

système hors de l'équilibre évoluera au cours du temps. Pour un système donné, le diagramme de phase ne représente donc que l'état de l'alliage dont l'énergie totale est la plus faible. Puisque cet état le plus stable n'est obtenu que par diffusion à l'état solide, il ne peut guère être atteint que si le refroidissement est lent ou si l'alliage est maintenu à la température considérée pendant un temps suffisamment long. Par contre, si le refroidissement est rapide, la structure n'a pas le temps, par diffusion, d'atteindre l'état prévu par le diagramme de phase, elle conserve alors son état initial ou elle adopte un état intermédiaire.

On obtient le *durcissement structural* grâce à une série de chauffages et de refroidissements contrôlés, c'est-à-dire grâce à des *traitements thermiques* dont le but final est l'obtention d'une répartition optimale des précipités dans la matrice. Les propriétés mécaniques des alliages ainsi traités dépendent de la répartition des précipités, de leur taille et de leur distance moyenne.

Nous étudierons ici le durcissement structural de l'alliage d'aluminium qui contient 4,5 % de cuivre (appelé commercialement *duralumin*), car il constitue un exemple classique d'alliage à durcissement structural. Les principes et les mécanismes qui entrent en jeu dans ce cas s'appliquent également à un grand nombre d'alliages.

La figure 6.9 présente une partie du diagramme d'équilibre du système Al-Cu (partie riche en aluminium). Dans ce diagramme, la ligne du solvus représente, à l'équilibre, la limite de solubilité du cuivre dans l'aluminium ; à gauche de cette ligne, il y a une solution solide  $\alpha$  (solution de cuivre dans l'aluminium) et, à droite, outre la phase  $\alpha$  (la matrice), une seconde phase :  $\text{CuAl}_2$ , notée  $\theta$  et contenant 53 %m de cuivre. Ainsi, à 400 °C, par exemple, la solubilité maximale, à l'équilibre, du cuivre dans l'aluminium est de 1,8 %, et le reste du cuivre est précipité sous forme de  $\text{CuAl}_2$ . À cette température, la proportion massique de  $\text{CuAl}_2$  dans la matrice est de 5,2 % pour un alliage à 4,5 % de cuivre, alors qu'à la température ambiante (température à laquelle la solubilité du cuivre dans l'aluminium est de l'ordre de 0,1 %), cette proportion de  $\text{CuAl}_2$  est de 8,2 %. Ces conditions d'équilibre sont respectées lorsqu'on laisse à l'alliage tout le temps nécessaire pour que, au cours du refroidissement, les atomes de cuivre se répartissent par diffusion entre l'aluminium et les précipités  $\theta$  ; c'est pourquoi le refroidissement doit être très lent. Par contre, lorsque le refroidissement est rapide, les conditions sont hors d'équilibre ; on ne peut par conséquent plus prédire ni la composition ni la proportion relative des phases en présence au moyen du diagramme d'équilibre.

Lorsqu'on chauffe l'alliage (Al-4,5 % Cu) à une température à laquelle tout le cuivre est dissout dans l'aluminium (en phase  $\alpha$  entre 510 et 570 °C), et ce pendant un temps suffisant pour que la dissolution du cuivre dans l'aluminium soit complète, on obtient une solution solide homogène Al-Cu. Ce traitement s'appelle une *mise en solution*. On doit toujours effectuer une mise en solution à une température inférieure à la température du début de la fusion (solidus), sinon l'alliage risque d'être «brulé» et, par conséquent, inutilisable. Si l'on refroidit rapidement l'alliage mis en solution jusqu'à la température ambiante, sans laisser aux atomes de cuivre le temps de diffuser pour former des précipités  $\theta$ , on obtient une solution solide sursaturée en cuivre. Un tel refroidissement brusque s'appelle une *trempe*. On l'effectue le plus souvent en plongeant la pièce dans l'eau, dès sa sortie du four.