

CHAPITRE 02

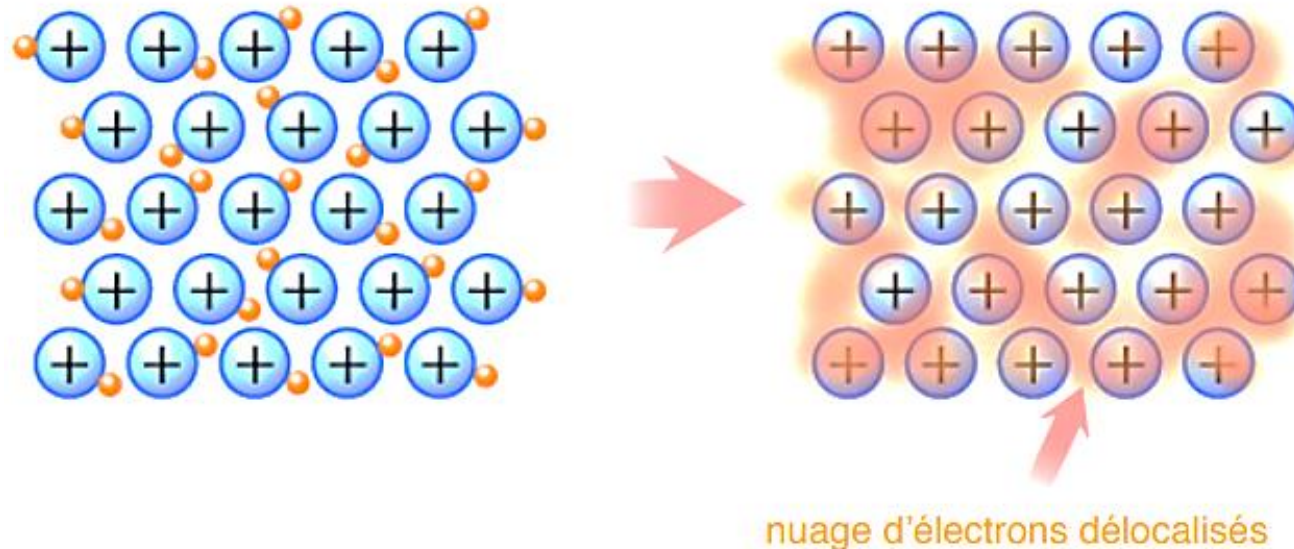
Matériaux métalliques



1-Définition

1-1-Liaison métallique

Une liaison métallique est une liaison chimique, dans laquelle les atomes ne partagent pas ou n'échangent pas d'électrons pour se lier. Au lieu de cela, de nombreux électrons (environ un pour chaque atome) sont plus ou moins libres de se déplacer dans le métal, de sorte que chaque électron peut interagir avec de nombreux atomes fixes.



1-Définition

1-2-Les métaux

Les métaux représentent 2/3 des éléments du tableau périodique et environ 24% de la masse de la planète. Ce qui distingue les métaux des non métaux est leur liaison métallique. La plupart des métaux comme la plupart des solides ont des structures cristallines cubiques (CC et CFC) ou hexagonales (HC).

	IA	IIA	IIIB	IVB	VB	VIB	VII B	VIII B	VIII B	IB	IIB	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIIIA	
1	H																He	
2	Li	Be										B	C	N	O	F	Ne	
3	Na	Mg										Al	Si	P	S	Cl	Ar	
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra	**	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Uub	Uut	Uuq	Uup	Uuh	Uus	Uuo
			* lanthanides	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
			** actinides	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

1-Définition

1-2-Les métaux

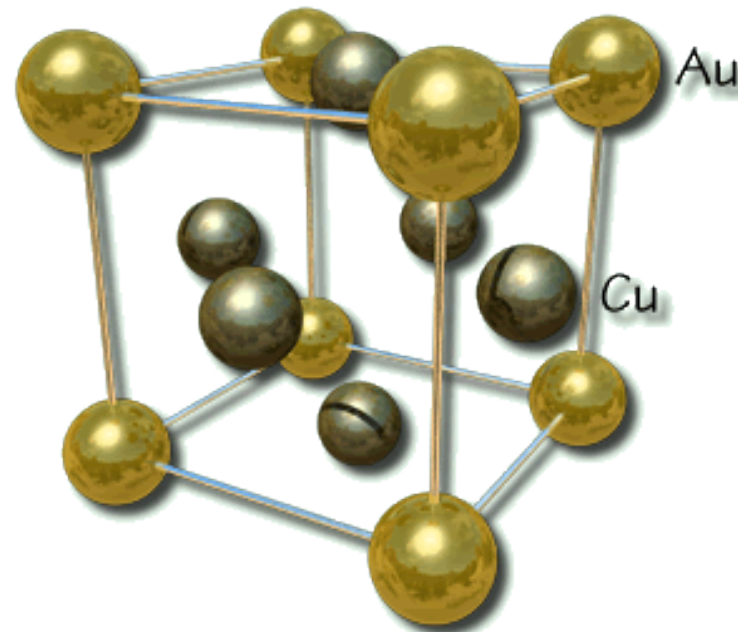
Le métal est un matériau (généralement solide) comprenant un ou plusieurs éléments métalliques (par exemple, le fer, l'aluminium, le cuivre, le chrome, etc), et souvent aussi des éléments non métalliques (par exemple, le carbone, l'azote, l'oxygène) en quantités relativement faibles.

La particularité des métaux en ce qui concerne leur structure est la présence de porteurs de charge, en particulier d'électrons. Cette caractéristique est donnée par la nature de la liaison métallique. Les conductivités électriques et thermiques des métaux proviennent du fait que leurs électrons externes sont délocalisés.

1-Définition

1-3-Les alliages

Les alliages des métaux sont obtenus par cristallisation de deux ou de plus de deux métaux, parfois avec des inclusions d'éléments non métalliques. Un alliage (AuCu) est un solide obtenu par cristallisation des deux métaux liquides. Après solidification, on obtient un solide polycristallin et dans ce réseau, on va trouver des atomes des deux métaux.



1-Définition

1-3-Les alliages

Un alliage binaire « AB » est généralement constitué à l'état solide d'un agrégat d'une ou plusieurs espèces de cristaux ; il est alors qualifié respectivement de monophasé ou de biphasé. Les cristaux sont eux mêmes formés de mélanges des deux espèces atomiques A et B, appelés solutions solides.

La solidification d'un mélange liquide de deux métaux purs A et B (ou d'un métal et d'un élément non métallique) est un processus complexe, dont l'analyse peut se faire à l'aide des diagrammes de phases.

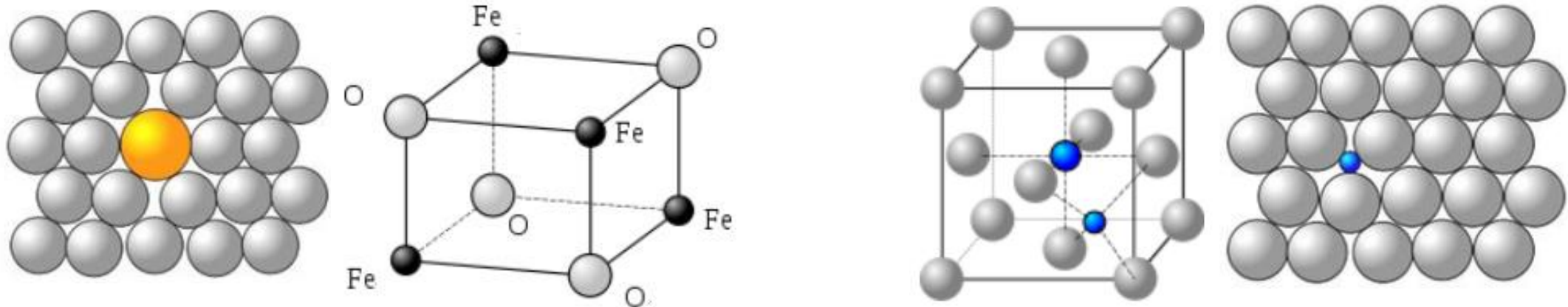
1-Définition

1-4-Solution solide

Elle est constituée par un mélange homogène de deux éléments différents. L'élément de base A « solvant » et un élément B « soluté ». On a deux types de solution solide :

*En substitution: l'atome étranger « B » remplace un des atomes du cristal « A ».

*En insertion: l'atome étranger « B » se glisse dans les espaces vides, ou les positions interstitielles, des atomes du cristal « A ».

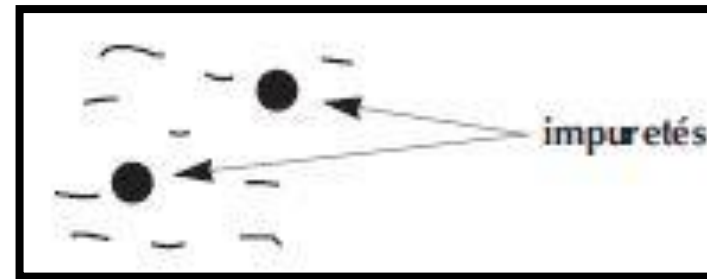
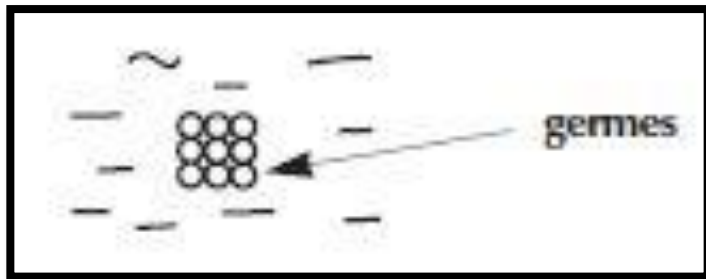


2-Solidification des cristaux

2-1-Origine des germes

Les germes qui amorcent la solidification d'un métal peuvent avoir deux origines :

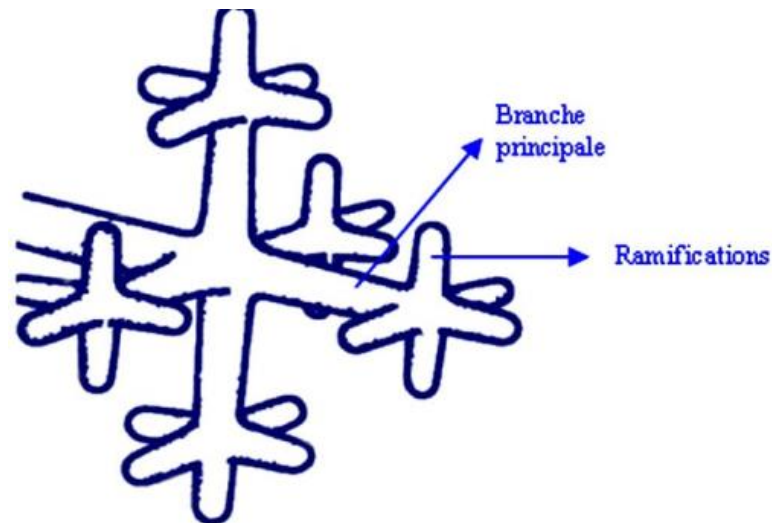
- soit être constitués de groupements d'atomes du métal qui prennent l'arrangement du réseau cristallin du solide. C'est la germination homogène.
- soit être des fragments de corps étrangers (impuretés) insolubles dans le métal liquide. C'est la germination hétérogène.



2-Solidification des cristaux

2-2-Les dendrites

Dans les métaux, les cristaux se formant lors du refroidissement suivent généralement un schéma de solidification qui consiste en une branche principale et de multiples ramifications. Le cristal ressemble à un pin et est appelé dendrite. La forme dendritique apparaît parce que les cristaux croissent selon des plans définis suite au treillis qu'ils créent.



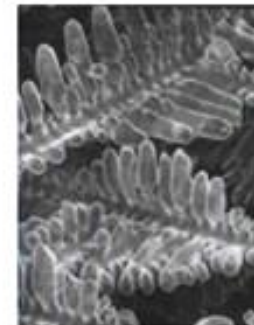
Aube de turbine métallique à base de nickel



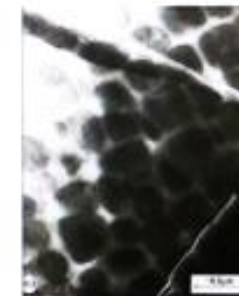
Aube
(10 cm)



Grains
(mm)



Dendrites
(10-100 μm)



Précipités Ni_3Al
(10-100 nm)



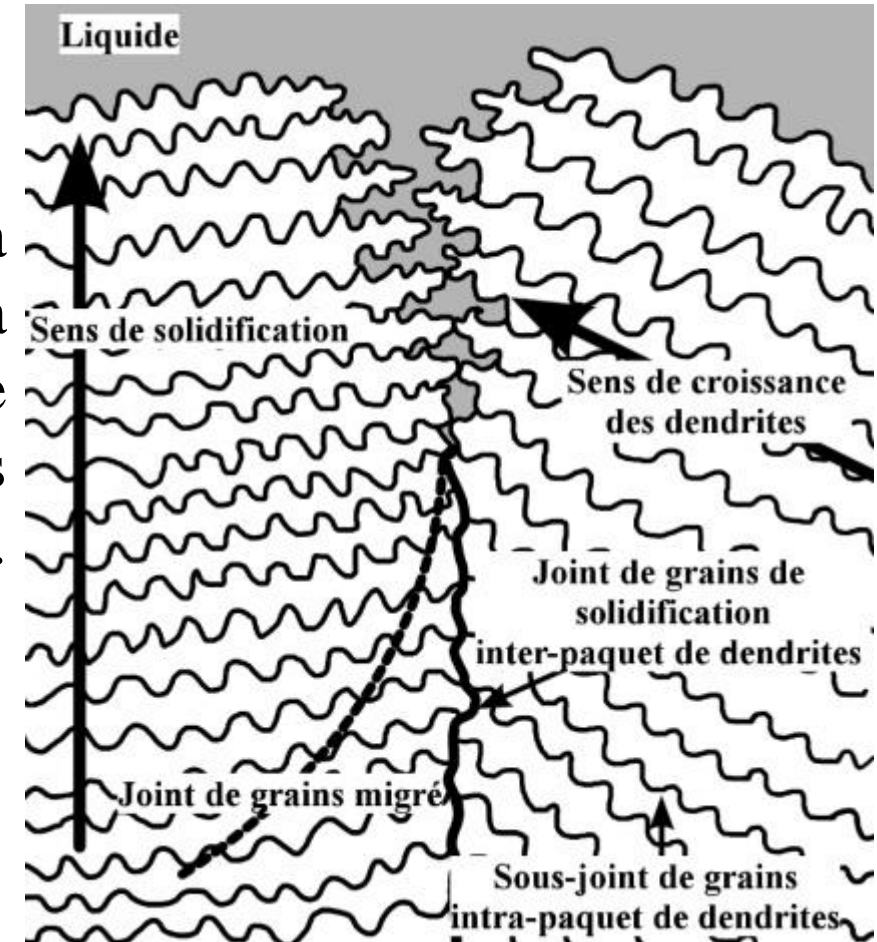
Atomes
(0.1 nm)

2-Solidification des cristaux

2-2-Les dendrites

2-2-1-Croissance dendritique

Au fur et à mesure que progresse la solidification, les dendrites croissent jusqu'à rencontrer d'autres voisines, la solidification se poursuit alors dans les espaces interdendritiques jusqu'à la dernière goutte de liquide environnant.



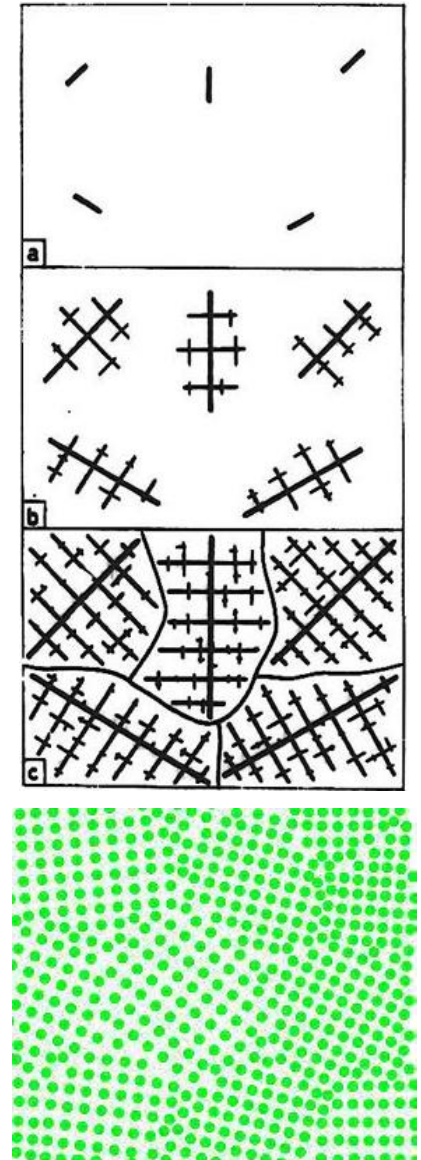
2-Solidification des cristaux

2-2-Les dendrites

2-2-2-Les grains et joint de grains

Les métaux réels sont généralement constitués de nombreux cristaux (ou grains) séparés par des joints de grains. On les appelle polycristaux. Tous les grains n'ont pas la même orientation.

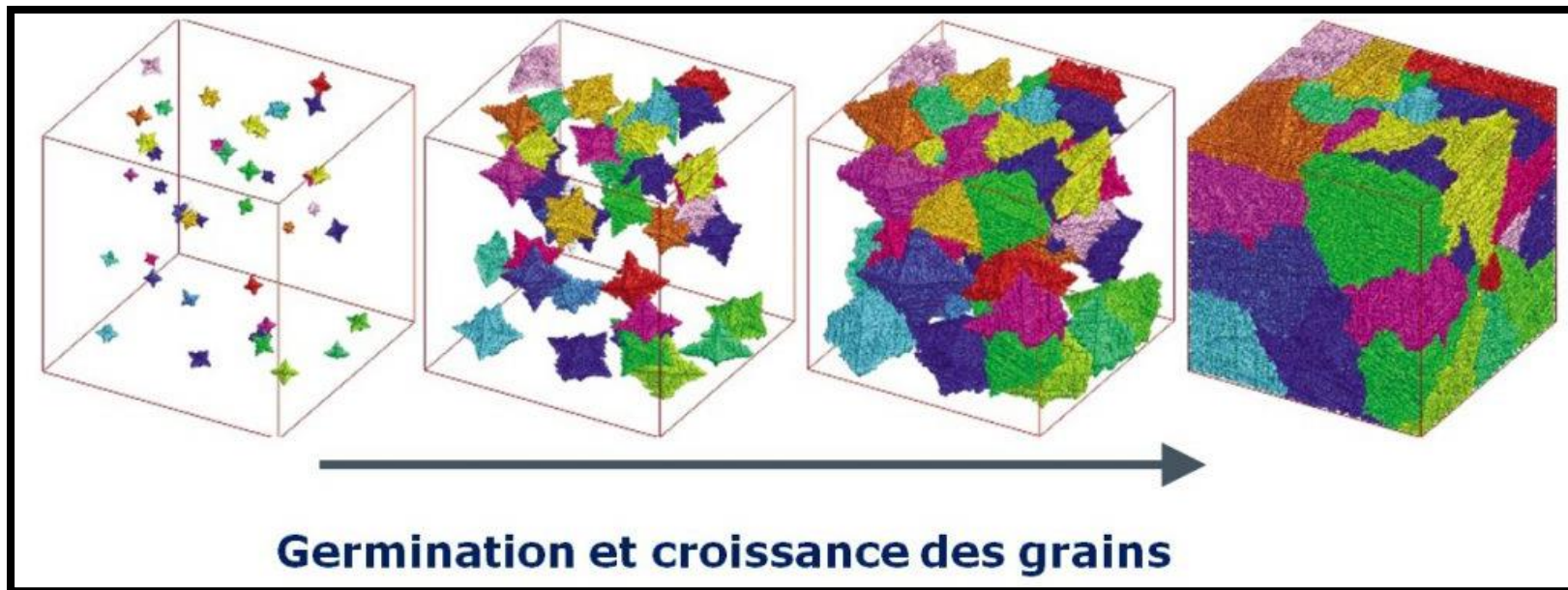
Lors de la solidification des métaux, plusieurs cristaux se forment dans le liquide. A la fin de la solidification les différents cristaux se raccordent les uns aux autres via des interfaces appelés joints de grains.



2-Solidification des cristaux

2-3-La nucléation

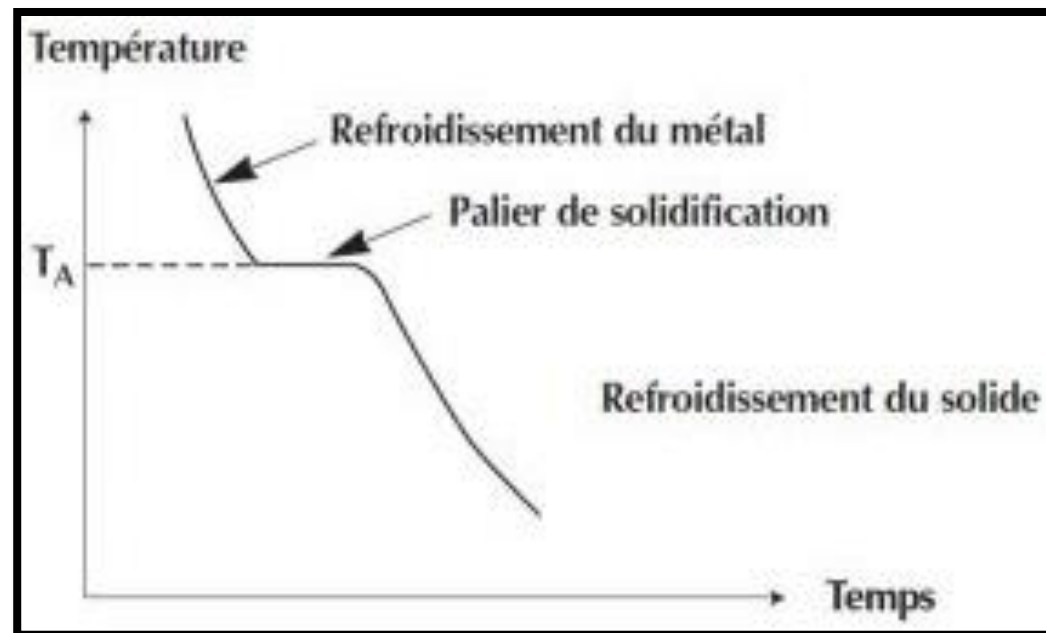
Lorsque la température diminue, les atomes vont se déposer sur les impuretés et le cristal va commencer à se former. Les tailles finales individuelles des cristaux dépendent du nombre de points de nucléation. La taille des cristaux augmente par l'addition progressive d'atomes et croît jusqu'à ce qu'il touche le cristal voisin en formation.



2-Solidification des cristaux

2-4-Refroidissement d'un métal pur

Lorsqu'une masse de métal liquide se refroidit dans un moule, on voit apparaître, à la température de solidification, des fragments de solide qui grandissent à partir de germes. Pour que ces germes grossissent, c'est-à-dire pour que la solidification progresse, il faut que la chaleur qui se dégage soit évacuée par les parois du moule.



2-Solidification des cristaux

2-5-Solidification des alliages

La plupart des alliages se solidifient dans un intervalle de température qui est celui compris entre le liquidus et du solidus. La solidification débute, comme pour les métaux purs, par la formation de germes qui croissent au fur et à mesure que s'éliminent les calories du métal liquide.

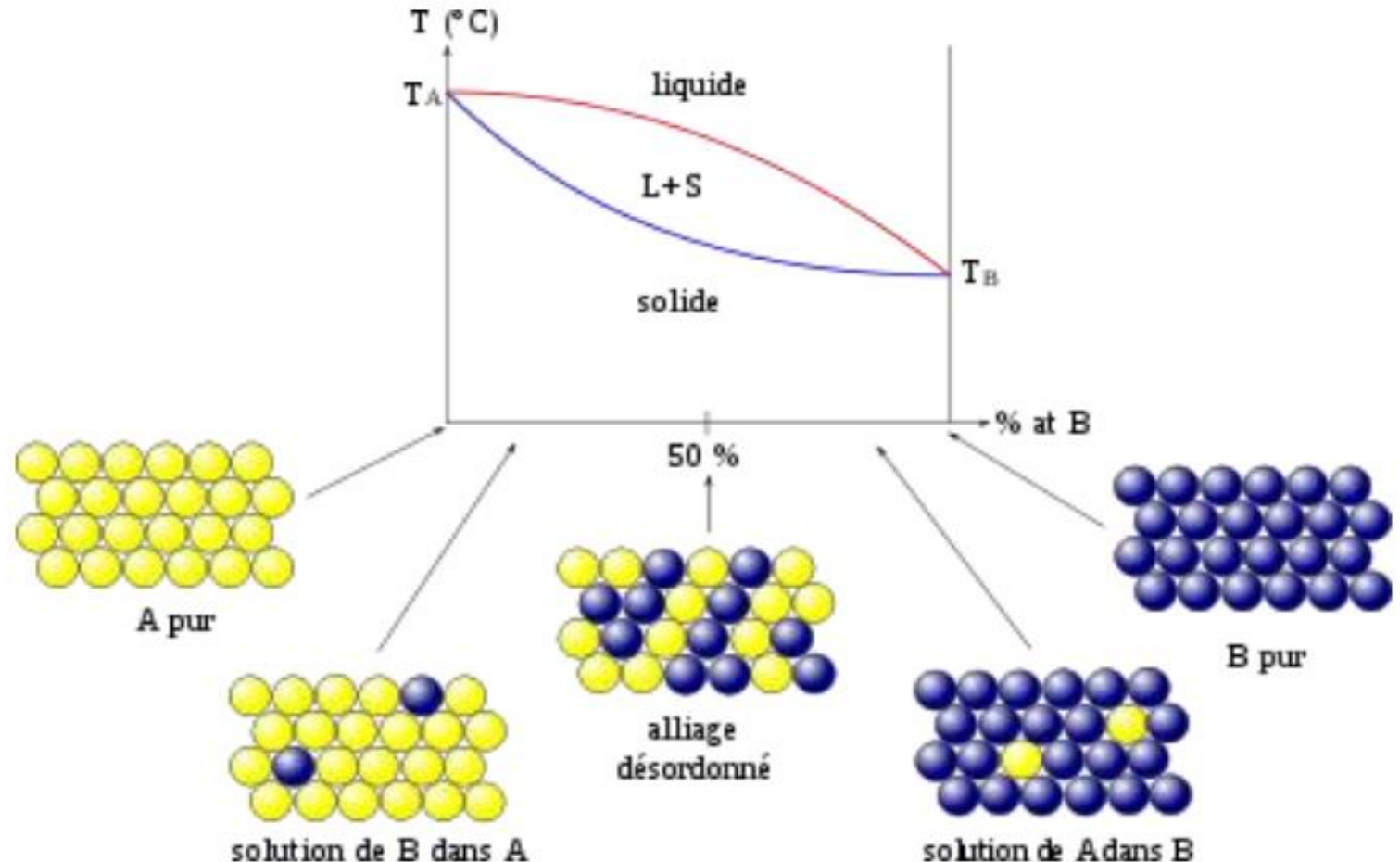
2-Solidification des cristaux

2-5-Solidification d'une solution solide

2-5-1-Diagrammes de phases à miscibilité totale à l'état solide

Dans le cas d'une miscibilité totale, la formation du mélange est parfaitement homogène.

Lorsque le système est solidifié, il ne reste qu'une seule phase en présence.



2-Solidification des cristaux

2-5-Solidification d'une solution solide

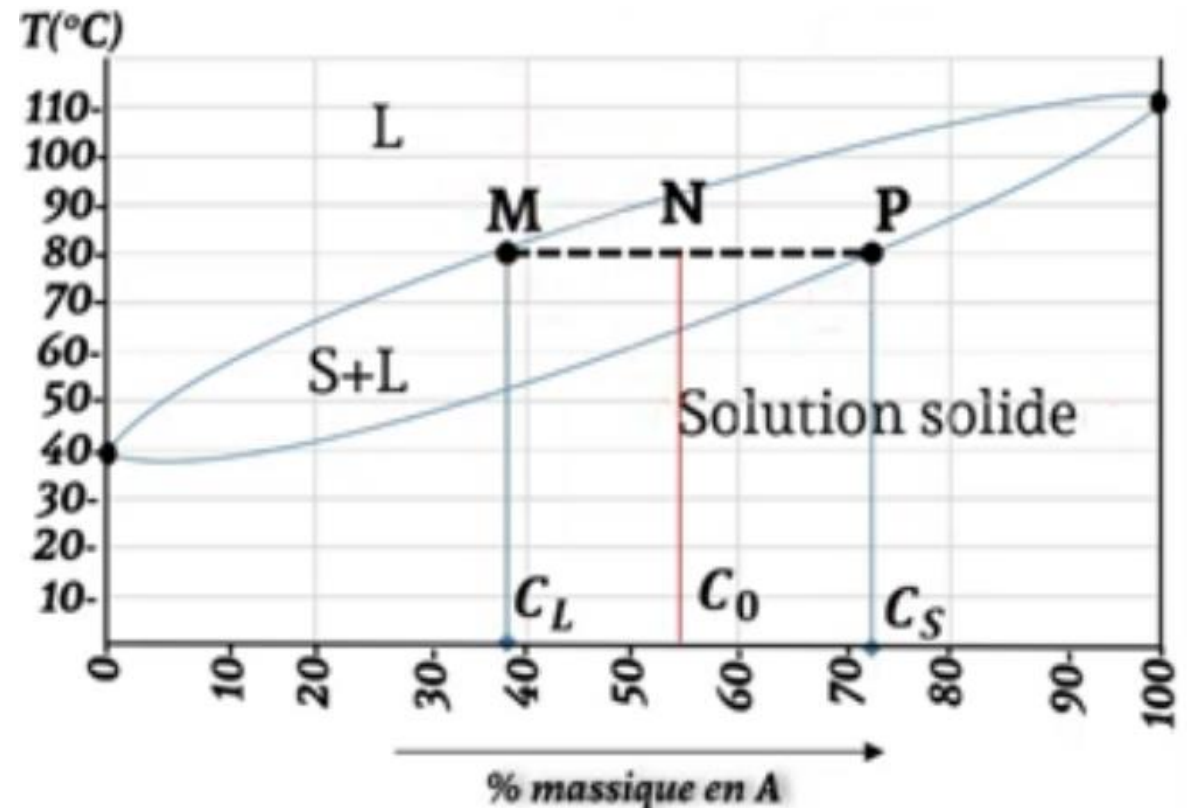
2-5-1-Diagrammes de phases à miscibilité totale à l'état solide

La règle du levier permet la connaissance des proportions des phases dans le mélange.

Pour un alliage ayant une composition C_0 , la phase solide a une composition C_S tandis que la phase liquide a une composition C_L .

Au point « N » :

$$C_L + C_S = 1$$



2-Solidification des cristaux

2-5-Solidification d'une solution solide

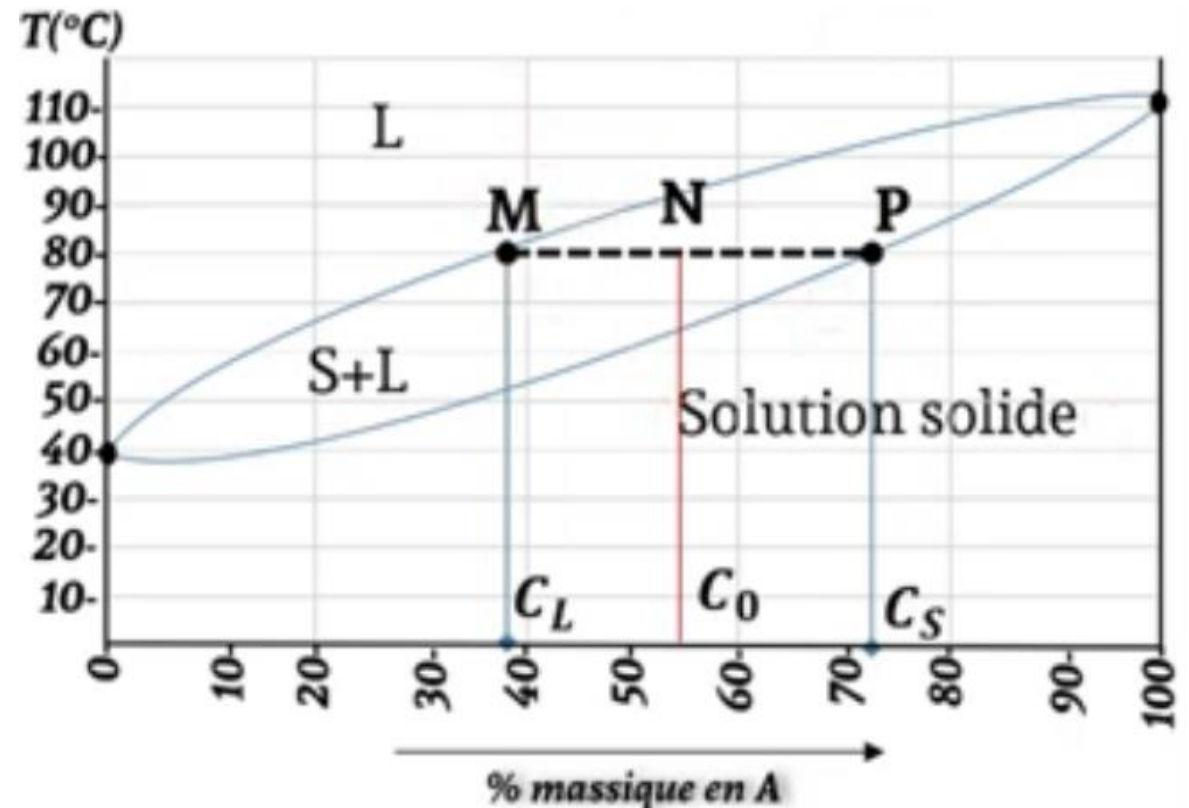
2-5-1-Diagrammes de phases à miscibilité totale à l'état solide

La composition du mélange au point « N » peut être écrite suivant la relation suivante:

$$f_L C_L + f_S C_S = C_0$$

On peut écrire alors:

$$\begin{cases} C_L + C_S = 1 \\ f_L C_L + f_S C_S = C_0 \end{cases}$$



2-Solidification des cristaux

2-5-Solidification d'une solution solide

2-5-1-Diagrammes de phases à miscibilité totale à l'état solide

La fraction liquide et la fraction solide dans l'état biphasé (au point « N ») s'écrivent:

$$\begin{cases} f_s = \frac{C_L - C_0}{C_L - C_S} \\ f_L = \frac{C_0 - C_S}{C_L - C_S} \end{cases}$$

On peut écrire aussi:

$$\frac{f_L}{f_s} = \frac{C_0 - C_S}{C_L - C_0}$$

En fonction de la masse, les deux fractions liquide et solide peuvent être écrites comme suit:

$$\begin{cases} f_s = \frac{m_s}{m_L + m_s} \\ f_L = \frac{m_L}{m_L + m_s} \end{cases}$$

Donc:

$$\frac{m_s}{m_L} = \frac{C_L - C_0}{C_0 - C_S}$$

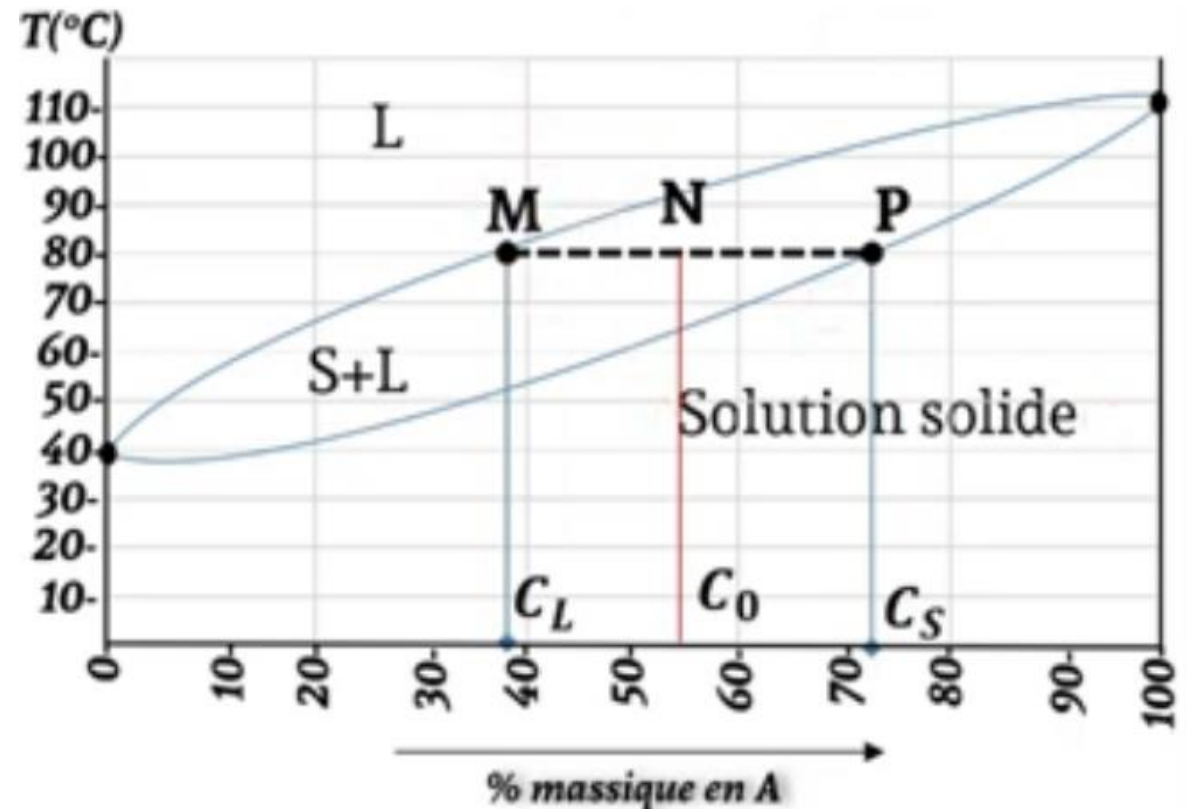
2-Solidification des cristaux

2-5-Solidification d'une solution solide

2-5-1-Diagrammes de phases à miscibilité totale à l'état solide

Il devient :

$$\frac{m_L}{PN} = \frac{m_S}{MN} = \frac{m_T}{PM}$$



2-Solidification des cristaux

2-5-Solidification d'une solution solide

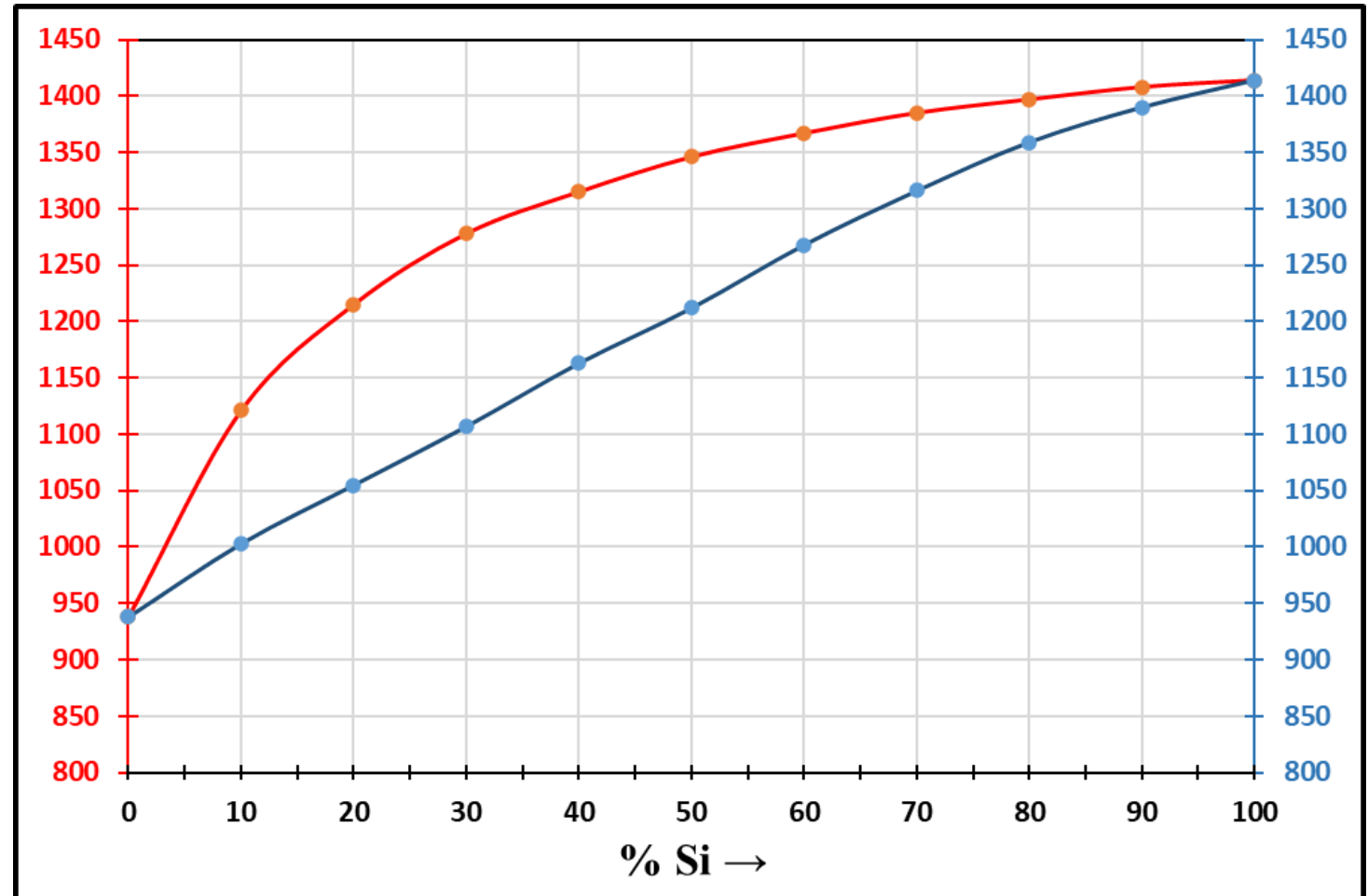
2-5-1-Diagrammes de phases à miscibilité totale à l'état solide

Exercice:

Soit un alliage silicium-Germanium obtenu en mélangeant 8,43g (Si) et 14,52g (Ge).

*Quelle est la fraction massique du silicium dans ce mélange?

*Déterminer les masses des phases à 1200°C.



2-Solidification des cristaux

2-5-Solidification d'une solution solide

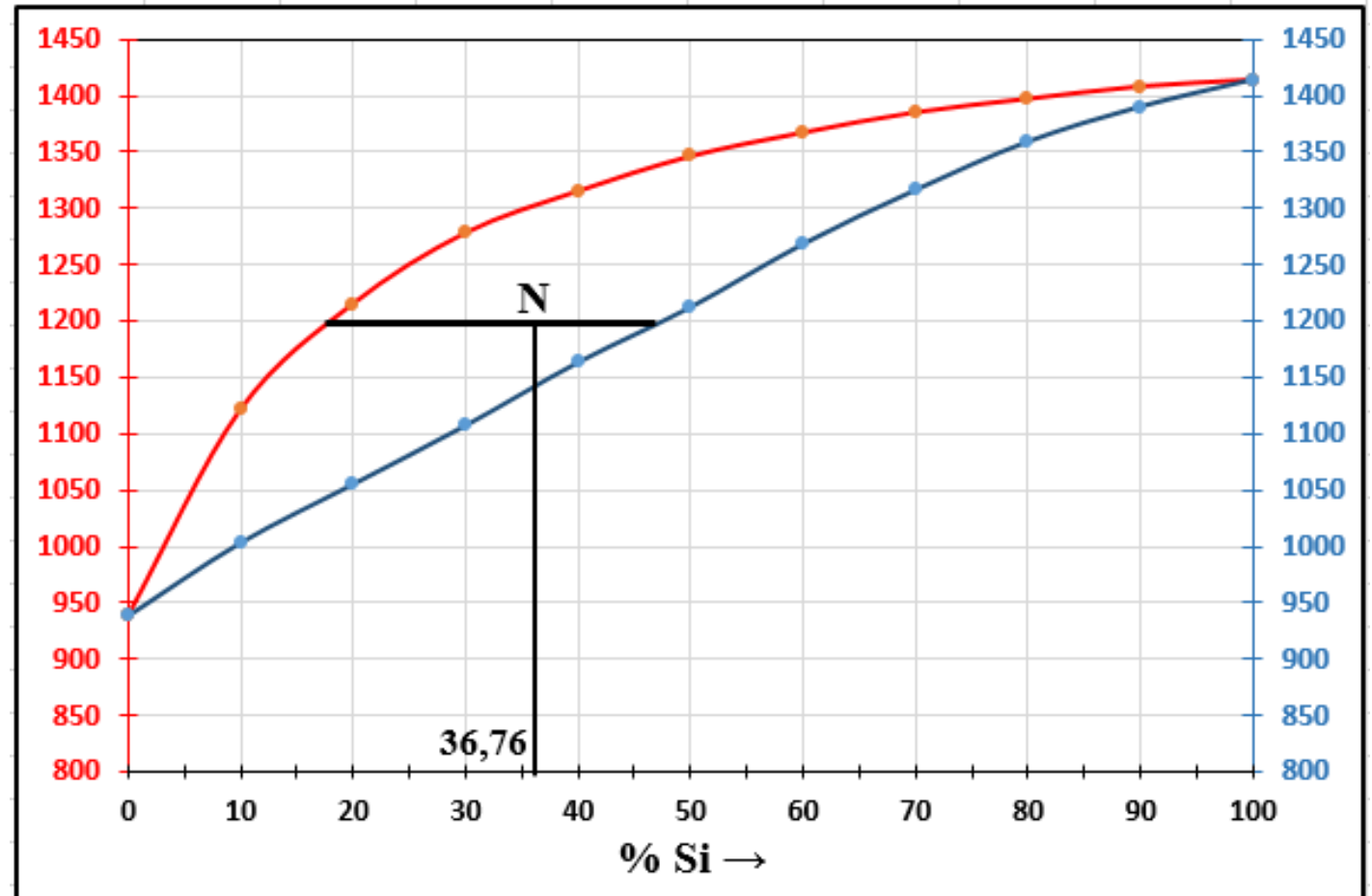
2-5-1-Diagrammes de phases à miscibilité totale à l'état solide

Solution:

*La fraction massique du silicium dans cet alliage Si-Ge est:

$$\% Si = \frac{8,34}{8,34 + 14,52}$$

$$\% Si = 36,76\%$$



2-Solidification des cristaux

2-5-Solidification d'une solution solide

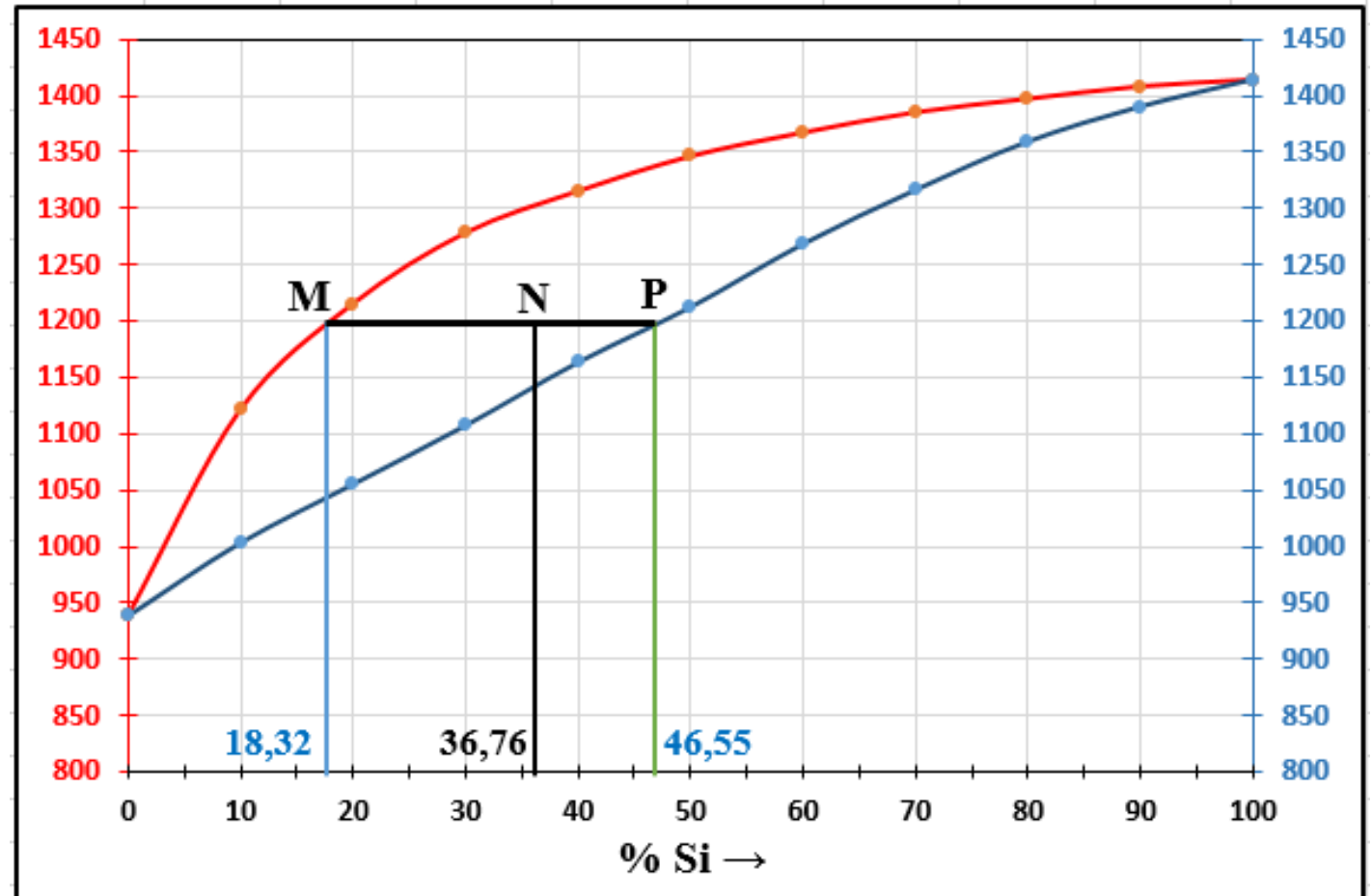
2-5-1-Diagrammes de phases à miscibilité totale à l'état solide

Solution:

*Afin de déterminer les masses des phases à 1200°C. On constate que l'isotherme coupe la courbe du liquidus à 18,32% et le solidus à 46,55% .

Suivant la règle du levier

$$\frac{m_L}{PN} = \frac{m_S}{MN} = \frac{m_T}{PM}$$



2-Solidification des cristaux

2-5-Solidification d'une solution solide

2-5-1-Diagrammes de phases à miscibilité totale à l'état solide

Solution:

$$\frac{m_L}{PN} = \frac{m_S}{MN} = \frac{m_T}{PM}$$

$$m_L = m_T \times \frac{\overline{PN}}{\overline{PM}} = 22,86 \times \frac{46,55 - 36,76}{46,55 - 18,32} = 7,941g$$

$$m_S = m_T \times \frac{\overline{MN}}{\overline{PM}} = 22,86 \times \frac{36,76 - 18,32}{46,55 - 18,32} = 14,991g$$

2-Solidification des cristaux

2-5-Solidification d'une solution solide

2-5-2-Diagrammes de phases à miscibilité partielle à l'état solide

Dans la majorité des alliages binaires, il n'existe pas de miscibilité des constituants en toutes proportions à l'état solide. Dans ces cas deux solutions solides coexistent:

- α : Solution solide primaire de B dans A (riche en A).
- β : Solution solide primaire de A dans B (riche en B).

Les deux fuseaux de solidifications se raccordent dans la région centrale du diagramme en faisant apparaître un point d'équilibre invariant entre une phase liquide commune et deux phases appartenant respectivement aux deux solutions solides. On distingue deux types de diagrammes.

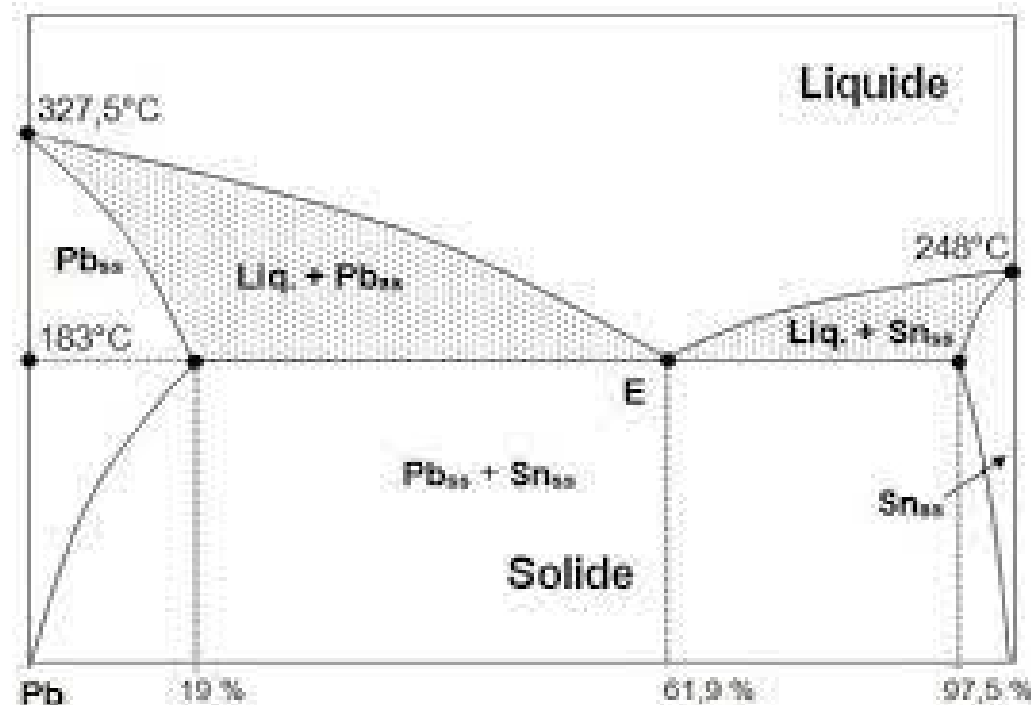
2-Solidification des cristaux

2-5-Solidification d'une solution solide

2-5-2-Diagrammes de phases à miscibilité partielle à l'état solide

2-5-2-1-Transformation eutectique

Dans ces diagrammes, la température du point invariant est inférieure aux températures de fusion des deux constituants, comme exemple Pb-Sn ou Cr-Zn



2-Solidification des cristaux

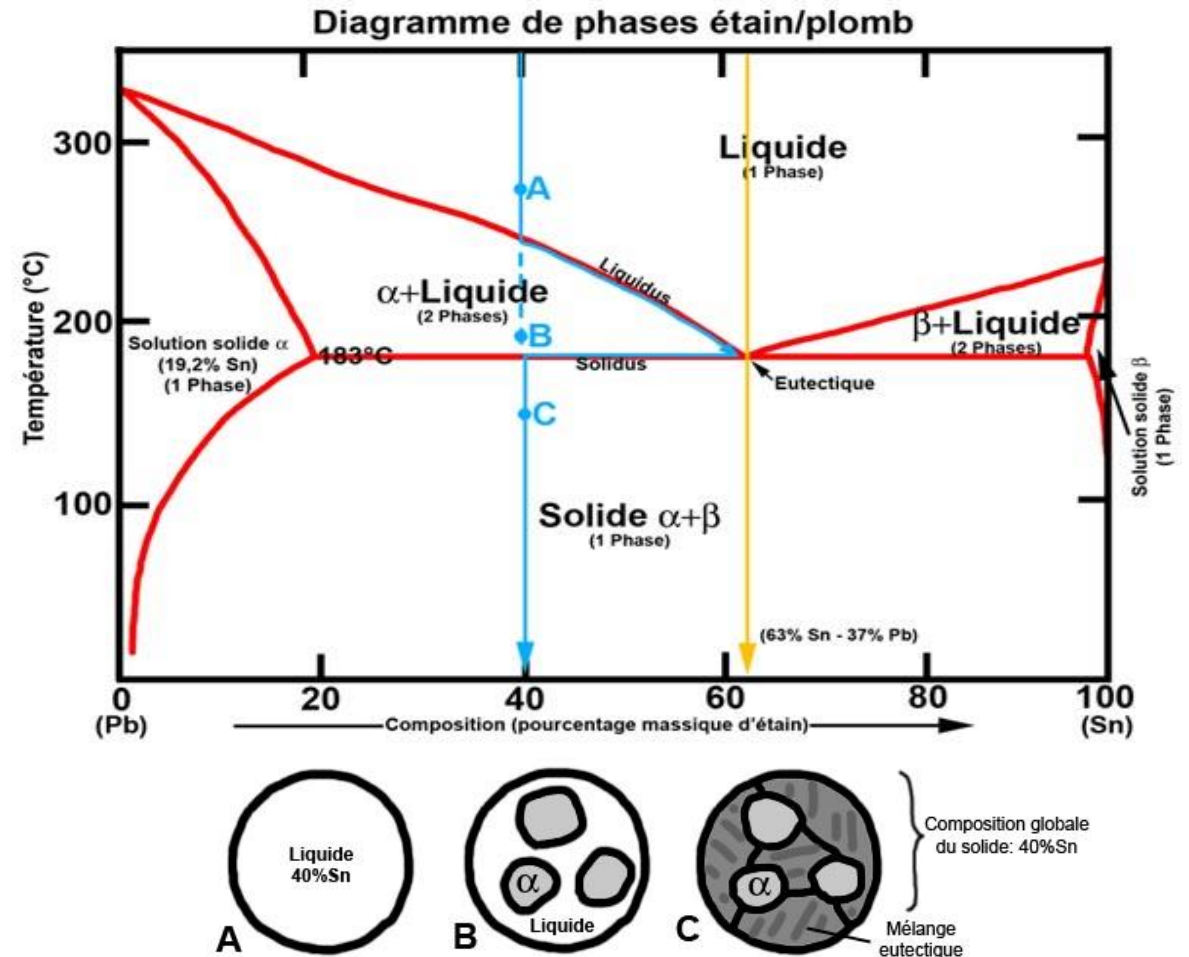
2-5-Solidification d'une solution solide

2-5-2-Diagrammes de phases à miscibilité partielle à l'état solide

2-5-2-1-Transformation eutectique

La cristallisation d'un alliage eutectique est représentée par le trajet de la flèche jaune sur le diagramme. On passe d'un liquide à un solide homogène.

Dans le chemin de cristallisation en bleue la structure finale est hétérogène.



2-Solidification des cristaux

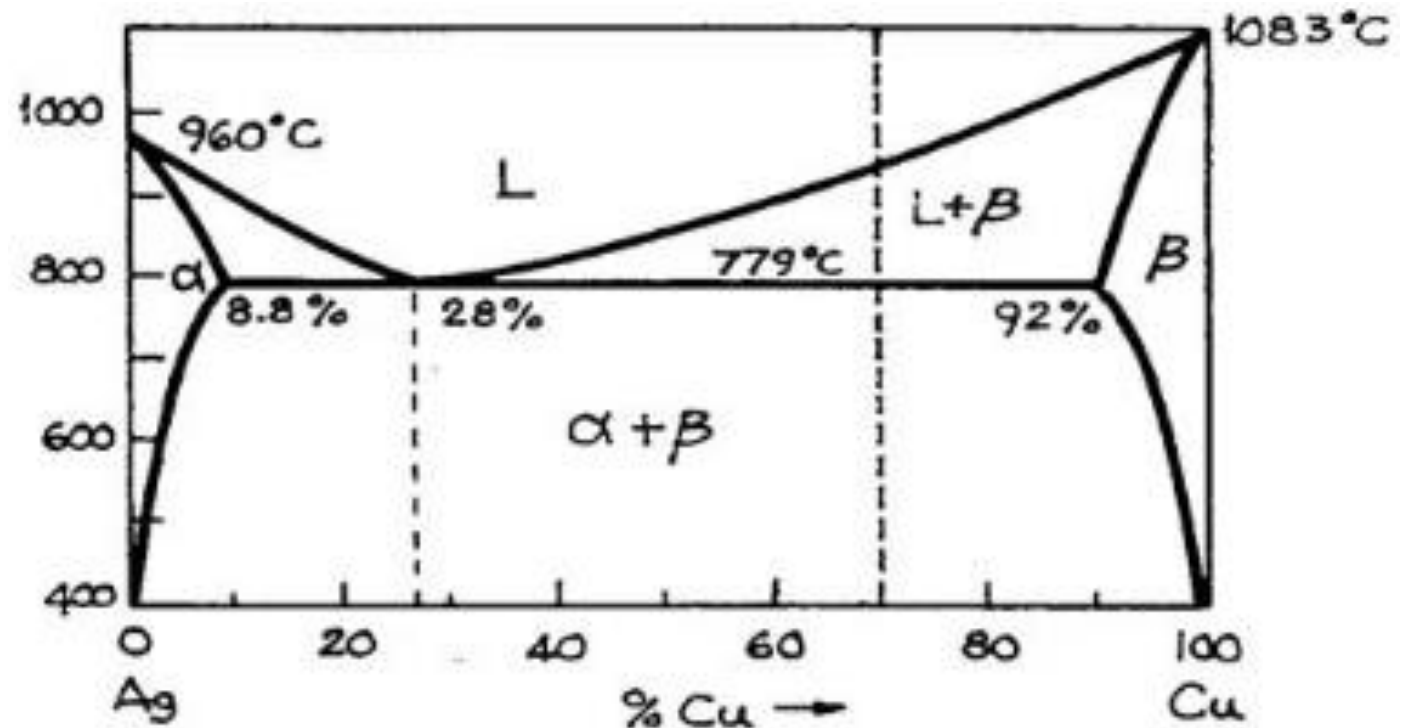
2-5-Solidification d'une solution solide

2-5-2-Diagrammes de phases à miscibilité partielle à l'état solide

2-5-2-1-Transformation eutectique

Exercice:

Quelles sont les compositions d'un alliage à 70% en cuivre à l'isotherme 780°C et 778°C ?



2-Solidification des cristaux

2-5-Solidification d'une solution solide

2-5-2-Diagrammes de phases à miscibilité partielle à l'état solide

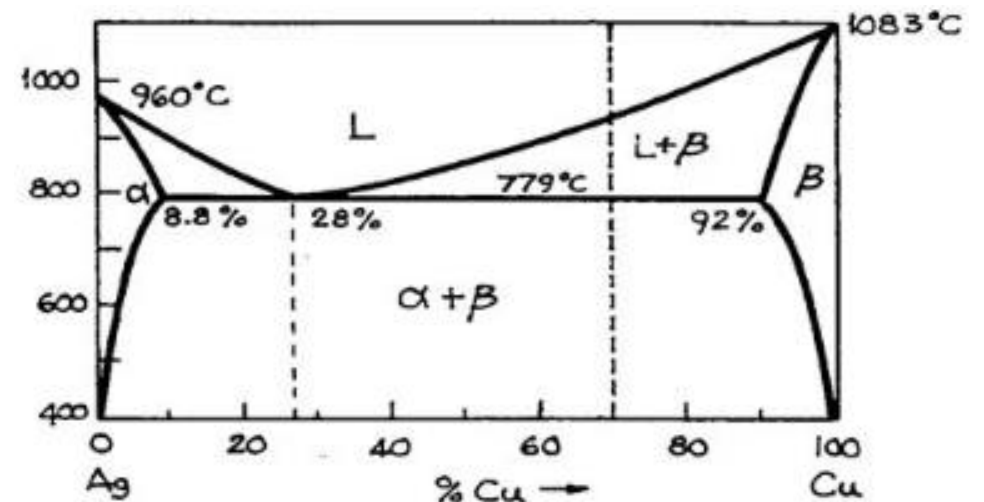
2-5-2-1-Transformation eutectique

Solution:

A 780°C, dans le domaine biphasé $\beta+L$, le pourcentage du cuivre est; $\beta=92\%$ et $L=28\%$

Selon la règle du levier

$$\beta = \frac{70 - 28}{92 - 28} = 66\%; \quad L = \frac{92 - 70}{92 - 28} = 34\%$$



2-Solidification des cristaux

2-5-Solidification d'une solution solide

2-5-2-Diagrammes de phases à miscibilité partielle à l'état solide

2-5-2-1-Transformation eutectique

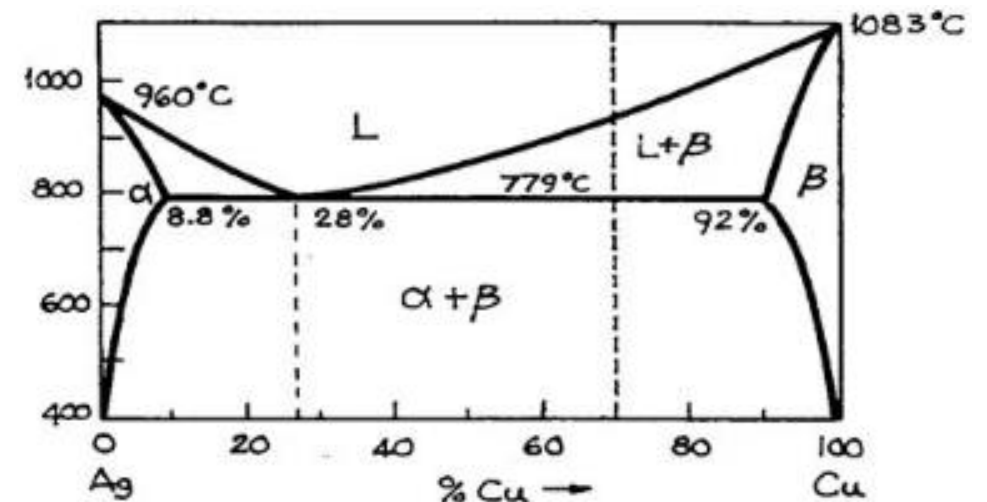
Solution:

A 778°C , dans la solution solide biphasé $\alpha+\beta$, le pourcentage du cuivre est; $\beta=92\%$ et $\alpha=8,8\%$

Selon la règle du levier

$$\alpha = \frac{92 - 70}{92 - 8,8} = 26,4\%;$$

$$\beta = \frac{70 - 8,8}{92 - 8,8} = 73,6\%$$



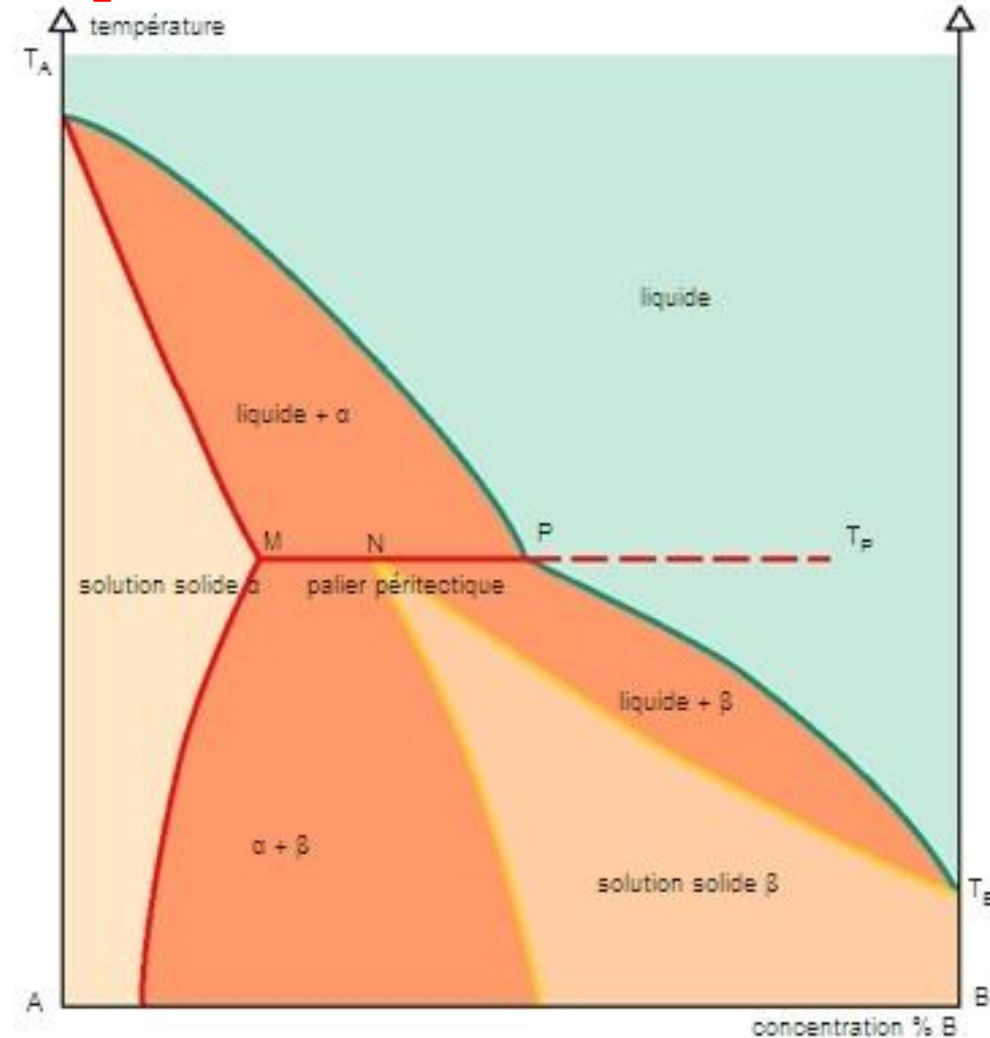
2-Solidification des cristaux

2-5-Solidification d'une solution solide

2-5-2-Diagrammes de phases à miscibilité partielle à l'état solide

2-5-2-2-Transformation péritectique

Le point (P) est appelé point péritectique. Par rapport au diagramme eutectique, les deux branches du liquidus et du solidus sont situées de part et d'autre de l'horizontale péritectique [M,P], comme exemple Ag-Pt ou Ag-Au.



3-Traitement thermique

Les principaux méthodes de traitement thermique qui modifient la structure et les propriétés des alliages par des opérations de chauffage jusqu'à une certaine température, de maintien à cette température, et suivies d'un refroidissement à une vitesse plus ou moins accélérée sont :

- *La trempe.
- *Le revenu.
- *Le vieillissement.
- *Le recuit.

3-Traitement thermique

3-1-La trempe

La trempe est un traitement thermique de durcissement qui consiste à chauffer la pièce à une température supérieure à la ligne de transformation, puis on lui fait subir un refroidissement rapide pour modifier les propriétés mécaniques. Ce mode de durcissement est commun à de nombreux métaux.



3-Traitement thermique

3-1-La trempe

La trempe s'effectue en général soit à l'eau, à l'huile ou à l'air. La nature du bain de trempe caractérise la vitesse de refroidissement de la pièce immergée après chauffage.

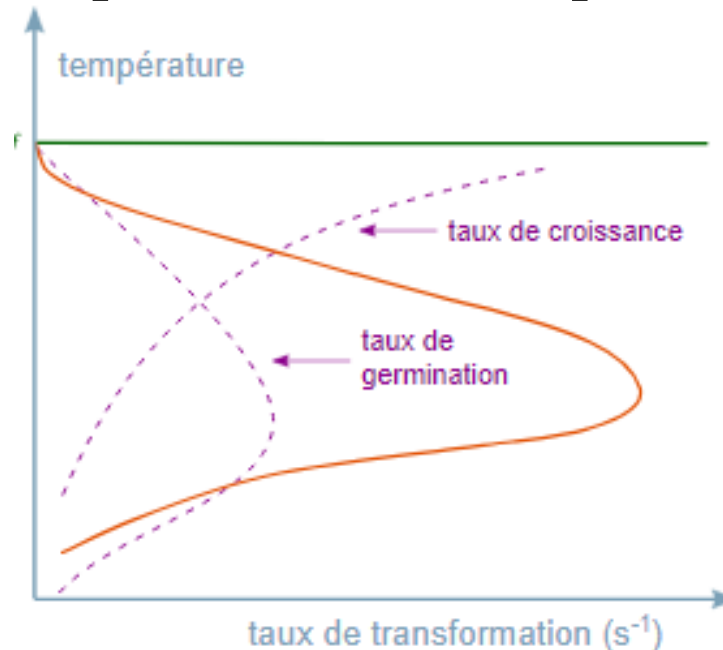
Nature du bain	Vitesse de refroidissement
La saumure	220° C/seconde
Eau froide	160° C/seconde
Eau tiède	150° C/seconde
Eau chaude	140° C/seconde
Huile de trempe	70° C/seconde
Air soufflé	20° C/seconde
Air calme	2° C/seconde
Un moule de sable	0,05° C/seconde
Un four	0,01° C/seconde (ou selon la programmation)

3-Traitement thermique

3-1-La trempe

3-1-1-Les diagrammes TTT (Transformation/Temps/Température)

Les diagrammes TTT permettent de prévoir la cinétique de transformation des phases par diffusion à une température donnée. Il s'agit d'une représentation isobare indiquant en fonction de la température et du temps de transformation la nature des phases en présence.

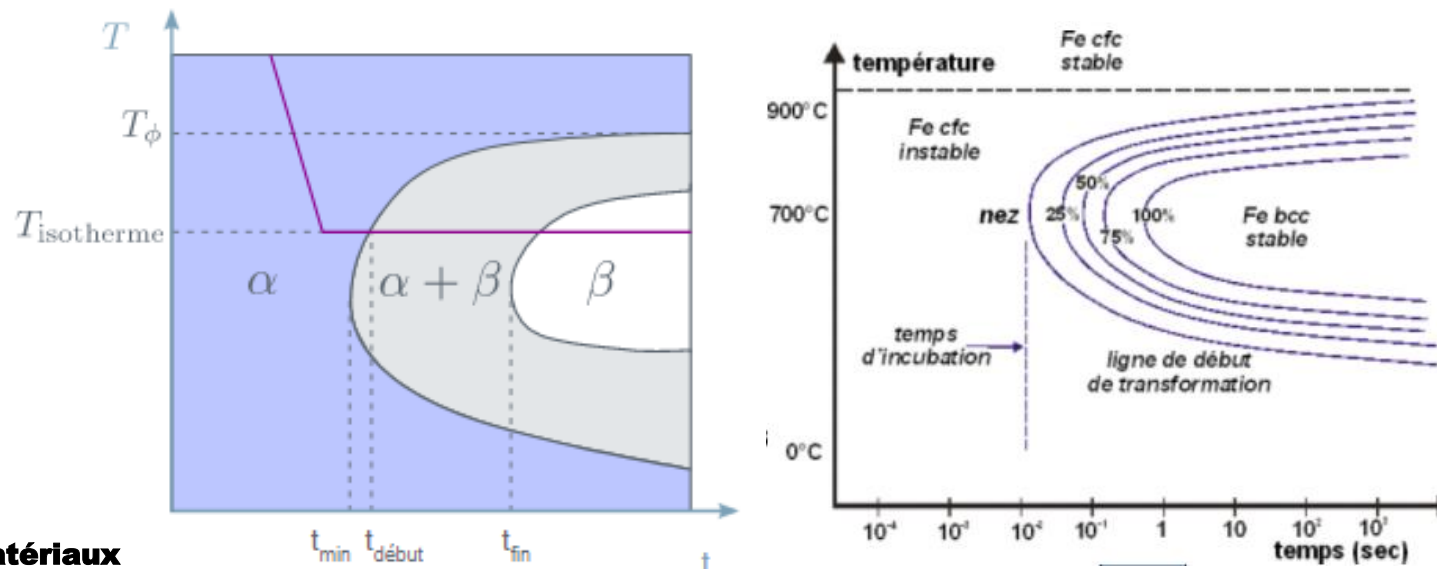


3-Traitement thermique

3-1-La trempe

3-1-1-Les diagrammes TTT (Transformation/Temps/Température)

Si l'on maintient le matériau à une température de transformation de phase, après refroidissement rapide (trempe), on aura un début de transformation à ($t_{\text{début}}$), puis une accélération suivie d'un ralentissement de la transformation quand les grains de la phase «produit» se rencontrent. La transformation s'arrête à (t_{fin}) lorsque tout le volume du matériau est transformé.

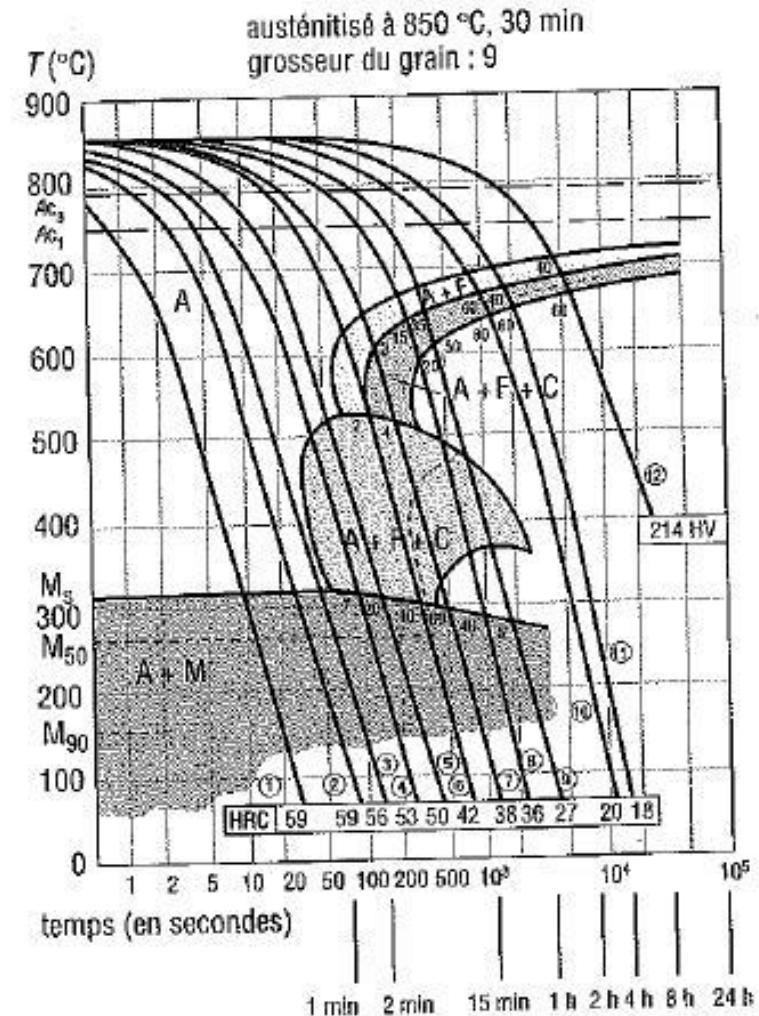


3-Traitement thermique

3-1-La trempe

3-1-1-Les diagrammes TRC (Transformation en Refroidissement Continu)

Un diagramme TRC présente les différents domaines par lesquels peut passer une certaine nuance d'alliage au cours d'un refroidissement. A la frontière de chaque domaine, on donne généralement la proportion (en %) de la phase traversée en fonction de la vitesse de refroidissement.



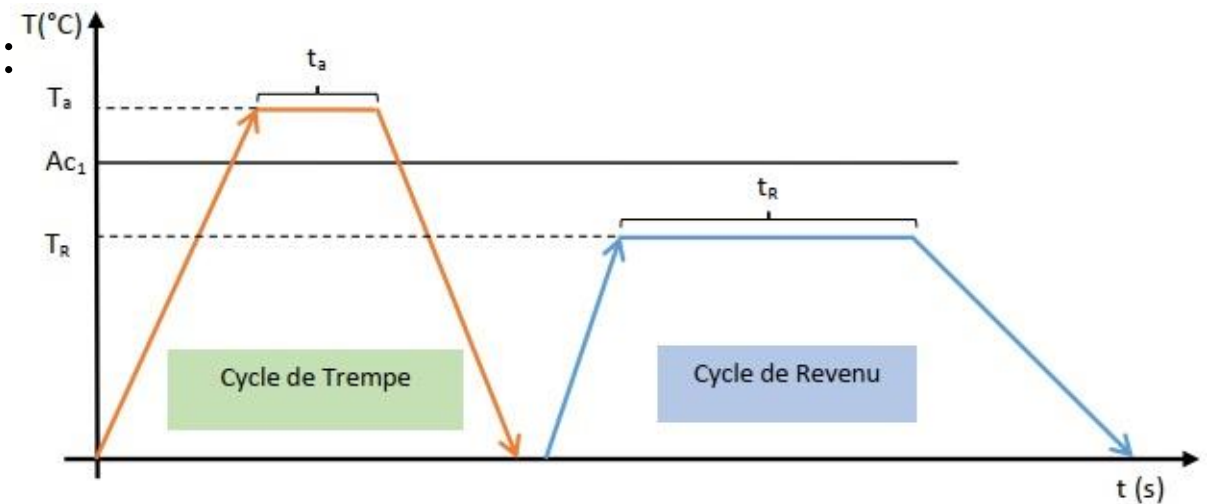
3-Traitement thermique

3-2-Le revenu

L'opération de revenu est destinée à provoquer un retour plus ou moins marqué vers l'état stable et d'atténuer ainsi la fragilité des pièces trempées tout en conservant une dureté suffisante. Le revenu permet aussi de diminuer notablement, voire supprimer, les contraintes résiduelles provoquées par la trempe.

On distingue plusieurs types de revenu :

- Revenu de relaxation ou de détente
- Revenu de structure ou classique
- Revenu de durcissement.



3-Traitement thermique

3-3-Le vieillissement

Le vieillissement est un processus utilisé pour augmenter la résistance en générant des précipités des éléments d'alliage dans la structure métallique. Le traitement de mise en solution consiste à chauffer un alliage à une température appropriée, maintenir cette température assez longtemps pour provoquer la transformation d'un ou de plusieurs constituants en une solution solide et le refroidir suffisamment vite pour maintenir ces constituants dans la solution.

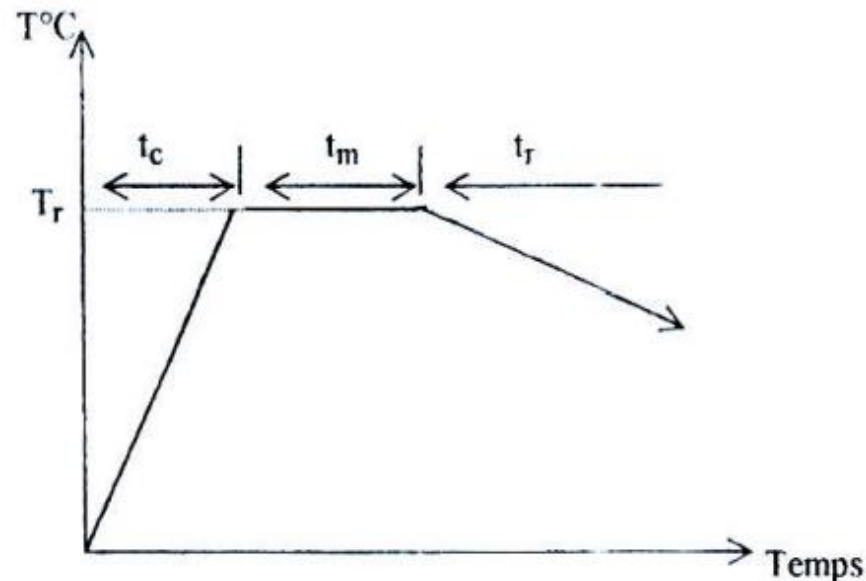
3-Traitement thermique

3-3-Le recuit

Le recuit est un processus de traitement thermique utilisé pour réduire la dureté, augmenter la ductilité et faciliter l'élimination des contraintes internes.

Le cycle thermique d'un recuit comprend :

- Un chauffage jusqu'à une température dite de recuit.
- Un maintien isotherme à la température de recuit.
- Un refroidissement très lent généralement à l'air calme.



3-Traitement superficiel

Pour de nombreuses utilisations, les propriétés des surfaces sont aussi importantes (dureté superficielle et résistances à l'usure, par exemple), que le traitement thermique de la masse. Les pièces pour lesquelles on effectue de tels traitements sont aussi nombreuses que variées : arbre de torsion, dents d'engrenages et de pignons, surfaces de glissement, etc.

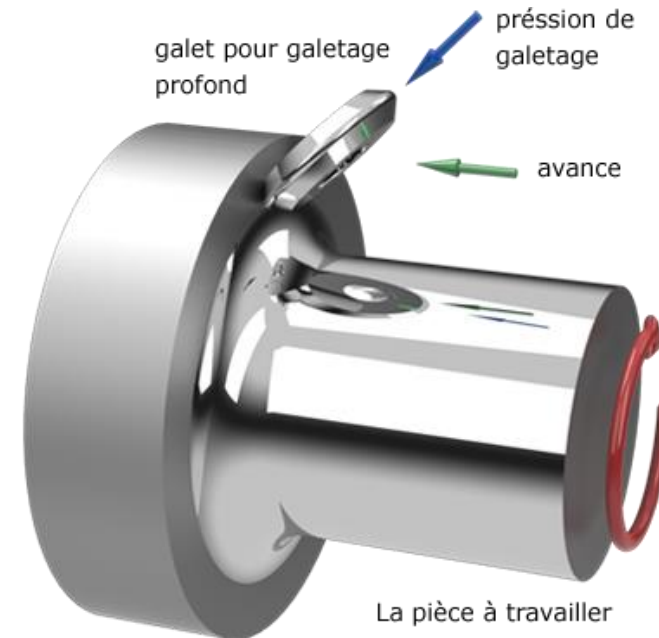
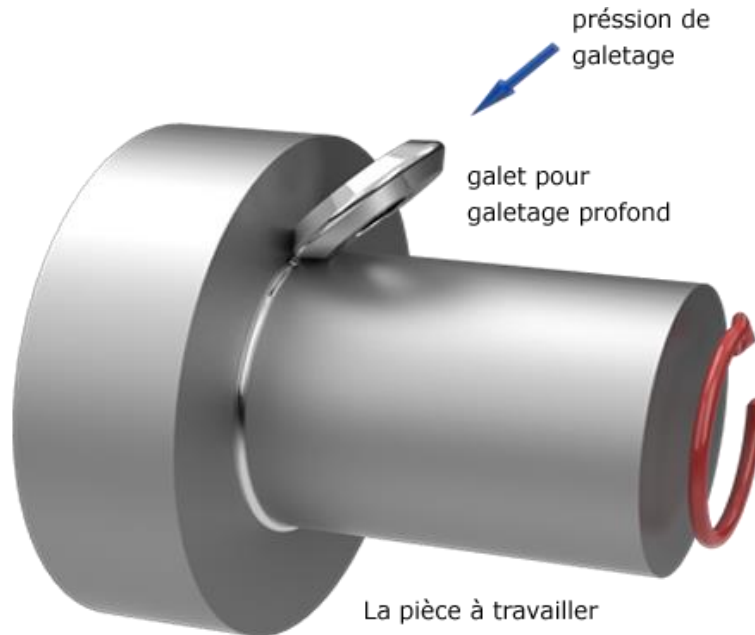
Les traitements de surface s'effectuent par voie mécanique (Galetage - Grenailage -Martelage -Usinage -etc) ou chimique (Cémentation- Nitruration- Carbonituration -etc).

3-Traitement superficiel

3-1-Traitement superficiel par voie mécanique

3-1-1-Le galetage

La couche superficielle est déformée plastiquement en utilisant des galets avec ou sans déplacement. On fait rouler sur la surface un galet sous une forte charge qui provoque de contraintes de compression.



3-Traitement superficiel

3-1-Traitement superficiel par voie mécanique

3-1-2-Le grenailage

Il consiste à bombarder les surfaces à traiter à l'aide de billes de petit diamètre à une grande vitesse. Les billes en acier ou céramique sont les plus utilisées. L'opération de grenailage est effectuée dans un but d'enlever la rouille, la calamine, etc).

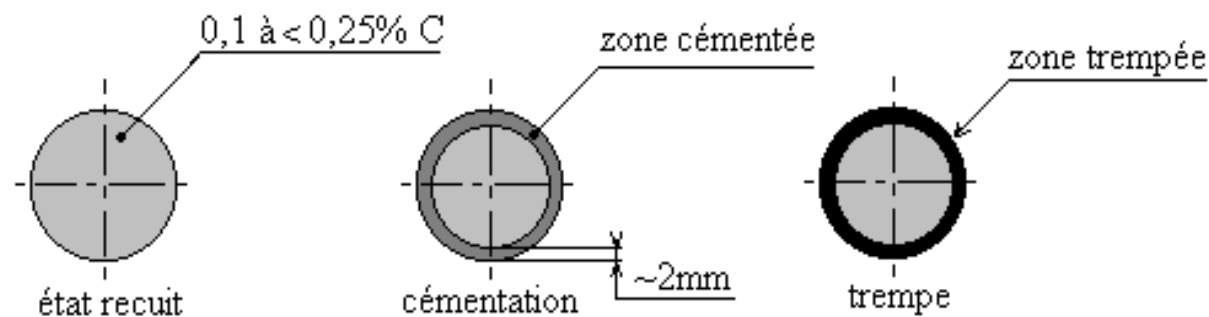


3-Traitement superficiel

3-2-Traitement superficiel par voie chimique

3-2-1-La cémentation

Ce traitement s'effectue comme exemple sur de aciers à faible pourcentage en carbone ($C < 0,25\%$), possédant une bonne ductilité en vue d'augmenter la dureté superficielle. Les pièces à cémenter sont mises en présence d'un corps riche en carbone appelé «cément». Celui-ci peut-être solide, liquide ou gazeux. L'ensemble (pièce - cément) est porté à une température élevée (875° à 925° C) nécessaire à la diffusion du carbone.



3-Traitement superficiel

3-2-Traitement superficiel par voie chimique

3-2-2-La nitruration

La nitruration est un procédé conduisant à l'obtention d'un durcissement superficiel par la diffusion d'azote vers 550 °C. Ce procédé améliore la durée de vie en fatigue ainsi que la dureté des pièces mécaniques fortement sollicitées mécaniquement.



4-La corrosion

La corrosion est la destruction chimique ou électrochimique des matériaux alliages (surtout métalliques) par leur environnement. Elle entraîne des modifications dans les propriétés de l'alliage et souvent une dégradation fonctionnelle.

- *Elle est sèche lorsque les agents oxydants ne sont pas en solution.
- *Elle est humide dans le cas contraire (dans le milieu aqueux).

4-La corrosion

4-1-La corrosion sèche

Il s'agit le plus souvent de l'attaque d'un métal (M) par un gaz (G) selon une réaction du type : $M \text{ (solide)} + G \text{ (gaz)} \rightarrow X \text{ (solide)}$. La réaction d'oxydation sera $M \rightarrow M^{n+} + ne^{-}$ et la réaction de réduction sera $n O_2 + 4ne^{-} \rightarrow 2n O^{2-}$

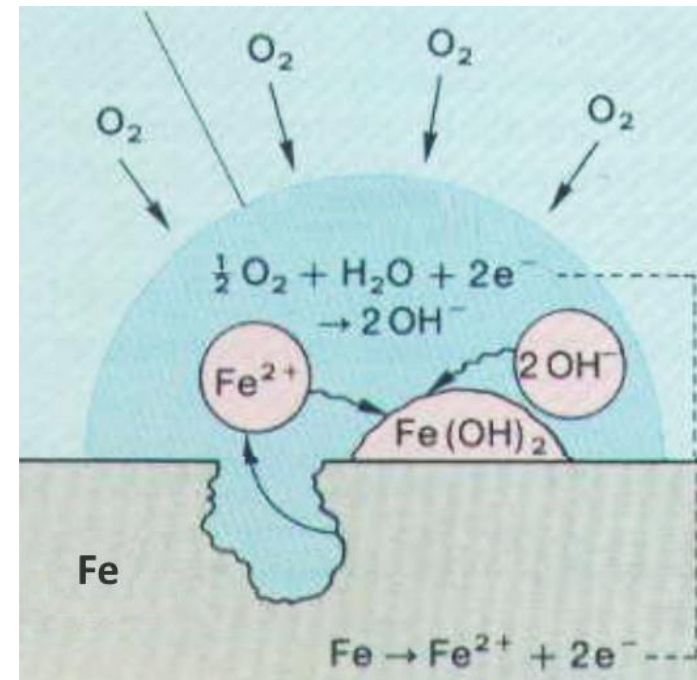
Le gaz considéré est souvent l'oxygène mais il faut aussi tenir compte d'autres gaz tels que: SO_2 , Cl_2 , Br_2 ou H_2S . Ce type de corrosion, sans intervention du courant électrique nécessite généralement des températures élevées.



4-La corrosion

4-2-La corrosion humide

Elle nécessite un conducteur électronique (le métal) et un conducteur ionique (l'électrolyte). En présence de ce dernier, les alliages peuvent subir une oxydation beaucoup plus rapide. Ce type de corrosion concerne les pièces partiellement ou complètement immergées, mais aussi les pièces soumises à l'humidité atmosphérique.



4-La corrosion

4-3-Protection contre la corrosion

*Revêtement non métallique;

Revêtements organiques, Revêtements inorganique

*Revêtement métallique;

Par électrolyse (chromage, nickelage, etc), Immersion dans un bain de métal fondu (galvanisation).

*Protection anodique;

Passivation, Couche protectrice, Protection anodique électrochimique.

*Protection cathodique;

Anode sacrificielle, Protection cathodique par courant imposé