

# Diffusion et Transformation de Phases

## Chapitre I Diffusion de la matière

### I.1 Définition

La diffusion est un déplacement aléatoire d'atomes ou de lacunes dans le réseau cristallin (migration), provoqué par l'agitation thermique, dont la longueur est au moins égale à une distance interatomique. Les phénomènes de diffusion régissent la cinétique de nombreux processus métallurgiques tels que :

- la solidification,
- l'homogénéisation par recuit des alliages,
- les transformations de phases (à l'exception des transformations martensitiques),
- la précipitation,
- la restauration,
- la recristallisation.

On peut envisager plusieurs modes de diffusion :

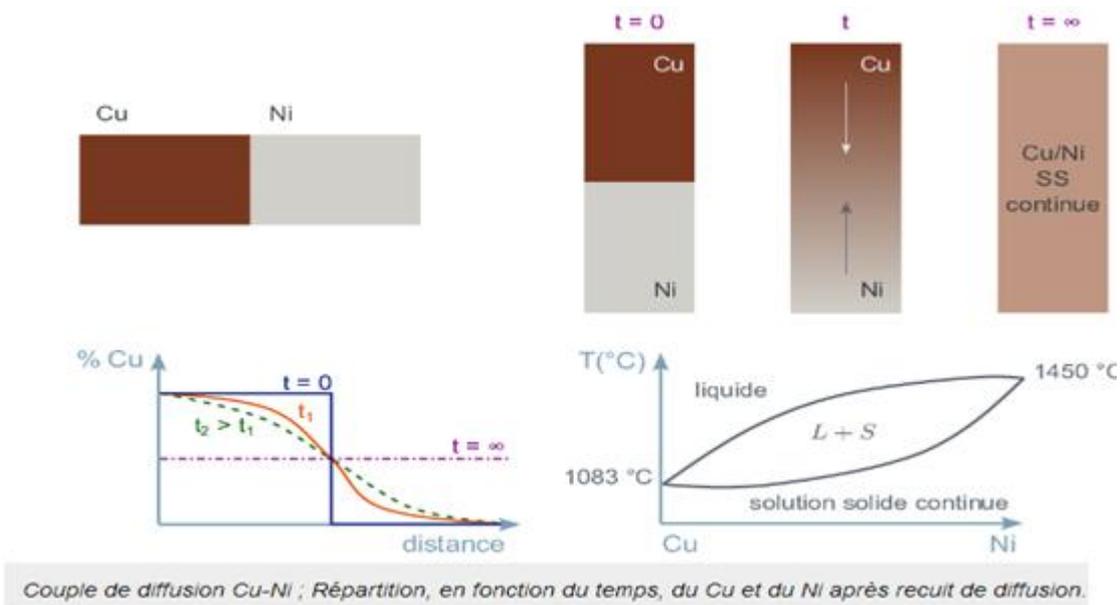
- la diffusion en volume qui se fait à travers le cristal,
- la diffusion intergranulaire, le long des joints et sous-joints de grains,
- la diffusion dans les dislocations,
- la diffusion à la surface du matériau,
- la diffusion à la surface des fissures.

#### Exemple :

Les phénomènes de diffusion sont relativement complexes à modéliser mathématiquement et nous envisagerons dans la suite le cas de la diffusion unidirectionnelle et binaire (entre deux éléments chimiques **A** et **B**). L'expérience la plus classique consiste à plaquer deux métaux **A** et **B**, à chauffer l'ensemble (couple de diffusion) pour étudier l'interpénétration des deux métaux. Notons que les phénomènes de diffusion se produisent soit dans les solutions (alliages) soit dans les corps purs (autodiffusion).

Dans le cas d'un couple de diffusion **Cu - Ni** (voir Schéma), si l'on suit en fonction du temps, pour une température de recuit suffisante donnée, l'évolution de la concentration d'un des éléments (ou des deux), on constate qu'il y a mélange des deux métaux avec tendance à la formation d'une solution solide homogène. En effet, le diagramme de phase correspondant montre un domaine de solution solide illimité. On pourrait remarquer que l'homogénéisation quoique toujours lente est d'autant plus rapide que la température est élevée.

Qualitativement, il apparaît que les atomes de chaque élément se déplacent depuis les régions riches en cet élément vers les régions pauvres en cet élément, plus précisément sous l'influence d'un gradient de concentration qui est la force motrice du phénomène. Ce processus est tout à fait similaire au déplacement de charges électriques sous l'influence d'un gradient de potentiel ou au transfert de chaleur sous l'influence d'un gradient de température. Si bien que l'on peut donner une définition simplifiée de la diffusion : la diffusion chimique en volume correspond à un déplacement macroscopique de matière, activé thermiquement, sous l'influence d'un gradient de concentration (en réalité les phénomènes ne sont simples que dans le cas où l'on forme des solutions solides illimitées).



**I.2 Aspect macroscopique de la diffusion :**

Les lois macroscopiques de la diffusion sont analogues à celles que l'on établit pour la conduction électrique ou thermique. En diffusion ce sont les lois de Fick.

Si l'on considère tout d'abord un flux d'atomes traversant une surface perpendiculaire à la direction x par unité de surface et par unité de temps, on note que la densité de ce flux J est

$$J = - D.(\delta C/\delta x)$$

Où :

**J** = flux de particules,

**C** = concentration,

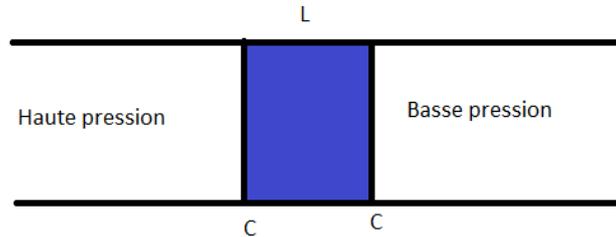
**X** = distance selon la direction choisie

Le coefficient de proportionnalité D ou coefficient de diffusion s'exprime en m<sup>2</sup>/s

Cette relation rend compte du fait que les atomes diffusent des régions de concentration élevée vers les régions de concentration faible. Selon que le gradient de concentration est indépendant du temps ou qu'il dépend de celui-ci, la diffusion est dite uniforme ou non uniforme.

### I.1.1 Diffusion uniforme :

Ce cas peut-être représenté par un gaz (H<sub>2</sub>) traversant une feuille métallique de chaque coté de laquelle une forte pression et une faible sont maintenues (voir figure)



Diffusion uniforme d'un gaz à travers une feuille métallique

La concentration du gaz dans le métal est égale à C<sub>2</sub> du coté de la forte pression et à C<sub>1</sub> du coté de la faible pression. En appliquant la loi de Fick, on peut montrer que la quantité de gaz traversant le métal par unité de temps est :

$$Q = J.S = D \cdot \frac{C_2 - C_1}{L} \cdot S$$

Où :

S – surface de la feuille

L – épaisseur de la feuille

### I.1.2 Diffusion non uniforme :

Le gradient de concentration varie avec le temps et la distance X. C'est le cas général des problèmes rencontrés en métallurgie. On peut montrer toujours en considérant que D est indépendant de la composition, que :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}$$

C'est la deuxième loi de Fick.

### I.2 Aspect microscopique de la diffusion:

**I.2.1 Mécanismes de la diffusion:** Le mouvement des atomes se produit grâce à leur vibration thermique, dont l'amplitude augmente avec la température. Plusieurs mécanismes de déplacement des atomes peuvent être imaginés (voir figure), mais seuls deux d'entre eux sont possibles:

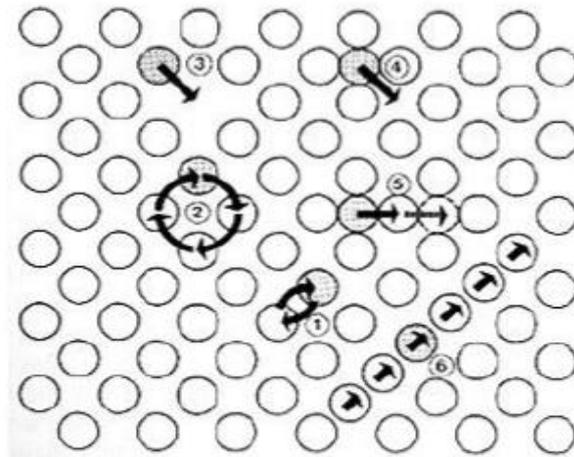


Schéma des principaux mécanismes de diffusion : 1) échange simple ; 2) échange cyclique ; 3) lacunaire ; 4) interstitiel direct ; 5) interstitiel indirect ; 6) « crowdion »