



VOYAGE AU CŒUR DE L'ACIER

Olivier C. A. BISANTI, 26 octobre 2001

savoir l'Acier

Le lecteur trouvera dans cet article des notions simplifiées s'efforçant de ne pas trop injurier les fondements scientifiques de la métallurgie ; nous avons tenté d'éviter un aspect scolaire par une rédaction adaptée. Le spécialiste nous pardonnera les approximations qui en découlent, il n'est évidemment pas question dans un ouvrage tel que celui-ci d'aborder des aspects quantitatifs ou autre équation de Schrödinger.

Les explications développées ici n'ont pour ambition que de faire comprendre au lecteur la manière dont les caractéristiques visées du produit conduisent l'évolution des procédés : de l'astuce toujours en éveil¹ des métallurgistes découle l'éternelle jeunesse de l'acier.

Note importante - Ce texte est une version modifiée pour la publication sur le site « SOLEILS D'ACIER » du chapitre 11 de l'ouvrage « UGINE-SUR-MER ».



¹ « 60% des aciers actuels n'existaient pas il y a cinq ans » peut-on lire sur les brochures Usinor.

Les matériaux qualifiés de « solides » sont constitués de cristaux. On appelle *cristal* une matière composée d'atomes rangés selon un motif régulier² dont la géométrie dépend des caractéristiques des atomes. Entre les atomes de ces cristaux peuvent exister trois types de liaison : liaison ionique, liaison covalente, liaison métallique. Dans le chlorure de sodium, par exemple, le bien connu sel de cuisine, les atomes de sodium et de chlore sont rangés en alternance dans une structure à maille rectangulaire. Le lien entre ces atomes est une liaison ionique. Un cristal de cuivre est par contre organisé en couches reproduisant un motif cubique à la manière de fruits empilés sur un étalage. Ici, la liaison est de type métallique. On pourrait trouver un troisième exemple mettant en oeuvre des liaisons covalentes. Ce qu'il est important de comprendre à ce stade, c'est que les atomes ne sont pas rangés au hasard, mais selon une géométrie bien définie pour chaque type d'atomes à une température définie (nous verrons plus loin que la température a une importance).

La déformation des solides intervient une fois dépassée leur limite d'élasticité³ ; dans certaines limites, ils se déforment

² A noter que le « cristal » culinaire et ornemental (verres à boire, lustres, objets divers) n'est pas un cristal mais... un verre, chargé en plomb.

³ Effort maximal applicable à un matériau élastique qui garantit le retour à la géométrie antérieure lors de la suppression de l'effort.

VOYAGE AU CŒUR DE L'ACIER

-2-

sans se rompre. La nature particulière de la liaison métallique donne aux cristaux organisés par ce type de liaison une caractéristique commune aux métaux : l'importance et la facilité de leur déformation. Mais tous les atomes ne sont pas aptes à contracter des liaisons métalliques. Cette aptitude reflète en fait la structure de leur couche d'électrons la plus externe.

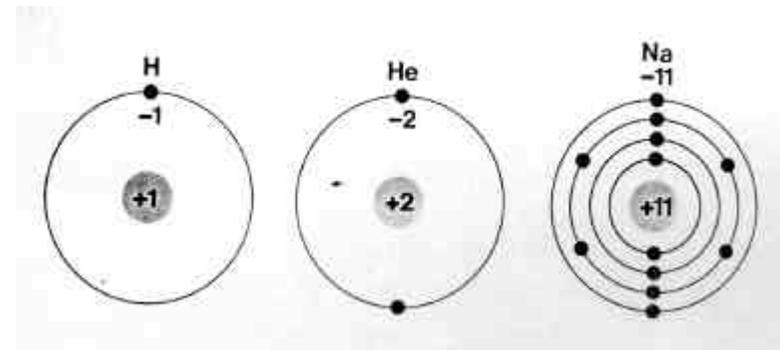
Les atomes et leurs liaisons.

On apprend à l'école que tout atome est constitué par un noyau chargé positivement, entouré d'un certain nombre d'électrons de charge négative. Trois notions sont fondamentales à ce niveau : 1) la charge électrique du noyau ne varie pas de manière continue et aléatoire, mais de quantités définies qui sont égales (en valeur) à la charge d'un électron, et de signe positif, 2) les atomes sont toujours neutres, ce qui implique que la charge positive du noyau est toujours équilibrée par celle, opposée, de son cortège d'électrons, 3) les charges de signe opposé s'attirent (celles de même signe se repoussent) ; la force qui s'exerce sur les objets chargés électriquement est appelée *force électrostatique*⁴.

⁴ Dans la vie courante, c'est par exemple la force (répulsive) qui ébouriffe les cheveux, qu'un brossage énergique charge électriquement.

Comme ce sont les électrons qui forment la couche extérieure de l'atome, ce sont eux qui vont définir le comportement de cet atome vis-à-vis des atomes environnants, identiques ou non, ses « aptitudes sociales » en quelque sorte. Ces électrons, on l'a vu, sont en nombre défini pour chaque type d'atome (appelé *élément*). Ils se répartissent en couches. Chaque couche ne peut contenir qu'un nombre défini d'électrons, et le remplissage commence par la couche la plus proche du noyau.

Schéma : atomes d'hydrogène (H), Hélium (He), Sodium (Na)



Par exemple, le noyau de l'atome de sodium possède une charge de +11, son cortège d'électrons comportera donc 11 électrons, répartis comme sur l'illustration : 2 sur la 1ère

couche, 2 sur la suivante, 6 sur la 3ème, et le dernier sur la couche externe. C'est cette couche externe qui, dans tous les atomes, définit entièrement les caractéristiques chimiques du sodium, c'est-à-dire la manière dont les atomes de sodium peuvent réagir avec d'autres atomes identiques ou différents.

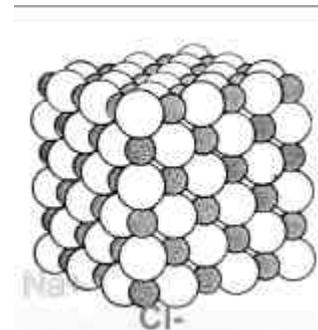
La liaison ionique

Il faut encore savoir que les couches externes d'électrons ont tendance à préférer deux états : plein, et vide⁵. Dans le cas du sodium, la couche en question peut contenir jusqu'à 2 électrons. Elle va donc perdre facilement l'unique électron qui s'y trouve : l'atome aura tendance à facilement s'ioniser, c'est-à-dire larguer son électron, s'il rencontre un atome qui accepte de le lui prendre. C'est le cas du chlore, qui possède 17 électrons, répartis en 2-2-6-2-5 électrons par couche, la dernière couche étant pleine avec 1 seul électron de plus. Lorsque le chlore rencontre le sodium, l'électron qui gêne le sodium arrange bien le chlore et le marché est conclu. Il se forme un couple Na^+Cl^- , dans lequel le sodium devient positif en prêtant son électron externe

⁵ En toute rigueur, il n'y en a qu'un : plein. Que la couche extérieure soit vide revient à dire que la couche sous-jacente est pleine.

au chlore qui lui-même le place sur sa couche externe et acquiert de ce fait une charge négative. Des atomes chargés, par apport ou retrait d'un électron, sont appelés *ions*. Les charges électriques de signe opposé s'attirant, le sodium et le chlore seront liés par une force électrostatique qui définit la liaison ionique (entre ions). On verra plus loin que l'aptitude particulière du sodium à larguer facilement un électron est une caractéristique fondamentale qu'il partage avec tous les autres éléments métalliques.

Cependant, la liaison ionique est une liaison fragile. Comme rien n'est parfait dans la nature, le bel arrangement cristallin dans lequel les atomes de sodium et de chlore sont placés en alternance comporte des irrégularités. Par exemple, s'il manque un atome de chlore, les six atomes de sodium (positifs) normalement au contact du chlore (négatif) se verront entre eux ; comme ils sont de charge positive, ils se repousseront. Voilà qui diminue la cohésion du cristal. Imaginons maintenant un effort de cisaillement qui ferait glisser deux plans cristallins l'un sur l'autre : si l'arrangement entre plans qui permet de ne faire voisiner des ions + qu'avec des ions - est



Cristal de NaCl

Soleils d'Acier

déformé, un grand nombre de charges de même signe vont soudain se trouver en voisinage. Comme elles se repoussent, la rupture se produit rapidement. La fragilité macroscopique du cristal ionique trouve son explication à l'échelle atomique.

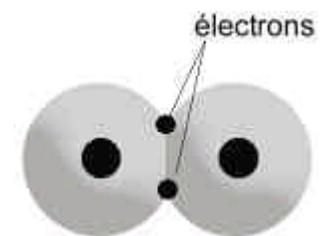
De plus, la liaison ionique ne se constitue qu'entre des atomes chargés électrostatiquement par perte ou gain d'un électron. Cela ne concerne donc que les atomes cédant facilement des électrons pour débarrasser une couche externe déjà presque vide (et devenir des ions positifs) et ceux qui en recherchent un pour compléter une couche externe presque remplie et ont donc tendance à devenir des ions négatifs. On comprend dès lors que les solides composés d'atomes n'ayant pas ces « tendances ioniques » devront contracter d'autres types de liaison pour tenir ensemble.

La liaison covalente

Dans la liaison covalente, nous sommes toujours devant une problématique de remplissage de couches externes. Ici, les atomes vont mettre en commun un, deux ou trois électrons de leur couche extérieure afin de la remplir. Le cas le plus simple est celui de l'hydrogène, dont la couche externe ne comporte qu'un seul électron. Comme il s'agit aussi de la première couche (l'hydrogène n'a qu'un seul électron), et que la première couche est pleine avec deux électrons, l'hydro-

gène est prêt à contracter une liaison covalente avec tout autre atome ayant le même problème : un autre atome d'hydrogène, par exemple. Si les deux atomes d'hydrogène mettent en commun leur électron, la couche externe de chacun lui semblera pleine. L'autre condition du « deal » sera aussi respectée : la charge électrique de l'assemblage (la molécule H_2) restera neutre. Il est certain que si l'on tire chaque atome d'hydrogène d'un côté, la liaison se rompra : chacun récupérant « son » électron. La liaison covalente est propre à chaque molécule, si elle casse, il n'y aura pas de suppléance.

la liaison covalente de deux atomes d'hydrogène



Notons que l'hydrogène peut aussi, en toute rigueur, atteindre son nirvanâ en perdant son électron et en vidant ainsi sa couche externe : il s'ionisera en ion H^+ , situation fréquemment rencontrée (l'ion H^+ est à la base de la notion d'acidité). L'hélium, par exemple, n'aura pas cette aptitude : son noyau a une charge de +2, il a donc deux électrons au total sur sa première couche qui est aussi sa couche externe. Tel qu'il est, il est parfaitement satisfait. Rien à faire pour lui faire partager un électron avec un autre atome de quoi que ce soit : c'est ce

que l'on appelle un élément neutre⁶.

La liaison métallique

La dernière manière connue d'assembler des atomes est la liaison métallique. Nous avons dit plus haut que l'aptitude particulière de certaines familles d'atomes à larguer facilement un électron est une caractéristique fondamentale des métaux. Le sodium peut donc contracter une liaison métallique avec d'autres atomes de sodium. Comme tous les autres métaux, il ne peut évidemment contracter cette liaison que si ses électrons ne sont pas déjà engagés dans d'autres types de liaison, par exemple covalente comme à l'état oxydé.

Dans un métal, de nombreux atomes de sodium sont rangés régulièrement dans le cristal. Comment tiennent-ils ensemble ? Sûrement pas par liaison ionique puisque s'ils acquièrent une charge, ce ne pourra être qu'une charge positive, et nous savons que des charges de même signe se repoussent. Certainement pas non

⁶ Ne pas confondre « élément neutre » et « gaz neutre » : un élément neutre existe dans la nature sous forme d'atomes libres (tel l'argon), alors que l'azote, par exemple, tout gaz neutre qu'il soit, existe sous forme de molécule. Argon et azote sont les gaz neutres les plus concernés par la sidérurgie.

plus par liaison covalente puisque le problème d'électrons « en trop » est le même pour tout le monde et que les partager à la mode covalente n'arrangerait rien. Il existe une troisième manière de résoudre la question. Puisque tous les atomes ont le même problème et qu'il s'agit seulement de larguer un électron pour trouver un état satisfaisant, tous les atomes larguent leur électron gêneur en même temps. Mais ces électrons libérés vont rester à proximité, ils vont servir de « colle » puisque les atomes ionisés du métal ne peuvent supporter d'être au contact les uns des autres. Les électrons sont mis en commun à l'échelle de tout le cristal ; la charge globale sera toujours nulle.

Parmi les conséquences macroscopiques à l'état métallique, il en est deux qui nous sont familières : la conductivité des métaux et leur caractère ductile.

- La conductivité des métaux résulte du caractère « laxiste » du lien d'appartenance entre électrons et noyaux des atomes. Puisque tous les électrons sont globalement en commun, ils peuvent se déplacer librement, pourvu que les atomes de sodium ne soient jamais en visibilité directe. Or, un courant électrique n'est jamais qu'un courant d'électrons⁷. Si on applique une différence de potentiel à deux extrémités d'un

⁷ Le sens conventionnel du courant électrique est du pôle positif vers le pôle négatif. En réalité, les électrons vont en sens inverse (du - vers le +) puisqu'ils sont de charge négative.

SOULEZ-VOUS D'ACIER

cristal métallique, les électrons vont avoir tendance, par l'attraction électrostatique que nous avons déjà mentionnée, à se rapprocher du pôle positif. Ceux proches du pôle négatif seront repoussés, et seront remplacés par des électrons venant du générateur, qui récupère un nombre égal d'électrons que son pôle positif aura attirés et absorbés de l'autre côté (un « générateur » ne génère qu'un courant d'électrons, pas les électrons eux-mêmes. On peut le considérer comme une « pompe à électrons ».)

- Le lien « laxiste » atomes-électrons explique aussi la ductilité du métal. Si des plans d'atomes du cristal glissent les uns sur les autres, ce n'est pas bien grave puisqu'ils ne sont pas reliés entre eux par des « ponts » covalents à peu près inextensibles mais par des électrons « libres » qui s'infiltrent partout. La « colle électrostatique » électron-atome-électron... etc. se déforme et s'écoule, mais ne se rompt pas comme la liaison covalente. Il en résulte que l'on peut déformer du métal sans qu'il se brise. Cette propriété capitale des métaux se nomme *ductilité*. D'elle et de quelques autres propriétés des cristaux métalliques découle toute la métallurgie.

Les cristaux métalliques et leur déformation.

La substance de base des métaux est donc constituée

de cristaux, composés d'atomes disposés régulièrement et reliés par une liaison diffuse composée d'électrons « libres »⁸. Cette liaison est relativement faible : elle se distend facilement, mais sans rupture réelle, puisque d'autres électrons prennent immédiatement la place. C'est ce qui explique que les métaux purs soient si mous : les plans atomiques de l'empilement cristallin glissent facilement les uns sur les autres.

Dislocations

En réalité, les plans d'atomes glissent rarement les uns sur les autres en bloc : les liaisons métalliques ont une certaine élasticité, et le glissement progresse en réalité par reptation, comme un pli sur un tapis. Cependant, lorsque le pli a parcouru tout le tapis, l'ensemble du tapis a été déplacé par rapport au sol ; le grain aura été déformé. Ce « pli », partie active de la zone de glissement entre les plans d'atomes, se nomme *dislocation*. Comme le pli sur le tapis, la dislocation est un défaut⁹ linéaire. A l'examen microscopique du métal, elle apparaît comme une ligne plus ou moins sinueuse. Selon la direction du regard par rapport au trajet de la dislocation,

⁸ « Libres » au sens qu'ils ne sont ni fixés à l'atome, ni engagés dans une liaison covalente.

⁹ On appelle *défauts* les discontinuités de cristallisation : dislocations, macles, précipités, joints de grain, etc.

VOYAGE AU CŒUR DE L'ACIER

-7-

celle-ci sera plus ou moins visible. La dislocation est donc le témoin d'une déformation du métal par glissement des plans d'atomes, cette faculté de glissement étant à l'origine de la ductilité du métal (i.e. sa capacité à être déformé sans se rompre). Sans entrer dans les détails, notons qu'il existe d'autres types de dislocations, dont la *dislocation-vis*.

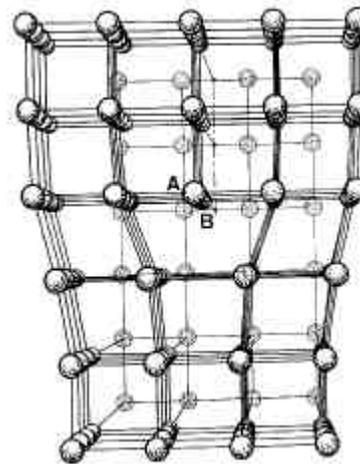
On tord facilement une barre de fer pur du diamètre d'un doigt. Cependant, l'expérience quotidienne nous apprend que la plupart des objets en acier sont plus résistants : quelque chose empêche donc les plans d'atomes de glisser les uns sur les autres.

Nous allons voir que de manière générale, divers types d'accidents de régularité (*défauts*) bloquent le processus de glissement et durcissent le métal : les dislocations butent sur ces obstacles.

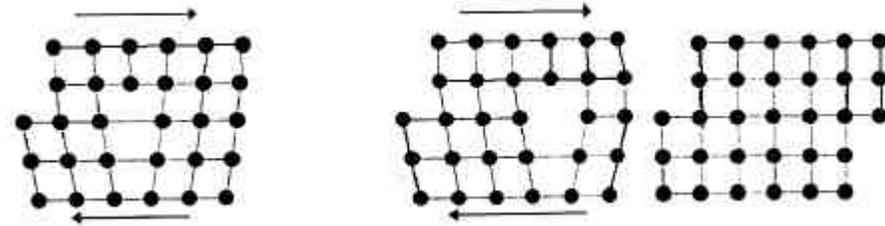
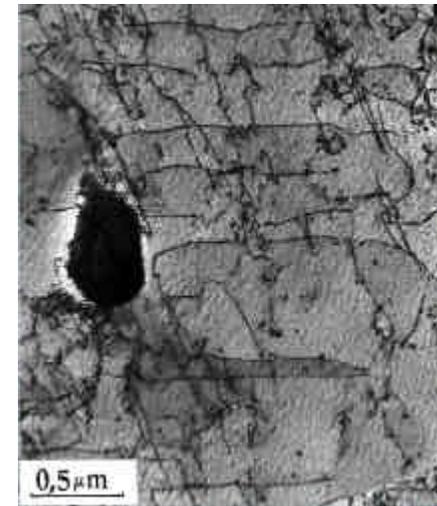
Jointes de grains, écrouissage.

Lors de la solidification du métal liquide, des foyers de cristallisation apparaissent simultanément en de nombreux points des zones les plus froides. L'orientation de ces grains cristallins est répartie au hasard : lorsque la croissance des grains les fait se rencontrer, il est rare qu'elle soit identique. On a cru longtemps que ces zones de contact entre grains étaient des régions amorphes (i.e. dépourvues de morphologie définie, cristal-

Schéma : dislocation-coin



dislocations dans un acier extra-doux déformé à froid



déplacement d'une dislocation

SOULEZIS D'ACIER

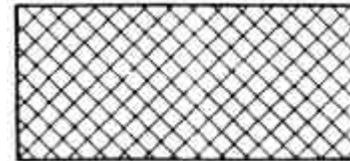
line en l'occurrence), mais il s'avère que l'édifice cristallin de chaque grain conserve son architecture régulière jusqu'à la ligne immatérielle constituant le joint de grain (en toute rigueur, on devrait dès lors parler d'une « interface »).

Comme les joints interrompent les plans privilégiés de glissement, le passage des dislocations y est entravé. Un premier mécanisme de durcissement du métal est dès lors identifié : l'affinement du grain.

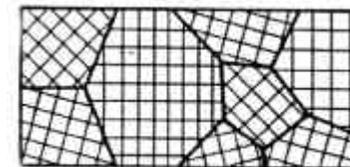
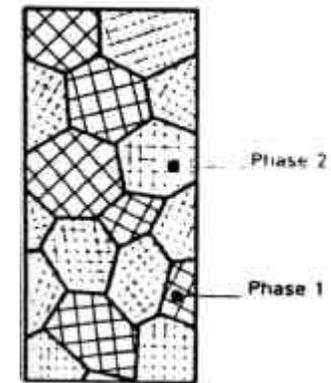
Dans un cristal nouvellement formé (ou régénéré par recuit), la densité des dislocations est de l'ordre de 100 kilomètres par centimètre cube. Toute déformation s'accompagne d'une augmentation rapide de la densité des dislocations. On évalue à 10.000 le facteur de multiplication correspondant à une déformation de 10% ; les cristaux écrouis peuvent ainsi présenter une densité d'un million de kilomètres de dislocations enchevêtrées par centimètre cube de métal... Le libre parcours moyen des dislocations diminue. A l'échelle macroscopique, le métal écroui sera moins déformable, plus raide.

Comme le déplacement du pli d'un tapis est bloqué par un autre pli sécant, les dislocations se bloquent réciproquement. Une augmentation de contrainte de déformation va donc faire naître des dislocations supplémentaires, puisqu'une partie des dislocations d'ori-

monocristal

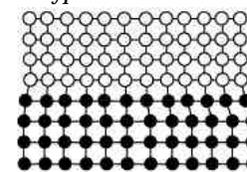


polycristal polyphasé

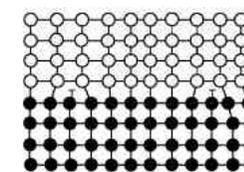


Polycristal monophasé

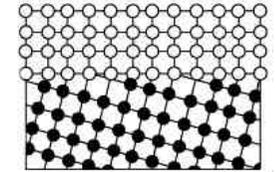
Dessus : polycristal monophasé. Dessous : joints de grain : trois types d'interface



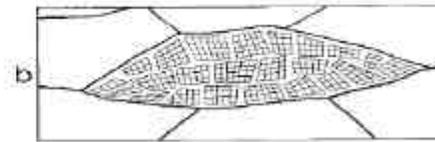
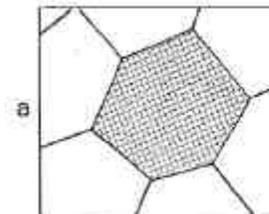
a) cohérent



b) cohérent avec dislocations d'interface



c) incohérent



écrouissage et fragmentation des grains

gine sont bloquées et ne permettent plus d'accomoder une déformation supplémentaire. Au cours de leur voyage, ces nouvelles dislocations vont interagir de plus en plus fréquemment avec des dislocation bloquées plus vieilles. Il vient un moment où tout est bloqué. Ce second mécanisme de durcissement, par la déformation, se nomme *écrouissage*.

Tout le monde sait qu'il est facile de casser un fil de fer en le tordant plusieurs fois. Le même phénomène rend très difficile le redressage d'un clou tordu : en effet, la zone déformée est devenue plus dure que les zones adjacentes, ce sont elles, si l'on tente de redresser, qui vont donc se tordre pour un effort plus faible que la valeur de l'effort de déformation de la zone nouvellement écrouie.

Au fur et à mesure que les cycles de déformation s'accumulent, le nombre des dislocations augmente. Au maximum, les dislocations sont tellement enchevêtrées qu'aucune d'entre elles ne peut plus se déplacer. On aboutit alors à une fragmentation des grains aboutissant à faire coexister des zones peu perturbées (cellules) et des zones désordonnées où se concentrent les dislocations (on parle de parois de dislocations). Les grains seront plus petits, les dislocations, bien qu'elles se réorganisent, sont toujours présentes. Il est évident que ce milieu ne sera que très difficilement traversé par les dislocations : la ductilité s'épuise.

L'étude des mécanismes de la rupture est à elle seule une branche spécialisée de la métallurgie. On peut néanmoins présenter la rupture comme la conséquence de cet épuisement. Lorsque l'effort appliqué a déformé le métal au point d'épuiser sa ductilité, de nouvelles accomodations de la déformation ne sont plus guère possibles ; les contraintes s'accumulent en un certain nombre de points critiques du fait de leur emplacement, de combinaisons particulières de la géométrie des grains et des dislocations, et dépassent la limite de cohésion de cet ensemble hétérogène appelé « métal ». Une première microfissure apparaît alors. Elle peut se produire à l'intérieur du grain, ou par décohésion des joints, selon la résistance relative des uns et des autres. Souvent, lorsqu'il existe des précipités dans l'acier (par exemple des particules de cémentite (*on les retrouvera plus loin*)), la rupture naît au contact de ces particules. Dès lors qu'une discontinuité apparaît dans le métal, les parois de la fissure agissent comme un levier, concentrant l'effort de déchirure au fond de la fissure : aussitôt entamée, la rupture est programmée pour la croissance.

Nous avons découvert jusqu'ici deux mécanismes influant sur la dureté d'un métal pur : par affinement du grain, et par écrouissage. Il en existe d'autres que nous allons examiner à présent.

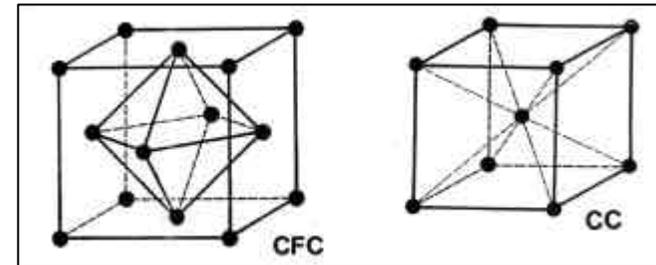
Solutions solides

Lorsque l'on parle de *solution*, liquide ou solide, on sait que l'on ne s'intéresse maintenant plus à un corps pur mais à un mélange d'atomes : le *solvant* (majoritaire), qui accueille le ou les *soluté(s)*.

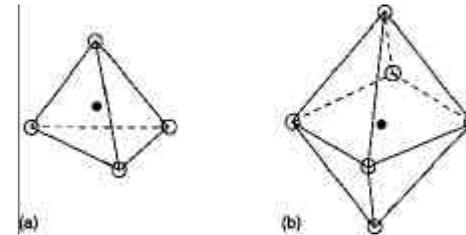
La géométrie de cristallisation des grains dépend de la nature du métal ou de l'alliage. Le système fer-carbone, qui nous intéresse dans le cadre sidérurgique, cristallise dans un système cubique : les atomes de fer sont répartis en motifs carrés qui sont les parois de cubes juxtaposés formant l'édifice cristallin de chaque grain.

Si l'on représente les atomes de fer par des sphères jointives, on constate qu'il existe des interstices entre les zones de contact. Dans ces espaces libres, des atomes de petite dimension peuvent venir s'insérer. Comme au sein d'un liquide dans lequel on peut « faire entrer » un autre corps (du sucre par exemple), on peut dissoudre certains éléments dans une matrice cristalline de fer : c'est ce que l'on appelle une *solution solide*.

Alors qu'il n'existe qu'une seule sorte de solution liquide (les molécules ou les atomes du liquide ne sont reliés par aucune géométrie définie), il existe deux sortes de solutions solides, puisque les atomes sont dans des positions fixées par la géométrie du cristal :



▲ structure CC (cubique centrée) et CFC. (cubique à faces centrées) ;
 ▼ sites d'insertion d'atomes de soluté (tétra et octaédriques).



- solutions d'insertion, lorsqu'un atome de l'élément d'alliage se glisse à l'intérieur du cristal élémentaire. Cela ne concerne que des atomes assez petits pour s'y faufiler¹⁰ : le carbone, l'azote par exemple. « Faufiler » est un bien grand mot : la taille de l'atome dépasse celle de l'interstice, et la présence de cet atome interstitiel « gonfle » la maille du cristal, rendant plus difficile le passage des dislocations. La solubilité des

¹⁰ On admet que le diamètre de l'atome soluté ne peut excéder 60% de celui des atomes du réseau cristallin

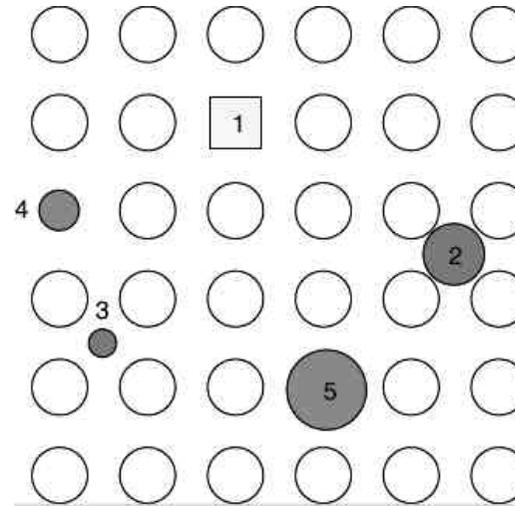
éléments d'insertion n'est cependant pas assez forte pour permettre une déformation interdisant complètement le passage : le durcissement par interstitiels n'a ainsi qu'une efficacité limitée.

- solutions de substitution : elles sont possibles quand l'atome à solubiliser a des caractéristiques ioniques semblables à celles du métal « solvant » : il peut alors se substituer à lui. La différence de dimensions¹¹ entre solvant et soluté (le fer et le phosphore par exemple) provoque évidemment des déformations du réseau cristallin qui gênent le trajet des dislocations.

Lacunes

La lacune est le contraire de la substitution : à la place impartie à l'atome dans le réseau cristallin, il n'y a rien. Cette absence déforme le réseau alentour, comme l'absence de soutènement déforme une galerie souterraine. On comprend que la présence de lacunes entrave le déplacement des dislocations et contribue à la dureté du métal.

¹¹ Pour que la substitution soit considérée comme possible, la taille de l'atome doit être dans une fourchette de +/- 15% par rapport à la taille de l'atome substitué.



Divers défauts ponctuels : (1) lacune, (2) auto-interstitiel, (3) interstitiel étranger, (4) & (5) substituants.

Certaines lacunes sont liées au déplacement d'un atome du réseau en position interstitielle : on appelle cette configuration *auto-interstitiel*. Les aciers soumis à un bombardement de particules (neutrons), dans les cuves de réacteurs de centrales nucléaires par exemple, subissent ce type de phénomène qui est à l'origine d'une évolution des caractéristiques du métal au cours du temps, prise en compte dans les calculs de dimensionnement des cuves. Une seule particule incidence peut ainsi déplacer mille atomes du réseau cristallin.

SOLLEZILS d'ACIER

Les phases allotropiques et leurs conséquences sur les solutions solides.

La géométrie du cristal de fer change en fonction de la température, on dit que le fer présente plusieurs « phases » auxquelles on a adjoint le terme « allotropiques » pour les distinguer des phases-états de la matière (solide, liquide, gazeux, plasma).

- A l'ambiante, (en fait de -273°C à 900°C environ), les atomes de fer sont rangés en un motif "cubique centré" : huit atomes de fer entourent un neuvième atome de fer placé au centre. La répétition du motif dans le grain fait que chaque atome de fer peut être considéré comme « centre » ou « coin ». Chaque atome de fer a donc huit « premiers voisins ». Cette structure est nommée *fer alpha*, ou *ferrite*.

- De 900°C à 1400°C , le motif change pour un réseau *cubique à face centrées*. Ici, chaque « panneau » carré constituant les parois du cube a quatre coins et un centre occupés chacun par un atome de fer, dont chacun a ainsi douze premiers voisins. Ce réseau est un peu plus grand que le réseau du fer alpha. C'est le *fer gamma* ou *austénite*.

- Au-delà de 1400°C et jusqu'au point de fusion

(1538°C pour le fer pur à pression atmosphérique), on retrouve une structure cubique centrée appelée *fer delta*.

Ces transformations sont réversibles : au cours d'allers-retours entre l'ambiante et 1500°C , on passera à chaque fois par les phases précitées. Dans le fer pur, les températures de transformation seront identiques à la montée et à la descente. Les solutions solides suppriment cette symétrie et génèrent une hystérésis (la température de transition « ascendante » sera plus élevée que la « descendante »). En effet, les atomes en solution solide ralentissent les réactions de transformation qui font intervenir la diffusion et il peut alors subsister, au retour à l'ambiante, une certaine proportion d'austénite non-transformée faute de temps.

La mise en solution solide d'éléments tels le carbone modifie globalement les températures de transition. C'est ainsi que le carbone est fortement *gammagène*, élargissant le domaine de températures dans lequel existe la phase austénitique.

Si l'on reprend la représentation des atomes sphériques, on constate qu'il y a davantage d'espaces vides dans la structure cubique à faces centrées que dans la cubique centrée ; on se doute que ces variations de géométrie en fonction de la température ne sont pas sans conséquence sur la facilité avec laquelle le réseau cristallin captera et conservera des atomes interstitiels. C'est ainsi que le fer gamma peut dissoudre jusqu'à 2% masse de carbone, tandis que le fer alpha n'en contient que cent fois moins (0,02%). Il en va de même pour

d'autres éléments tels que l'azote, ou bien des métaux, avec des valeurs différentes.

Comme il s'agit de températures usuellement rencontrées en sidérurgie, on se doute que de telles variations de solubilité ne seront pas sans conséquence. On en aura un exemple lorsque nous évoquerons la transformation martensitique.

Diffusion

Les atomes de soluté (carbone..) se déplacent dans le réseau de fer par diffusion. Bien que de même nature que la diffusion en milieu gazeux ou liquide, la diffusion dans les solides est plus lente ; elle est augmentée par la température. En raison des discontinuités fixes et des contraintes du solide cristallin, elle peut se faire dans des directions privilégiées. Parmi celles-ci, les défauts cristallins (dislocations, joints de grain) peuvent être prépondérantes. C'est ainsi que la diffusion permet aux éléments interstitiels (C, N) de migrer vers les dislocations et les joints qu'ils vont ancrer.

Même sans discontinuité du réseau cristallin, le système de cristallisation (i. e. la *phase allotropique*) a une grande influence : c'est ainsi que le carbone diffuse 100 fois mieux dans le fer alpha (cubique centré) que dans le fer gamma (cubique à faces centrées) : 100 fois plus vite dans la ferrite que dans l'austénite.

Précipités

Origine des précipités

Chacun a déjà sucré de l'eau : il vient un moment où le sucre ne se dissout plus et où les grains se déposent au fond. Prenons un verre d'eau chaude et dissolvons du sucre jusqu'à refus, transvasons la solution de sucre dans l'eau dans un autre verre sans y verser du sucre qui ne s'est pas dissous au fond du premier. Laissons refroidir. On constate qu'un dépôt de sucre précipite au fond du verre : l'eau a expulsé une partie du sucre qui y était dissous lorsque la température a diminué. Si l'eau retrouve sa température d'origine, le dépôt finit par disparaître : le précipité s'est dissous à nouveau.

Les mêmes phénomènes concernent les solutions solides, par le biais des changements de géométrie de l'édifice cristallin liés aux transformations de phases que nous avons déjà vues, et de la diffusion qui permet aux atomes, notamment de solutés, de se déplacer dans l'édifice. Du carbone, de l'azote ou d'autres corps en solution dans l'austénite, seront expulsés dès que le réseau cristallin reviendra à une géométrie cubique centrée moins accueillante. Une partie du carbone expulsé au cours de cette transformation est repris en solution solide dans l'austénite non-encore transformée ; comme le carbone est gammagène, l'écart de transformation gamma-alpha s'accroît graduellement au cours de la transformation pour les mailles restées austénitiques. Cependant, la plus grande partie de l'austénite se transforme en ferrite, et

SOULEZ-VOUS D'ACIER

le rejet de carbone se fait à l'interface gamma-alpha au fur et à mesure de son déplacement¹². Si la vitesse de refroidissement est faible, la diffusion permet au soluté de migrer vers des régions favorables à leur rassemblement : dislocations, joints de grain ; en quantité suffisante, ils vont se condenser en précipités. Ceux-ci peuvent *coalescer*, c'est-à-dire se regrouper en accumulations plus grosses mais moins nombreuses.

Pour des vitesses de refroidissement plus rapides, les distances parcourues par une diffusion plus brève seront moins longues : il va donc apparaître, dans le grain, de petits amas disséminés d'atomes de l'ex-soluté. Des précipités visibles peuvent apparaître. Dans le cas du carbone, il se forme des plages de composés covalents (i.e. d'atomes reliés par des liaisons covalentes et non plus métalliques) de fer et de carbone, dont le principal est la cémentite Fe_3C . Selon la vitesse de refroidissement et la teneur de carbone, la cémentite se retrouve sous plusieurs formes :

¹² Le carbone expulsé par le fer transformé est d'ailleurs absorbé par l'austénite encore présente, dont la solution solide s'enrichit donc encore en carbone : ce qui contribue à modifier graduellement sa température de transition (effet gammagène du carbone) et donc à augmenter l'intervalle de température de la transformation globale).

. lamelles régulièrement disposées dans une matrice de ferrite, selon des épaisseurs relatives qui reflètent le carbone contenu respectivement dans les formes alpha-gamma du fer et dans la cémentite. Par exemple, pour un contenu en carbone de 0.77% masse, les lames de cémentite (contenant 6.67% masse de carbone) seront 6 fois plus minces que les lames de ferrite (0.02% masse carbone). On appelle cette configuration ferrite-cémentite lamellaire de la « perlite » ;

. précipités¹³ arrondis de cémentite pure ;

Pour des vitesses de refroidissement encore plus importantes, la diffusion du carbone se fera sur des distances de plus en plus courtes, modifiant le faciès des précipités ; au-delà d'un certain seuil de vitesse, il se produit un changement radical : le carbone n'a plus le temps de sortir du réseau cristallin. C'est la transformation en phases « hors d'équilibre », telles que la martensite, qui sera abordée plus loin dans le texte.

Influence des précipités sur l'aptitude à la déformation

La présence d'une particule de cémentite dure dans une ma-

¹³ En métallurgie, le terme « précipité » désigne habituellement des particules de petite taille. Pour simplifier, nous avons nommé sous ce terme les particules de toutes tailles.

trice ferritique molle y constitue un nouveau type de défaut et aboutit à un durcissement du métal. Pour reprendre encore une fois notre analogie du pli sur un tapis, un précipité se comporte comme un gros livre posé sur le tapis : le pli ne passe pas car le livre ne peut se déformer pour accompagner le mouvement du tapis. On comprend bien que quelques gros livres espacés permettront quand même de faire circuler de petits plis : les précipités de grande taille, surtout lorsqu'ils sont arrondis, ne bloquent pas complètement les dislocations et ne durcissent donc que modérément l'acier ; par contre, si le tapis est parsemé d'un champ serré de petits obstacles, aucun soulèvement ne sera plus possible : une dispersion fine de précipités durcit considérablement l'acier.

Lorsque les précipités se déposent aux joints de grains (comme l'aluminium ou le titane ajoutés en métallurgie secondaire forment des *nitrides* avec l'azote dissous dans l'acier), ils ont une autre action : ils fixent les joints de grain et empêchent leur déplacement, interdisant le grossissement du grain lors d'un réchauffage en phase austénitique. Le durcissement par affinement du grain sera ainsi préservé.

D'autres types de précipités peuvent se former, par exemple :

- le soufre et le manganèse donnent MnS. Composé à

bas point de fusion, MnS fond sous l'effet du dégagement de chaleur provoqué par la déformation du copeau par l'outil de coupe et en facilite le détachement et l'évacuation. Les aciers spéciaux destinés à l'usinage comportent ce type de précipité.

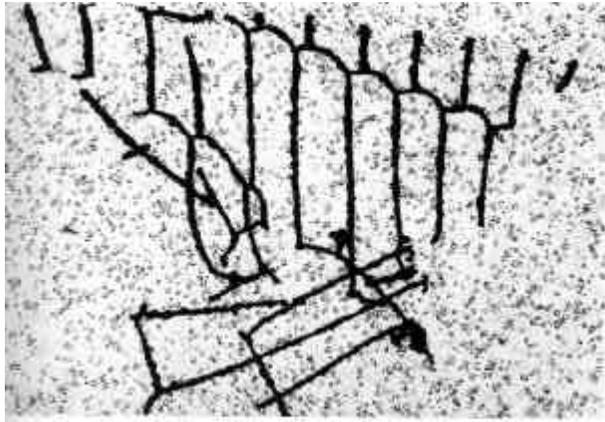
- le niobium, le carbone et l'azote donnent Nb(C,N), carbonitride de niobium ; lorsqu'ils sont formés dans l'austénite, à haute température, et que le refroidissement est lent, ces précipités sont gros et peu durcissants. Si l'on réchauffe le produit obtenu jusqu'à transformation austénitique, on observe une remise en solution ; un refroidissement plus rapide peut alors intervenir, précipitant le carbonitride de niobium en petits amas dispersés : pour cette raison, on appelle ce type d'acier *acier à dispersaï des*.

- le soufre donne, avec le fer, le sulfure de fer. Le soufre est évité sous cette forme en raison de l'existence de phases soufrées à bas point de fusion exposant à une fragilité à la chaleur, des difficultés de laminage et pour des considérations de corrosion.

Précipités, solutions solides, diffusion et vieillissement

Nous avons vu plus haut que les atomes en solution solide d'insertion étaient plus grands que les sites interstitiels de la matrice. Du fait de ce « gonflage », la stabilité de la solution

solide n'est pas absolue : sous l'effet de températures modérées¹⁴ et prolongées, l'atome interstitiel a tendance à en être chassé. Il se déplace dès lors par diffusion dans l'édifice cristallin, et va naturellement se déposer en précipités à l'extérieur, ou bien migrer vers les



précipitation de carbure de chrome sur les dislocations (micrographie électronique sur réplique extractive x10000. Cl. G. HENRY (IRSID))

¹⁴ C'est le processus à l'origine du «bake-hardening», lors de la cuisson après peinture, à 170-200°C, des carrosseries en acier à carbone interstitiel, qui amène un gain significatif en limite d'élasticité et résistance à l'indentation.

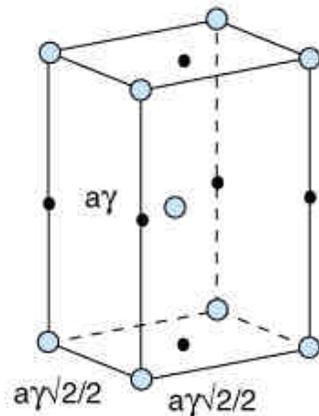
dislocations qu'ils va contribuer à ancrer.

Ce phénomène, appelé *vieillissement*, est à la base d'un certain nombre de traitements thermiques de l'acier.

Transformations austénite @ phases hors d'équilibre. Martensite, bainite.

Prenons, par exemple, une matrice d'austénite à 1200°C contenant des interstitiels de carbone. Si l'on refroidit lentement, nous avons vu que le carbone sort du réseau au cours de la transformation austénite-ferrite, diffuse et donne des précipités plus ou moins gros selon que la vitesse de refroidissement donne aux atomes expulsés le temps de se regrouper par diffusion. Si la vitesse de refroidissement dépasse une certaine valeur, il advient que le carbone n'a plus le temps de sortir du motif cubique à faces centrées en cours de transformation vers la géométrie cubique centrée. Du carbone va par conséquent rester « en trop » dans les mailles de la matrice de fer, en la déformant tellement que le résultat ne sera plus de la ferrite, mais une structure appelée *martensite*. En contexte industriel, on obtient de telles structures lors des opérations de *trempe*. La cellule cristalline est déformée en cisaillement et distordue ; ces changements dimensionnels induisent aussi des contraintes autour des zones transformées. On se doute que cet état de «contrainte» est moins stable que la forme ferrite-perlite : on parle d'état *hors-équilibre*.

Observons une maille de martensite. C'est un cristal cubique¹⁵ centré (nous sommes de retour dans le fer alpha) « gonflé » de carbone, dont les liaisons métalliques sont tendues telles des élastiques en limite de rupture. Ces liaisons n'ont plus de capacité d'allongement : plus assez pour leur permettre les petites variations nécessaires au passage d'une dislocation. On comprend dès lors pourquoi la martensite est si dure. L'image des élastiques tendus à la limite de rupture évoque également assez bien la fragilité de la martensite qui résiste très mal aux chocs. (on parle d'une mauvaise *résilience*).

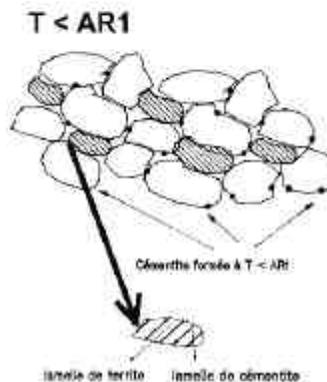
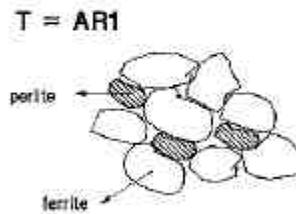
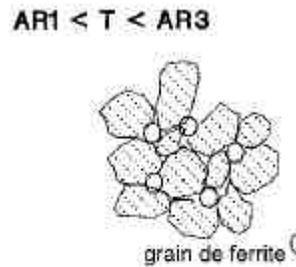
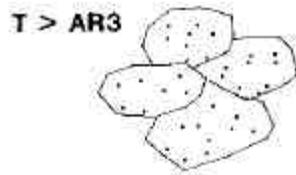


Maille quadratique de martensite

¹⁵ Cube auquel la déformation martensitique donne une forme allongée en « boîte à chaussures », appelée *quadratique*.

Si un métal entièrement martensitique est trop fragile pour l'utilisation choisie, on peut régler les conditions de refroidissement afin d'obtenir la transformation d'une proportion donnée d'austénite en martensite : la vitesse de transformation n'est pas rigoureusement uniforme pour toutes les mailles d'un grain, ni pour tous les grains, en raison notamment des facteurs d'environnement qui s'exercent inégalement sur eux (présence ou non d'une dislocation à proximité, d'un précipité, contraintes dans certaines parties du réseau). Les premières mailles transformées en ferrite expulsent le carbone qu'elles ne peuvent plus garder ; ce carbone se retrouve dans les zones encore austénitiques, abaissant leur température de transformation et faisant de ces mailles des zones privilégiées d'accumulation du carbone. Si le refroidissement est suffisamment lent autour de 600°C, les grains de ferrite transformée grossissent et enrichissent les zones encore austénitiques. Il vient alors un moment où la température de transformation est atteinte pour ces zones riches en carbone. Le résultat sera encore une fois une transformation martensitique. On obtient alors des îlots de martensite dure noyés dans une matrice ferritique molle, éventuellement durcie par la solution solide résiduelle de carbone ou d'autres éléments. Le résultat est un acier *dual-phase*. D'autres combinaisons de température de départ, température de fin de trempe et vitesse de refroidissement donnent naissance à d'autres structures hors d'équilibre plus ou moins apparentées à la martensite appelées *bainite*, *troostite*, *sorbite*...

SOLEILS D'ACIER



Transformations de phase et solutions solides.

Au-dessus de $AR3$ (température de transformation variant avec la composition), le carbone est en solution solide dans l'austénite.

Entre $AR3$ et $AR1$ se forment les premiers grains de ferrite. Cette phase rejette le carbone, produisant un enrichissement de l'austénite résiduelle.

A la température $AR1$, l'austénite résiduelle se transforme en perlite.

En-dessous de $AR1$, le carbone encore en solution dans la ferrite (4% à $AR1$, 0,006% à l'ambiante) précipite sous forme de cémentite au cours du refroidissement.

Une structure de plus en plus utilisée en sidérurgie contient de la bainite, il s'agit d'un mélange non-lamellaire de ferrite et de carbures de diverses morphologies dont la cémentite.

Germination, recristallisation, grossissement du grain, restauration.

Nous avons vu que la microstructure de l'acier (dislocations, phases cristallines, précipités, solutés, taille des grains) gouverne entièrement les caractéristiques mécaniques de l'acier. C'est donc à ce niveau que le métallurgiste choisit d'agir pour produire le métal qui remplira les besoins du client.

Dans la nature, toute chose tend vers l'équilibre. Il est important de comprendre que tout déséquilibre (concentrations de contraintes, d'atomes, etc) telles les phases métallurgiques hors d'équilibre aura tendance à évoluer au cours du temps, soit spontanément, soit sous l'effet d'une stimulation extérieure telle que la température. Cette évolution se fait toujours dans le sens d'un retour plus ou moins partiel vers l'équilibre. Cette notion est à la base des principes qui gouvernent les transformations métallurgiques exploitées en fabrication.

Germination

Au cours du laminage, les grains prennent une forme aplatie. Quand la déformation intervient à chaud, on observe la

germination de nouveaux grains sur les joints des grains déformés. Dans des circonstances favorables, ces nouveaux grains vont croître aux dépens des anciens. D'après ce que nous savons déjà, il est évident que selon la taille des grains, influant sur la liberté de mouvement des dislocations, le métal sera plus ou moins dur.

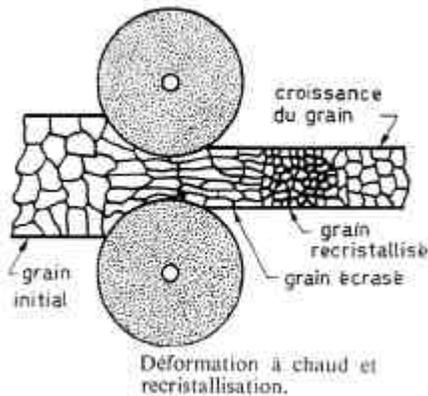


schéma : formes du grain au cours du laminage à chaud

Recristallisation

La recristallisation est un phénomène qui implique des déplacements d'atomes par diffusion, elle est donc dépendante de la température. Elle se produit au cours des recuits, mais aussi sur la ligne de laminage à chaud, à partir de germes. Selon la température, cette germination de nouveaux grains apparaît au niveau des dislocations accumulées et des joints.

L'écroutissage est donc annulé par les hautes températures, qui provoquent également un regroupement des grains en éléments plus gros. En particulier, l'austénite recristallise plus ou moins complètement en fonction de la température atteinte. L'addition de certains éléments dans des circonstances précises, par exemple le titane (en évitant la présence d'azote qui le fixe) ou le niobium peut ralentir ou modifier cet effet. Le niobium en solution solide dans l'austénite retarde la recristallisation au cours du laminage à chaud : on a une conservation de l'écroutissage de l'austénite, alors que dans des conditions normales, la recristallisation est si rapide qu'elle a le temps de s'accomplir durant les quelques fractions de seconde du trajet entre deux cages de laminage. L'austénite écroutie est transformée en fin de laminage, par le refroidissement d'un arrosage ; le trajet thermique est réglé exactement de manière à obtenir la combinaison optimale de dureté et de résilience en obtenant une certaine fraction de bainite ou de martensite dans la matrice ferritique écroutie.

SOLEILS d'ACIER

L'intérêt de ces aciers *micro-alliés* (de quelques ppm¹⁶ à plusieurs centaines de ppm) au niobium est de permettre d'obtenir à *chaud* une opération d'écrouissage normalement effectuée à froid, sur un outil séparé, et dans une gamme d'épaisseur inaccessible au laminage à froid.

Grossissement du grain

Après naissance des nouveaux grains, leur croissance sera fonction du maintien à chaud¹⁷. Comme les bulles d'un bain moussant ont tendance à fusionner les unes dans les autres, et pour les mêmes raisons de tension interfaciale, les grains grossissent. Cette croissance, impliquant des remaniements et une mobilisation des joints de grains, est inhibée par les précipités et les éléments épinglant les joints de grain (par exemple, comme on l'a vu, aluminium ou titane formant avec l'azote AlN ou TiN). Mais le principal élément de contrôle du grossissement du grain est l'aluminium, en-dehors de son rôle de *calmage* de l'acier par con-

sommation de l'oxygène dissous.

Restauration

Pour des températures plus faibles, (400-500°C), contrairement à la recristallisation, on n'observe pas de germination de nouveaux grains ni leur grossissement, mais un simple réarrangement des défauts (annulation de dislocations opposées, arrangement et alignement de dislocations). Il en résulte une diminution de l'écrouissage. La restauration diminue ainsi les contraintes internes (relaxation).



Nous avons ci-dessus : défini ce qu'est un métal ; expliqué pourquoi les métaux sont malléables ; nous avons défini que sa dureté était le reflet de la difficulté avec laquelle pouvaient glisser les plans d'atomes et donc circuler les dislocations ; examiné les différentes manières de bloquer ces dislocations à l'aide de différents types d'obstacles : autres dislocations (écrouissage), joints de grains (durcissement par affinement du grain), déformation du réseau (par solution solide) ; par

¹⁶ Parties par million.

¹⁷ Certains éléments d'alliage tendent à ralentir cette recristallisation, tel le niobium, que l'on ajoute si l'on veut garder un grain fin et une austénite écrouie.

formation de précipités (vieillessement).

Nous avons donc acquis les connaissances de base nécessaires pour entrevoir les principes concrets des opérations métallurgiques. Nous allons concrétiser ces connaissances nouvelles en suivant de l'intérieur du métal les opérations de préparation de deux spécialités de Fos : 100Cr6 et fil Fos 8.8. Et c'est cette vue de l'intérieur qui nous fera comprendre les opérations décrites dans les chapitres ultérieurs, consacrés aux ateliers de l'usine.

METALLURGIE DE DEUX SPECIALITES D'ASCOMETAL-FOS¹⁸

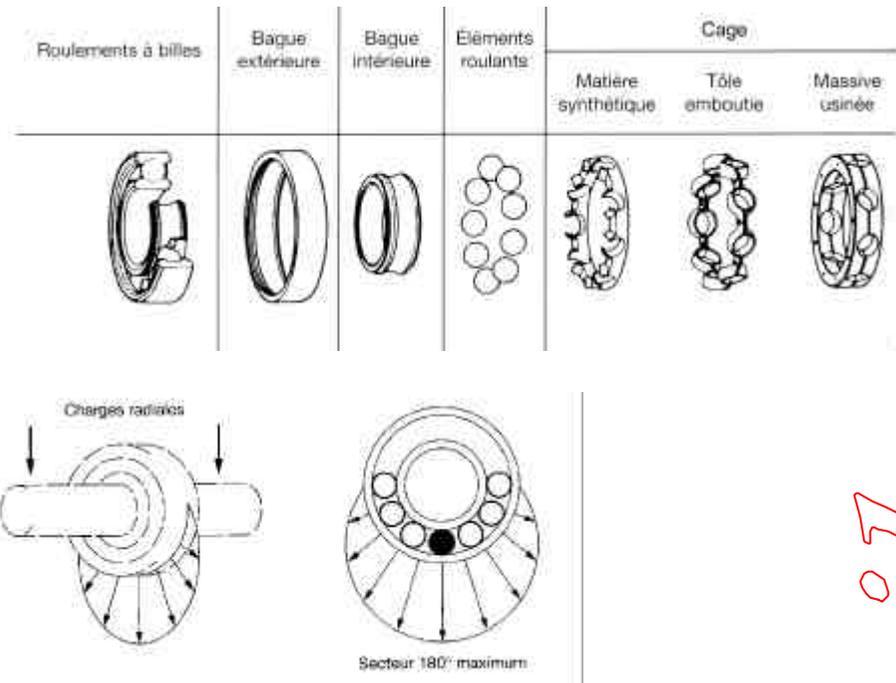
L'acier à roulements 100Cr6

Comment travaille l'acier dans le roulement

Rechercher le meilleur acier pour roulement revient à analyser le contact corps roulant-bague.

Lorsque qu'une charge radiale est appliquée au roulement, les billes ont tendance à « s'imprimer » dans la

▼ *anatomie du roulement (docs SNR)*



▲ *forces de contact sous charge radiale pure*

¹⁸ Les valeurs numériques sont extraites du livre « les Aciers Spéciaux »

SOLEILS UN ACIER

bague. Il est évident que la dureté de la bille et de la bague est nécessaire à préserver leur géométrie et à les empêcher de s'écraser l'une sur l'autre.

Observons ce qui se passe dans l'épaisseur de la piste de roulement de la bague. Découpons par l'imagination cette épaisseur en tranches infiniment minces. Si dur que soit l'acier de cette bague, la tranche superficielle de la piste subit une déformation élastique qui absorbe une partie de l'effort reçu¹⁹, et transmet le reste vers la tranche sous-jacente, et ainsi de suite. Le phénomène se produit à chaque passage d'un corps roulant, avec retour élastique entre deux passages. Dans l'épaisseur de la tranche, le phénomène s'analyse donc comme une flexion alternée, de rayon croissant avec la profondeur. Les pressions sont très élevées (plusieurs GPa, soit quelques dizaines de milliers de fois la pression atmosphérique), et le nombre de cycles est proportionnel au nombre de tours de roue multiplié par le nombre de billes du roulement !

La résistance de la bague s'analyse donc comme une résistance à la fatigue en flexion dans l'épaisseur de la couche de roulement. Cette partie du problème est

¹⁹ Une autre étant le reflet de la *compression* des couches sous-jacentes.

analogue à celui qui se pose dans les aciers pour ressorts.

Fatigue

A l'intérieur de chaque tranche, le réseau cristallin subit une déformation élastique. Tant que ce réseau est homogène, la déformation est réellement élastique et harmonieuse. La présence d'une discontinuité (inclusion moins dure ; à l'extrême, une porosité, inclusion plus dure) modifie cette déformation en focalisant des contraintes qui vont peut-être dépasser localement la limite d'élasticité de la matrice. Il y aura création d'une ou plusieurs dislocations. A partir de ce moment-là, la déformation commence ; elle conduit à un écoulement du métal par rapport à l'inclusion, et donc à l'accumulation de dislocations dont le blocage finit par provoquer une rupture franche (fissure). Encore quelques millions de cycles et l'on observera macroscopiquement un écaillage, qui traduit l'entrée en agonie du roulement.

La nocivité des inclusions est une fonction faisant intervenir simultanément la taille, la dureté, la dispersion, la forme (présence d'angles concentrant les contraintes par effet d'entaille) des inclusions.

Conséquences métallurgiques

Il résulte de ce qui précède que les caractéristiques recherchées sont la dureté et l'absence d'inclusions. De ce fait, la métallurgie des aciers pour roulement est «relativement»

simple, et les principales difficultés de son élaboration sont d'ordre technologique et de rigueur opérationnelle (pureté inclusionnaire).

La dureté est obtenue par une structure globalement martensitique, à grain très fin, durcie par des précipités covalents de carbure de chrome $Cr_{23}C_6$ que l'on s'arrange pour doter d'une morphologie arrondie. (globulisation par recuit).

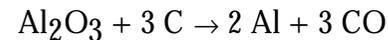
La route métallurgique de l'acier 100Cr6.

- ◆ **Métallurgie primaire** : elle n'appelle pas de remarque particulière, il s'agit d'obtenir un acier de composition telle qu'au terme des opérations métallurgiques, il contienne 1% de carbone (en réalité 0,9%) et 1.5% de chrome.
- ◆ **Métallurgie secondaire** :

. Affinage en Poche Chauffante : le brassage métallurgique a pour but principal de permettre une bonne décantation des impuretés non-métalliques en suspension dans le bain : débris de réfractaires du four, particules de laitier primaire entraînées lors de la coulée, oxydes liés à l'action d'oxygène mis au contact du bain... Il n'existe pas de contrainte particulière sur le soufre dissous puisque son élimination n'est pas rendue nécessaire par des considérations de corrosion

chimique, de tenue en température ou de ductilité ; une teneur comprise entre 50 et 150 ppm favorise une certaine usinabilité de cette nuance très dure (découpage des bagues). L'A.P.C permet également d'ajuster la température de coulée. La captation de ces impuretés se fait par piégeage dans la couche de laitier de poche créée lors de la coulée afin de couvrir l'acier et le protéger de l'air ambiant et de ralentir le refroidissement.

. Dégazage sous vide : L'oxygène dissous à la suite de la phase oxydante de la métallurgie primaire doit être éliminé. Si d'autres nuances sont désoxydées à l'aluminium (calmage), cette opération conduit à la formation d'inclusions d'alumine très dures, réfractaires (solides à 1600°C) et de forme anguleuse à proscrire dans cette application, pour les considérations de résistance à la fatigue déjà évoquées. Un calmage par silicium ne conviendrait pas non plus car la silice formée s'étale lors du laminage à haute température et provoque l'apparition de larges discontinuités du métal qui le fragilisent. On est donc conduit à favoriser un autre mode d'évacuation de l'oxygène, par dégazage sous vide : l'oxygène se combine alors avec du carbone dissous dans le bain et se dégage sous forme de monoxyde de carbone dans le dégazeur. On note aussi la possibilité de réduction de l'alumine par le carbone dans les conditions qui règnent dans le RH, selon la réaction :



SOULEZILS D'ACIER

L'aluminium libéré étant un désoxydant puissant, il peut se recombinaer à de l'oxygène dissous dans l'acier en redonnant de l'alumine, à nouveau recyclée en aluminium dans l'enceinte du RH. Rappelons que l'aluminium dans l'acier aura un rôle dans le contrôle du grossissement du grain.

Le RH est un outil privilégié dans la mesure où le dégazage, qui entraîne une forte agitation du bain (dégagement des bulles), se fait hors de la poche et donc sans brassage avec le laitier de couverture, dont des particules risqueraient sinon d'être entraînées dans la profondeur de la poche, et ensuite piégées dans le métal du lingot. Le dégazage sous vide permet également d'éliminer une partie de l'azote qui forme des précipités de nitrures ou de carbonitrures très durs et anguleux. A noter que la présence de soufre diminue l'efficacité de la dénitruration par le vide.

Evidemment, la désoxygénation par le vide consomme du carbone, il faut tenir compte de cette décarburation au niveau de la nuance primaire obtenue au four à arc.

- ♦ **solidification après la coulée** : La coulée est particulièrement soignée vis-à-vis des inclusions : on évite le passage de laitier de poche vers la lingotière ; les érosions de lingotière et les reprises en oxygène par des fuites ou porosités des réfractaires de coulées sont à proscrire. Le jet de

coulée est protégé par un inertage à l'argon. La vitesse de coulée a aussi son importance vis-à-vis de la ségrégation chimique (voir les paragraphes concernant la coulée dans le chapitre 12). On évite de déplacer les lingotières avant solidification complète. Lors de la solidification, la structure de grains obtenue est celle d'un acier à haut carbone non-corroyé. (ferrite et larges plages de perlite en grains de grande dimension).

- ♦ **le lingot démoulé** est ensuite réchauffé en four Pit vers 1250°C, et laminé en blooms, qui subissent un flammage (scarfing) afin de gommer les défauts de surface. Les blooms sont ensuite remis à température de laminage et transformés en barres rondes à livrer au tubiste et en billettes alimentant le train à fil.
- ♦ **le laminage à chaud** des ronds en tubes transforme évidemment la structure du métal, qui ne peut de ce fait être fixée chez le sidérurgiste. Ceci ayant l'avantage de permettre d'effectuer toutes les opérations d'usinage sur un métal qui n'a pas encore acquis sa dureté nominale.
- ♦ **le tube terminé** est ensuite découpé à froid, chez le roulementier, en bagues dont les futures surfaces de contact avec les billes sont polies (toute aspérité étant un départ potentiel de fracture de fatigue).
- ♦ **Les corps roulants** (billes, rouleaux...) sont produits à partir de fil-machine élaboré dans la même nuance. Ce fil

VOYAGE AU CŒUR DE L'ACIER

-25-

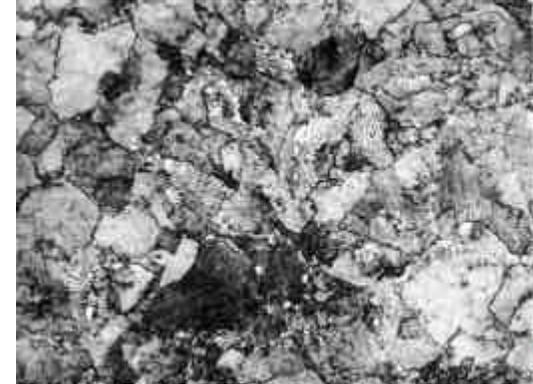
subit un recuit de globulisation destiné à favoriser la mise en forme (billes) ;

- ◆ **Les bagues et les corps roulants terminés** subissent le traitement thermique destiné à donner la structure métallurgique finale. Ce traitement consiste en une trempe suivie d'un revenu. Lors de la trempe, un réchauffage des pièces ramène une dernière fois le métal en phase austénitique (compte tenu de la concentration en carbone et en chrome, la température est de 830°C). Le carbone et le chrome de la cémentite sont remis en solution solide dans le fer gamma. Puis le métal subit un refroidissement rapide, qui a pour effet, comme on l'a vu, de provoquer la formation d'une martensite.

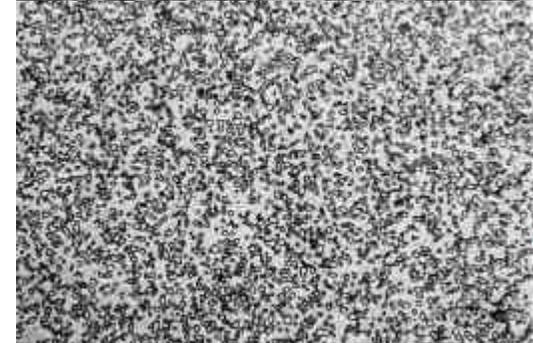
Un revenu à 170°C assure la précipitation du carbone, et donne au métal son faciès métallographique final, une martensite fine parsemée de fins carbures de type cémentite $(FeCr)_3C$ et libérée des contraintes internes. La bague ou le corps roulant est dès lors disponible pour le montage.



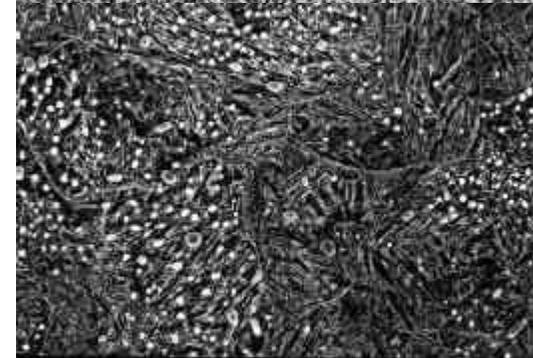
Acier 100Cr6 brut de coulée



Acier 100Cr6 après globulisation (fil)



Acier 100Cr6 final : martensite semée de fins carbures.



Photos : CREAS.

SOLEILS d'ACIER

L'acier Fos 8.8 pour visserie.

Caractéristiques recherchées dans les aciers pour visserie

La fabrication des fixations (vis, rivets, écrous, etc) se fait par découpe et frappe à froid sur fil-machine. Nous nous intéresserons à la fabrication d'une vis à haute résistance dont l'exemple-type est la vis de roue automobile.

La fabrication par frappe à froid nécessite des caractéristiques contradictoires : la fabrication nécessite une bonne²⁰ ductilité, tandis que les performances demandées au produit fini requièrent une grande résistance. Il est donc évident que l'acier devra pouvoir subir un traitement assurant un changement de dureté *après* les étapes les plus contraignantes de mise en forme.

Jusqu'aux années '70, les aciers pour fixation étaient des aciers relativement riches en carbone. Après leur laminage, ces fils subissaient un *recuit de globulisation* donnant à ce stade de gros précipités (essentiellement

²⁰ Bonne par rapport aux aciers de construction, qui sont des aciers durs. Aucune commune mesure avec les aciers plats pour emboutissage profond...

de la cémentite) arrondis. Ces aciers étaient alors suffisamment ductiles pour subir la mise en forme. Une trempe suivie d'un revenu assurait ensuite la mise en place des caractéristiques de résistance demandées sur les pièces finies : le chauffage précédant la trempe proprement dite remettait les précipités en solution solide à la faveur du retour en phase austénitique, la trempe provoquait la formation d'une martensite dont le revenu atténuait la fragilité en assurant la relaxation (par microfluage) des contraintes internes les plus fortes.

La transposition dans le domaine du fil-machine d'une métallurgie qui a vu le jour dans les tôles à haute résistance pour pipe-line a permis de bénéficier de ces aptitudes contradictoires tout en supprimant la phase de traitement thermique de durcissement après mise en forme. Ce traitement après la frappe à froid ne pouvait se faire que chez le client ; lui fournir un acier apte à fabriquer son produit tout en le débarrassant de ce traitement thermique est un puissant argument commercial.

La nuance « 8.8 » assure *successivement* la ductilité pour mise en forme à froid et la résistance en service. Ayant supprimé le traitement thermique post-formage, on va assurer l'accroissement de dureté par le seul écrouissage de mise en forme. La composition chimique de l'acier sera de 0.2% de carbone, 1.2% de manganèse, avec du titane et du bore en micro-alliage. On vise sur le produit une microstructure de ferrite-perlite en grains fins. La sensibilité de l'acier à l'écrouissage

sera assurée par de minimes additions (0,01% ou moins) de bore. L'affinement du grain sera assuré par le titane et l'aluminium qui, comme on l'a vu, fixent les joints de grains et empêchent ainsi le grossissement. La ductilité du fil livré au client est le résultat d'une faible densité de dislocations, de la désoxydation, de la désulfuration poussée dans une structure à grains fins.

Lors de la frappe à froid, qui est une opération de forge à froid à grande vitesse de déformation, l'écroutissage intervenant sur cette structure à grains fins conduit à un durcissement considérable, puisque la migration des dislocations bute rapidement sur les joints de grains « épinglés » par les éléments de micro-alliage.

Pour des nuances plus résistantes encore que le 8.8, on utilisera une métallurgie à base de bainite ou biphasée ferrite-martensite que nous avons déjà évoquées. A noter que les fameuses cordes à piano, qui doivent résister à des tractions axiales très importantes (1800 MPa et plus), sont réalisées à partir d'acier ferritique à

grains fins écroui par le tréfilage²¹.

La route métallurgique de l'acier 8.8

- ♦ **La métallurgie primaire** fournit un métal à bas carbone et manganèse.
- ♦ **En métallurgie secondaire**, on ajoute les éléments de micro-alliages avec une grande précision (niobium et bore) et l'on élimine les inclusions qui seraient néfastes à la tenue en fatigue.
- ♦ **Après la solidification** du métal, le laminage contrôlé s'applique à un métal dont le niobium retarde la recristallisation dynamique de l'austénite et permet donc d'écrouir l'austénite (et donc affine le grain) tandis que le bore augmente la trempabilité. A ce stade, le fil de notre exemple est à un diamètre de 11,5 mm.
- ♦ **Le tréfilage** confère au produit son calibre définitif de 10,3 mm. Le fil est alors livré au client. Chez le client, le

²¹ Dans le domaine du fil pour carcasse de pneumatiques, on parvient à des résistances en traction de 3600 MPa au prix de tréfilages entrecoupés de traitements intermédiaires. La fabrication d'un tel produit requiert des caractéristiques du métal de base que seule peut actuellement fournir la voie-fonte.

SOLEZILS D'ACIER

fil, après avoir été débité en lopins, subit une frappe à froid en trois phases assurant la mise en place de la tige et de la tête.

Cette gamme de fabrication concentre les zones les plus écrouies au niveau des zones de rétreint ; ce sont celles où se concentrent les efforts sur la pièce finie.

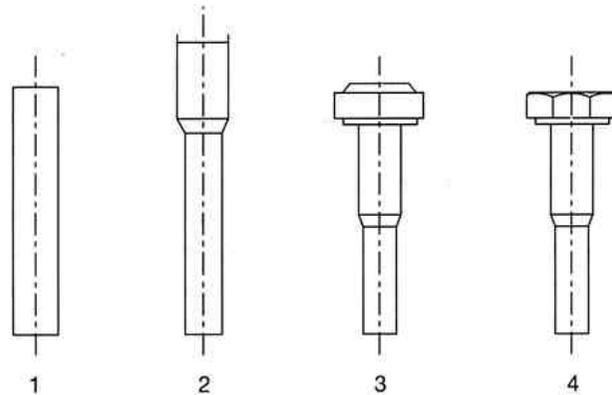


Schéma : fabrication de la vis de roue

Bibliographie

BERANGER & Al., « Les Aciers spéciaux », Tec et Doc Lavoisier, 1997.

BERANGER & Al., « Le Livre de l'Acier », Tec et Doc Lavoisier, 1996

BISANTI O., « Ugine-sur-Mer », Soleils d'Acier, 2001.

LAFRANCE M., « Propriétés d'emploi des tôles fortes en acier : relations entre structures et propriétés », Rev. Met. CIT, juillet 1999

LAFRANCE M., « Propriétés d'emploi des tôles fortes en acier : influence des conditions de fabrication », Rev. Met. CIT, janvier 2000

PHILBERT & Al., « Métallurgie, du minerai au matériau », Masson 1997.

SOLMER, « Cours de Métallurgie » (édition interne).

