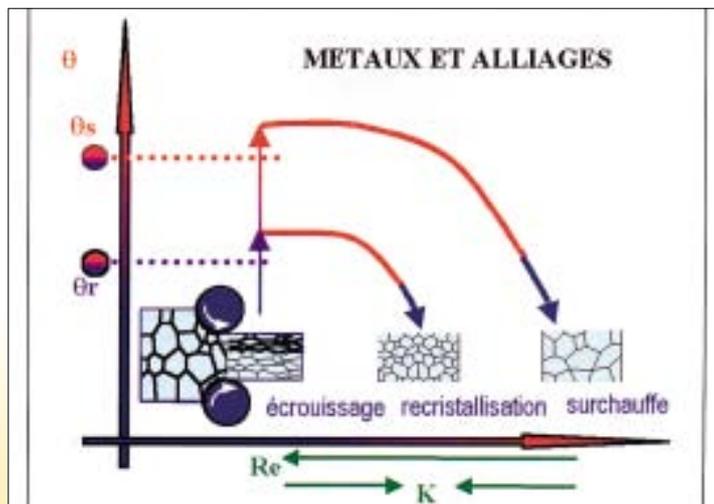


Figure 22: Métaux et alliages

la limite d'élasticité et la charge de rupture des alliages, et qu'inversement, la recristallisation annihile cet effet. (Figure 23: Cuivre écroû - figure 24: Cuivre surchauffé - figure 26: Pièce d'acier forgé)

**STRUCTURE MACROGRAPHIQUE**

Lorsque, après préparation métallographique spéciale, on observe à l'œil nu, la coupe d'un matériau métallique, on parle d'examen macrographique ou macrostructural.

• **DIVERSITÉ MACROGRAPHIQUE**  
 Quelles sont les diverses structures macrographiques que l'on peut observer? Macrographiquement, dans les grandes lignes, on distingue les produits moulés et les produits mis en forme par déformations à chaud (laminés, forgés, corroyés...).  
 - Particularité des produits moulés  
 Les produits moulés, du fait qu'ils séjournent longtemps à haute température, présentent des structures granulaires grossières, parfois visibles à l'œil nu. D'autre part, les produits moulés présentent en majorité des grains de type basaltiques. Cette forme

**LES PRODUITS MOULÉS, SURTOUT S'ILS SONT BRUTS DE FONDERIE, PRÉSENTENT DES HÉTÉROGÉNITÉS CHIMIQUES APPELÉES SÉGRÉGATIONS, C'EST À DIRE QUE LA COMPOSITION CHIMIQUE DE CES PRODUITS PEUT VARIER D'UNE RÉGION À L'AUTRE**

découle de l'orientation que prennent les grains des produits moulés lors de leur solidification, soit: début de solidification depuis les bords du creuset, qui refroidissent en premier, et fin de solidification vers le centre du creuset qui refroidit en dernier.  
 - Remarque sur la ségrégation des produits moulés  
 Les produits moulés, surtout s'ils sont bruts de fonderie, présentent des hétérogénéités chimiques appelées ségrégations, c'est à dire que la composition chimique de ces produits peut varier d'une région à l'autre. On distingue à l'échelle macrographique la ségrégation majeure, à l'échelle micrographique, la ségrégation mineure, dite intergranulaire, et à l'échelle du cristal, la ségrégation mineure, dite dendritique. Comment explique-t-on les phénomènes de ségrégation? Ces ségrégations sont issues de la solidification. Par exemple, dans le cas des aciers, alliage fer-carbone, le premier élément à

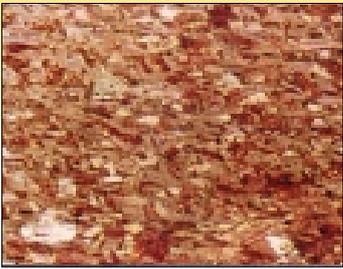


Figure 23: Cuivre écroui



Figure 24: Cuivre recristallisé

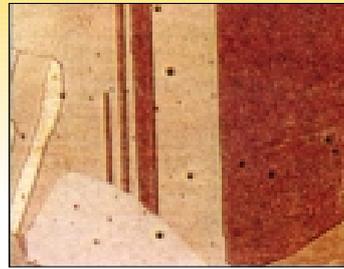


Figure 25: Cuivre surchauffé



Figure 26: Pièce d'acier forgé

cristalliser lors de la solidification est l'élément majoritaire, c'est à dire le fer. Il en résulte que les éléments minoritaires comme le carbone ou le soufre tendent à rester piégés dans les régions liquides qui se solidifient en dernier, si bien que l'alliage présente, aux échelles macrographiques, micrographique et cristalline, des régions ségréguées en carbone et en soufre.

**L'ÉTAT DE SURCHAUFFE NATURELLE QUE PRÉSENTENT LES PRODUITS MOULÉS, LORSQUE LEURS GRAINS N'ONT PAS ÉTÉ AFFINÉS PAR UN TRAITEMENT THERMIQUE ULTÉRIEUR, TEND À LES RENDRE MOINS RÉSISTANTS MÉCANIQUEMENT**

(Figure 27: Produit moulé – ségrégation mineure/majeure)  
 – Produits déformés à chaud  
 Les produits déformés à chaud ont pour origine des produits moulés. C'est notamment le cas des produits laminés, forgés ou corroyés. (Figure 28: Produit déformé à chaud)  
 Lors de cette déformation les grains tendent à s'affiner, par le biais de phénomènes d'auto-écrouissage recrystallisation, et les régions ségréguées tendent à

s'aplatir et à s'aligner suivant le sens des déformations. Ses ségrégations allongées apparaissent lors de l'examen métallographique sous forme de lignes, on parle de fibrage. (Figure 26: Pièce d'acier forgé)  
**• STRUCTURES MACROGRAPHIQUES ET PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES**  
 Quels liens peut-on faire entre structures macrographiques et propriétés?  
 Les produits moulés, tendent à présenter des propriétés anisotropes, les propriétés varient selon l'orientation des contraintes par rapport à l'orientation des grains. L'état de surchauffe naturel que présente les produits moulés, lorsque leurs grains n'ont pas été affinés par un traitement thermique ultérieur, tend à les rendre moins résistants mécaniquement. Les sites de ségrégation majeure, s'il n'y a pas eu par exemple démasselotage, sont des lieux où la fragilité des alliages moulés est accrue.  
 Les produits déformés à chaud présentent des propriétés anisotropes, ils sont d'autant moins résistants que les contraintes appliquées et génèrent des efforts de traction perpendiculaires aux fibres.  
 L'affinement des grains dont bénéficient les produits déformés à chaud lors de leur fabrication, (phénomènes d'auto-écrouissage recrystallisation), tend à les rendre plus résistants mécaniquement.

**CONCLUSION**

**• RÔLE DE LA MÉTALLURGIE ET DE LA MÉTALLURGIE DU SOUDAGE**

Le rôle principal de la métallurgie est de savoir comment 'façonner ou faire évoluer' la structure métallurgique d'un matériau métallique, et ce dans le but de maîtriser ses propriétés, propriétés qui découlent des structures. Lors d'une opération de soudage, tout est remis en question. Le rôle principal de la métallurgie du soudage est de connaître la façon dont évolue la structure métallurgique d'un matériau au soudage, dans le but évident de maîtriser les propriétés d'une soudure.

En métallurgie du soudage on étudie le métal de base, l'aspect thermique, la ZAT, la ZF et la ZL.

**• FONCTIONNEMENT MÉTALLURGIQUE GÉNÉRAL D'UN MÉTAL DE BASE**

La structure métallurgique (donc les propriétés) des matériaux évolue principalement avec la composition chimique, le traitement thermique (voire thermo-mécanique) et la mise en forme. En métallurgie on distingue les structures macrographique, micrographique et cristalline. On distingue les structures cristallines selon leur niveau d'équilibre et le type de maille qu'elles présentent. Au microscope optique les cristaux apparaissent sous forme de grain; on distingue les structures granulaires selon leur taille et leur forme.

Macrographiquement on distingue les produits moulés, en général ségrégués et à gros grains basaltiques, et les produits déformés à chaud, fibrés et à grains plus fin.

**• STRUCTURES ET PROPRIÉTÉS**

- Les structures hors équilibre (par exemple écrouies) et/ou C.C (par exemple le fer ou le chrome) sont plus dures, tendent à présenter de bonne résistance à la traction et sont à tendance fragile, et ce d'autant plus que la température est basse.
- Les structure d'équilibre (cas des alliages recuits) et/ou C.F.C (cas par exemple du nickel et de l'aluminium) et/ou H.C (par exemple le titane ou le zirconium) sont plus douces, tendent à présenter de bonne résistance au choc et tendent à présenter de plus faible résistance à la traction, et ce d'autant plus que la température est élevée.
- Dans la plupart des cas: plus les grains sont fins (alliages écrouis et recristallisés ou aciers transformables régénérés), meilleurs sont les propriétés mécaniques.
- Les propriétés des structures macrographiques dépendent des effets de ségrégation, de l'effet du fibrage et de la taille des grains.
- Mots clefs: métallurgie, structure, propriétés, composition chimique, traitement, mise en forme, soudage, cristal, grain, structure macrographique, ségrégation, fibrage. □

Figure 27: Produit moulé

Figure 28: Produit déformé à chaud

