

CHAPITRE V

ALLIAGES FER – CARBONE

Généralités

Les alliages fer-carbone, c'est-à-dire les aciers et les fontes, jouent un rôle capital dans la technologie actuelle. Les alliages fer-carbone sont de deux types ; l'un **stable** Fe-C (graphite) et l'autre **métastable** Fe-Fe₃C (Cémentite). Pour des aciers dont la teneur en carbone est inférieure à 1% en poids, on peut se limiter à l'étude du **système métastable**, car dans les conditions pratique, il ya toujours formation de cémentite (figure 24). Il présente de nombreuses réactions et transformations :

- réaction eutectique
- réaction péritectique
- réaction eutectoïde
- 2 transformations allotropiques
- un point de curie

Il possède en outre un composé défini : la cémentite

Trois domaines du diagramme sont étudiés :

- Z1 correspond au péritectique et à la transformation allotropique
- Z2 correspond à l'eutectique
- Z3 correspond à l'eutectoïde, la transformation allotropique et le point de curie

Zone 1, réactions péritectiques et allotropique

La zone supérieure Z1 (figure 24-b) est caractérisée par :

- la fusion du fer pur à 1538 °C
- par la réaction **péritectique** à 1499°C. A cette température, le liquide à 0.51% de carbone (en masse) + la phase δ à 0.09 % de carbone donne lors du refroidissement la phase γ (austénite) à 0.17% de C suivant la réaction : $\text{Liq} + \delta \rightarrow \gamma$
- la transformation allotropique $\gamma \leftrightarrow \delta$ à la température de 1392°C. La phase γ de structure cfc se transforme en fer δ de structure cc.

Zone Z2 réaction eutectique

La zone Z2 correspond au domaine des fontes, elle est caractérisée par :

- par la réaction eutectique à la température de 1147°C. A cette température, le liquide à 4.3 % de C se décompose pour donner simultanément la phase γ à 2.06 % de C et de la cémentite (Fe₃C) à 6.67 % de C suivant la réaction : $\text{Liq} \rightarrow \gamma + \text{Fe}_3\text{C}$. Le

constituant formé au cours de cette réaction isotherme réversible est nommé **lédéburite**.

- En dessous de 721 °C (palier eutectoïde) on retrouve le domaine $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$.

La zone Z3, réactions eutectoïde, allotropique et point de curie

L zone Z3 (figure 24 c) correspond au domaine des aciers, elle est caractérisée par :

- A 727 °C par la réaction eutectoïde. A cette température, la phase γ à 0.8 % de C se décompose lors du refroidissement, pour donner simultanément la phase α (ferrite) à 0.02 % C et de la cémentite (Fe_3C) à 6.67 % de C suivant la réaction : $\gamma \rightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$. Celle-ci a les mêmes caractéristiques qu'une transformation eutectique, mis à part le fait que la transformation s'opère à partir d'une solution solide γ , et non d'une solution liquide.

Le constituant lamellaire formé au cours de cette réaction isotherme réversible est nommé **perlite**.

- A 910°C par la transformation allotropique $\gamma \leftrightarrow \alpha$. La température de cette transformation est abaissée par l'addition de carbone de 912 °C à 727 °C. La phase γ de structure cfc se transforme en fer α de structure cc.

Point de curie :

Le fer pur perd son magnétisme à la température de 770 °C. Il devient paramagnétique. Le paramagnétisme est une Propriété des corps ou des substances paramagnétiques de s'aimanter faiblement dans le sens du champ magnétisant quand ils y sont placés. Cette transformation réversible est observée dans d'autres matériaux et alliages par exemple le Cobalt à la température de 1115°C, l'alliage CuOFe_2O_3 etc ...

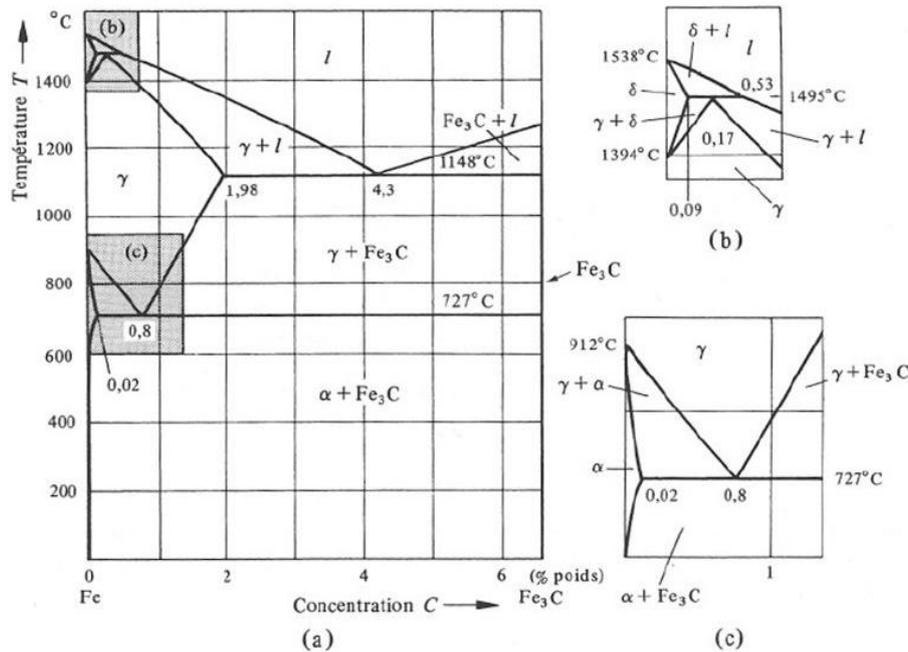


Fig.30 Diagramme fer-cémentite (Fe₃C) : (a) diagramme métastable utilisé pour les aciers et fontes blanches ; (b) détail du domaine d'équilibre péritectique ; (c) détail du domaine d'équilibre eutectique. La concentration en carbone est donnée en % poids.[3]

5.1 Aciers ordinaires recuits

5.1.1 Variétés allotropiques du fer pur :

On distingue plusieurs formes de fer qui diffèrent par leur magnétisme, leur pouvoir de dissolution du carbone, ou leur structure cristalline.

1° **Fer α.** – Cette forme existe au-dessous de 906°C. Le fer α ne dissout pratiquement pas de carbone (0.02 % au maximum à 721 °C et moins de 0.001 % à 300°C). Il cristallise dans le système cubique centré ; le côté du cube élémentaire est égal à 0.287 mμ à 20 °C. **Ferromagnétique** jusqu'à 770 °C (point de curie), entre 770 et 906°C, le fer α n'est plus **ferromagnétique**.

2° **Fer γ.** – Cette forme existe entre 906 et 1401°C. Le fer γ est **amagnétique**. La solubilité du carbone dans le fer γ croît de 0.85 % à 721°C jusqu'à 1.7 à 1145°C, puis décroît jusqu'à 0.17 % à 1487°C. Il cristallise dans le système cubiques à faces centrées avec un côté égal à 0.363 mμ à 1100°C. Le fer γ est plus dense et plus dilatable que le fer α.

3° **Fer δ.** – Le fer δ existe de 1401°C jusqu'à la température de fusion. Amagnétique, Il cristallise dans le système cubique centré. Le côté de sa maille étant égal à 0.293 mμ à la température de 1425°C.

5.2 Constituants des aciers recuits :

Ferrite. – La ferrite est constituée par du fer α ne renfermant que des traces de carbone à la température ambiante. Sa solubilité maximale est de 0.02% en masse à 721°C. Après attaque

au Nital, elle se présente sous forme de polyèdres blancs dont les joints de grains apparaissent en foncé. Elle n'est pas très dure ($HB = 80$), peu tenace ($R_m = 300\text{N/mm}^2$), mais elle est très ductile ($A = 35\%$) et très résiliente ($K = 30$). Sa masse volumique est de 7.86 kg/dm^3 .

Cémentite. – Cette combinaison est très dure, mais fragile ($K \approx 0$) ; $R_m = 700\text{N/mm}^2$. Elle apparaît en blanc après attaque au Nital sans que l'on puisse distinguer les joints de grains. Elle est colorée en rouge brun par le picrate de sodium. Elle donne une très bonne tenue à l'abrasion et à l'érosion.

Perlite. – C'est un mélange hétérogène de ferrite et de cémentite à 0.85% en masse de carbone (eutectoïde) qui peut avoir deux aspects : lamellaire ou globulaire (ou coalescée). Elle est très dure ($HB = 200$), tenace ($R_m = 850\text{N/mm}^2$) et assez ductile ($A\% = 10$), facile à usiner et offre une assez bonne résistance aux efforts statiques et à l'usure par frottements. Cet eutectoïde se présente généralement sous forme lamellaire (alternance de lamelles de ferrite et de cémentite dont l'épaisseur et les écarts dépendent de la vitesse de refroidissement). A faible grossissement, les lamelles peuvent ne pas être distinctes, on dit alors que la perlite est irrésolue.

Perlite globulaire ou coalescée : Petits globules blancs de Fe_3C de contour noir sur fond de ferrite. Cette structure est consécutive à un recuit d'adoucissement.

Austénite : C'est une solution solide de carbone (ou de plusieurs éléments) dans le Fer γ , elle peut dissoudre jusqu'à 1.7%. C'est le constituant intermédiaire de durcissement par trempe, après chauffage (austénitisation) et avant refroidissement (trempe). Elle est assez douce et assez facile à usiner. Elle possède un coefficient de dilatation élevé et une bonne résistance à l'usure. Elle possède une bonne résilience aux températures cryogéniques.

5.3 Aciers de construction pour traitements thermiques

La composition chimique comporte des valeurs limites en C, Mn, Si et P. On distingue deux nuances :

a. Les aciers courants :

Ils sont désignés par les lettres CC suivis d'un nombre qui désigne la teneur moyenne du carbone en centième pour cent (100 fois la teneur en carbone).

Exemple : CC 35

CC : Acier ordinaire pour traitement thermique. 35 : contenant 0,35 % de carbone.

Exemple de nuances normalisées : CC 10, CC 20, CC 30, CC 35, CC 55, etc.

b. Les aciers fins :

Ces aciers sont employés lorsque les caractéristiques mécaniques exigées sont sévères et nécessitent des transformations de structure par traitement thermique, leur élaboration s'effectue dans le four Martin. Leur désignation commence par les lettres XC suivis d'un nombre indiquant la teneur en carbone en centième pour cent. Dans cette catégorie d'aciers, les écarts tolérés pour le carbone et les impuretés sont réduits, ces aciers présentent plus de garantie que les aciers courants vis à vis de la teneur en carbone et en impureté

Exemple : XC 85

XC85 : Acier ordinaire pour traitement thermique, contenant 0,85 % de carbone.
Leur désignation peut être aussi suivie d'une lettre minuscule indiquant l'indice de pureté comme :

a : pureté minimale.

d : pureté moyenne.

m : pureté maximale.

Exemple de nuances normalisées : XC 10, XC 12, XC 18, XC 35, XC 38, etc.

5.4 Désignation des aciers alliés :

On appelle acier allié un acier contenant, en plus du fer et du carbone, un ou plusieurs éléments d'addition en proportions suffisantes pour modifier sensiblement au moins l'une des propriétés de l'acier ordinaire contenant la même teneur de carbone.

On distingue les aciers faiblement alliés et les aciers fortement alliés. Les aciers fortement alliés ont un élément d'addition ayant une teneur supérieure à 5%. Ce sont des aciers de grande pureté.

Les principaux éléments d'alliages et leurs symboles normalisés sont présentés dans le tableau ci-dessous avec le coefficient de teneur de chaque élément.

Pour les aciers faiblement alliés nous avons le tableau suivant :

Facteur multiplicateur	Symbole chimique des éléments
4	Cr, Co, Mn, Ni, Si, W
10	Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr
100	Ce, N, P, S
1000	B

Exemple :

30 Cr Ni Mo 8 :

L'absence de symbole devant le chiffre 30, donc nous sommes en présence d'un acier faiblement allié.

Le chiffre 30 veut dire contenant 0.30% de carbone.

Cr, Ni, Mo : Symboles chimiques des éléments d'addition dans l'ordre des teneurs décroissantes.

Teneur du 1er élément d'addition en % x facteur. Avec $8/4 = 2\%$ de chrome. Nickel et du molybdène en faible teneur (non précisée).

Elément d'alliage	Symbole chimique	Symbole métallurgique.	Elément d'alliage	Symbole chimique	Symbole métallurgique.
Aluminium	Al	A	Magnésium	Mg	G
Antimoine	Sb	R	Manganèse	Mn	M
Argent	Ag	Ag	Molybdène	Mo	D
Azote	N	N	Nickel	Ni	N
Béryllium	Be	Be	Niobium	Nb	Nb
Bismuth	Bi	Bi	Phosphore	P	P
Bore	B	B	Plomb	Pb	Pb
Cadmium	Cd	Cd	Silicium	Si	S
Cérium	Ce	Ce	Soufre	S	F
Chrome	Cr	C	Strontium	Sr	Sr
Cobalt	Co	K	Titane	Ti	T
Cuivre	Cu	U	Tungstène	W	W
Etain	Sn	E	Vanadium	V	V
Fer	Fe	Fe	Zinc	Zn	Z
Gallium	Ga	Ga	Zirconium	Zr	Zr
Lithium	Li	Li			

5.4.1 Désignations des aciers fortement alliés

Ce sont des aciers caractérisés par la présence d'un ou de plusieurs éléments d'addition et au moins un de ces éléments a une teneur supérieure à 5 %. Dans cette catégorie, on trouve les aciers inoxydables, les aciers rapides pour la confection d'outils, les aciers à résistance thermique etc. Leur désignation normalisée est toujours précédée par la lettre Z suivie :

- d'un nombre indiquant la teneur moyenne en carbone au centième pour cent.
- des symboles normalisés des éléments d'addition rangés dans l'ordre de teneur décroissante.
- des chiffres indiquant la teneur moyenne en pour cent des éléments d'addition. Dans le cas des aciers fortement alliés, les chiffres indiquent directement la teneur en % des éléments d'addition, donc il n'est pas nécessaire de diviser par les coefficients 4 ou 10 comme dans le cas des aciers faiblement alliés.

Exemple :

Z 160 CDV 12

Z : symbole de l'acier fortement allié contenant :

- 1,60 % de carbone.
- 12 % de chrome

Z 6 CN 18 – 09

C'est l'acier inoxydable courant contenant :

- 0,06 % de carbone

-18 % de chrome.

- 9 % de nickel.

5.1 Les Fontes

On appelle fonte, un alliage fer-carbone dont la teneur en carbone varie de 1,7 à 6,67 % C. Pratiquement la teneur en carbone dans la fonte varie de 3 à 4 % C, 92 % de fer ainsi que d'autres éléments tels que le silicium, le manganèse, le soufre et le phosphore. Elles ont une bonne aptitude au moulage. Ces alliages sont obtenus par solidification, et ont des caractéristiques qui dépendent des différentes phases qui les constituent (phases semblables à celles des aciers dans lesquelles vient s'insérer le graphite). L'apparition de ces phases s'explique à partir des phénomènes physiques liés à la solidification : la germination et la croissance. Le synoptique de la figure 30 décrit les diverses possibilités de structures des fontes et les modes d'élaboration.

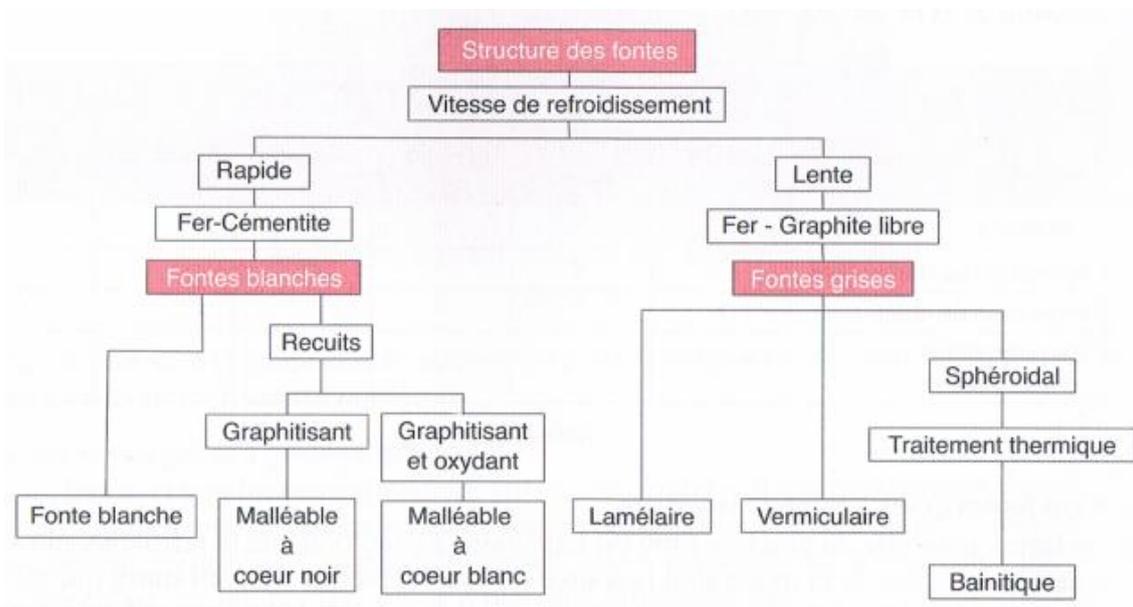


Fig. 31 Synoptique décrivant les diverses possibilités de structures des fontes [5]

On distingue deux types de fonte : les fontes blanches et les fontes grises

5.1.2 Les fontes blanches : sont ainsi appelées en raison de leur cassure blanchâtre mais aussi en raison de l'absence totale de graphite libre. L'obtention des fontes blanches est favorisée par un refroidissement lent, par la présence de manganèse(Mn) qui est un élément carburigène qui provoque la formation de la cémentite et empêche la précipitation du carbone sous forme de graphite libre. Les constituants de la fonte blanche sont ceux d'un acier hypereutectoïde, soit *cémentite* et *perlite*.

Ces fontes sont dures (HB = 350 à 500) ce qui leur donne une bonne résistance à l'abrasion. Ces fontes sont utilisées pour la fabrication de pièces devant résister à l'abrasion et ne nécessitant pas d'usinage tel que des mâchoires de concassage, buse de sablage etc...

5.1.3 Les fontes grises : La fonte grise contient la majorité de son carbone sous forme de graphite. C'est ce dernier qui donne à la fonte une couleur grisâtre à sa cassure. Elles sont constituées d'une matrice ferritique, perlitique ou mixte. Elles contiennent un pourcentage élevé en silicium (1 à 2,8%) qui est un élément graphitisant et du phosphore (< 1,5%) afin de diminuer le point de fusion.

Carbone équivalent (Céq) : paramètre qui tient compte de l'effet graphitisant du silicium et du phosphore :

$$\text{Céq} = \% \text{ C} + 1/3 (\% \text{ Si} + \% \text{ P}).$$

Cas de la fonte hypoeutectique : Céq < 4,3 % ;

Cas de la fonte eutectique : Céq = 4,3 % ;

Cas de la fonte hypereutectique : Céq > 4,3 %.

Les constituants des fontes grises sont au nombre de trois :

- Graphite
- Perlite
- Cémentite ou ferrite

Le troisième constituant n'existe pas dans la fonte rigoureusement perlitique. On peut prévoir que la fonte perlitique est celle qui résiste le mieux aux efforts mécaniques.

5.1.4 Les fontes à graphite lamellaire

L'obtention de ce type de fonte s'effectue avec un refroidissement lent afin de garantir la forme naturelle du graphite libre sous forme lamellaire. Ces lamelles de graphite sont la source de concentrations de contraintes qui rendent ces fontes fragiles en traction. Ces fontes ont une capacité d'amortissement des vibrations remarquable et une résistance élevée à la compression. Excellente usinabilité, forte résistance à l'usure par frottement à sec, Bonne résistance à la corrosion en milieux salins, acides et basiques.

Exemples d'application en mécanique : tambours, pistons, disques de freins, turbines, variateurs, couronnes dentées, engrenages...

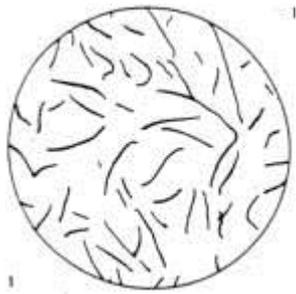
5.1.5 Les fontes à graphite sphéroïdal

La fonte grise à graphite sphéroïdal non alliée, à matrice ferrito-perlitique, est appelée fonte ductile ou nodulaire. Le graphite présent dans ces fontes se trouve sous une forme sphéroïdale, ce qui confère à ces fontes une bonne ductilité. Le magnésium est l'élément le plus utilisé pour l'obtention de fonte à graphite sphéroïdal.

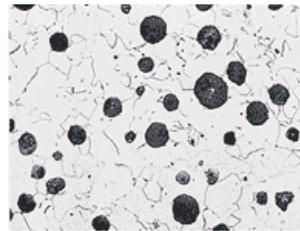
Caractéristiques mécaniques élevées, déformation avant rupture beaucoup plus élevée que les fontes grises, module d'élasticité voisin de celui des aciers. Très bonne résistance à la fatigue et bonne tenue aux températures élevées (jusqu'à 600°). Cette fonte est adaptée aux pièces soumises à des pressions importantes et résiste bien aux vibrations.

Exemples d'applications : machines-outils, Arbres à cames, bielles, disques de freins, pignons, vilebrequins...

Résistance à la corrosion équivalente à celle des fontes grises.



a) Fonte à graphite lamellaire



b) Fonte à graphite sphéroïdal

Fig.32 Micrographie d'une fonte à graphite lamellaire a) et à graphite sphéroïdal b)

Exercice n°1

La maille de NaCl

Lors de la cristallisation de NaCl, il ya formation d'une structure cubique. En prenant la masse moléculaire de NaCl égale à 58,46 et la densité égale à $2,167\text{g/cm}^3$, calculer la distance interatomique (distance entre deux atomes voisins).

Solution :

Masse des molécules de NaCl

$$58,46\text{g/mole} : 6,02 \times 10^{23} = 9,7 \times 10^{-23} \text{ g}$$

Calculons le nombre de molécules de NaCl par unité de volume

$$2,167\text{g/cm}^3 : 9,7 \cdot 10^{-23} \text{ g} = 2,23 \cdot 10^{22} \text{ molécules/cm}^3$$

Comme NaCl est une liaison diatomique, alors nous pouvons trouver le nombre d'atomes par unité de volume :

$$2\text{atomes/molécule} \times 2,23 \cdot 10^{22} \text{ molécules/cm}^3 = 4,5 \cdot 10^{22} \text{ atomes/cm}^3$$

Soit **a** la distance entre deux atomes voisins mesurée le long de l'arête du cube et **n** le nombre d'atomes le long d'une arête du cube de longueur 1 cm. Alors la longueur de l'arête sera égale à na et le volume du cube à n^3a^3 . Comme n^3 est le nombre d'atomes dans 1 cm^3 , nous obtenons :

$$4,5 \cdot 10^{22} \text{ atomes/cm}^3 \times a^3 = 1$$

$$\text{C'est-à-dire : } a^3 = 2,24 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^3 \quad \text{ou bien} \quad a = 2,82 \cdot 10^{-8} \text{ cm} = \mathbf{2,82 \text{ \AA}}$$

Exercice n° 2

Le **chlorure de potassium** est un composé chimique minéral de formule KCl. Sous sa forme solide, ce sel neutre équivaut au minéral tendre nommé **sylvine**, ou sel amer, ou encore sylvite en anglais, de structure cristallographique cubique à faces centrées de densité $1,98 \text{ g/cm}^3$.

Calculer :

- La distance entre deux atomes voisins (**Réponse** : $3,14 \text{ \AA}$)
- La distance minimale entre deux atomes de même sorte (**Réponse** : $6,28 \text{ \AA}$)

Exercice n°3

Dans le composé défini Mg_2Si , les atomes de silicium sont en position c.f.c (longueur de l'arête = $0,639 \text{ nm}$). Les atomes de magnésium sont en position cubique simple.

- Calculer la masse volumique de ce corps.

- Calculer la distance entre deux atomes de magnésium et entre un atome de magnésium et un atome de silicium voisins.
- Le rayon de covalence du magnésium est de 0,16 nm et celui de l'ion magnésium est 0,065 nm.
En déduire la structure de Mg_2Si , et calculer sa compacité.

Exercice n°4

La maille du sulfure de zinc est telle que le zinc occupe les positions d'un système c.f.c (arête 2 a), et que chaque atome de soufre est au centre du volume V constitué par les atomes de zinc qui l'entourent.

- Indiquer la nature géométrique (nom et valeur du coté) de V.
- Indiquer la nature géométrique du solide constitué par les atomes de soufre entourant un atome de zinc.
- Les atomes de soufre intérieurs à la maille de zinc sont situés aux sommets d'un solide que l'on définira.
- Quelle est la nature du réseau du soufre ?

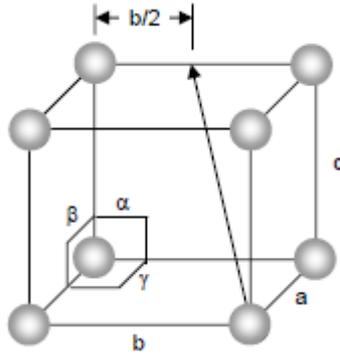
Exercice n°5

On considère un carbure de tungstène qui cristallise dans un système hexagonal ; les atomes de tungstène sont les bases du prisme, tandis que ceux de carbone sont dans la section droite moyenne.

- Déterminer la formule de ce carbure, et calculer sa masse volumique($a = 0,2906$ nm et $c = 0,2837$ nm).
- Calculer les rayons atomiques du tungstène et du carbone (en supposant que certains atomes sont en contact) et la compacité.
- Le tungstène cristallise dans le système cubique centré, le coté de la maille étant de 0,3156 nm.
En déduire le rayon ionique du tungstène.

Exercice n°6

Considérez la maille élémentaire du polonium (Po) représentée ci-contre. Bien entendu, dans le cristal réel, les atomes de polonium se touchent. Le motif associé à cette maille est constitué d'un atome sphérique de rayon R et les paramètres de la maille sont tels que :



$$\mathbf{a} = \mathbf{b} = \mathbf{c} = 0,3354 \text{ nm} \quad ; \quad \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

- Déterminez le système cristallin, le réseau de Bravais ainsi que la compacité de cette maille.
- Donnez le nom du site situé au centre de la maille. Combien la maille possède-t-elle de tels sites en propre ?
- Exprimez, en fonction du rayon \mathbf{R} des atomes de polonium, le rayon \mathbf{r} de ce site.
- Dans le cas où ce site est occupé par un autre atome, quel est alors le réseau de Bravais ? Justifiez votre réponse.
- Indexez la direction dessinée sur la figure ci-dessus.
- Dans la maille donnée sur le formulaire de réponse, dessinez les plans (111) et (011).
- Calculez la densité surfacique d'atomes de polonium (en at/nm^2) dans le plan (111).
- Quelle est la masse volumique théorique (en g/cm^3) du polonium ?

Données : Masse atomique $\mathbf{Po} = 209 \text{ g/mol}$

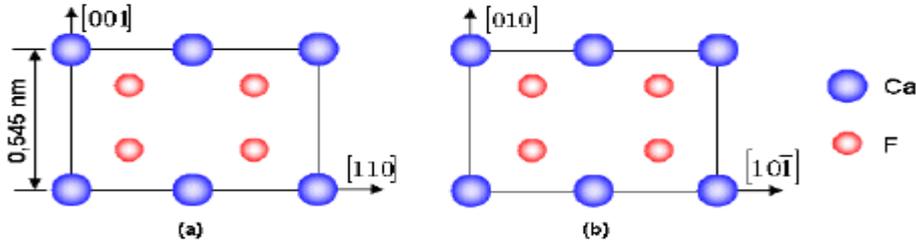
$$\text{Nombre d'Avogadro: } \mathbf{N_A} = 6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

Exercice n°7

Le fluorure de calcium cristallise selon le système cubique et la figure ci-contre montre la disposition des ions \mathbf{Ca} et \mathbf{F} dans deux plans particuliers de cette maille cubique.

- Quels sont les indices de Miller des plans **(a)** et **(b)** ?
- Quels sont les indices de la direction réticulaire définie par l'intersection des plans **(a)** et **(b)** ?
- Quel est le réseau de Bravais du fluorure de calcium ?
- Quel type de site occupent les ions \mathbf{F} dans le réseau de Bravais défini par les ions \mathbf{Ca} ? Quelle est la proportion de ces sites occupés dans une maille élémentaire ?
- Combien d'ions \mathbf{Ca} et d'ions \mathbf{F} appartiennent au motif associé à ce cristal ? Donnez les coordonnées relatives des ions du motif dans la maille.
- Quelle est la masse volumique théorique (en g/cm^3) du fluorure de calcium ?

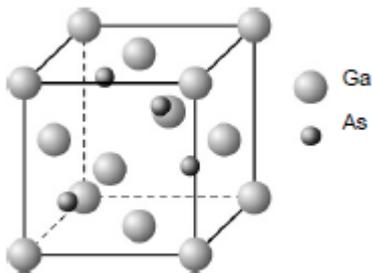
Données : Masse atomique (g/mole) : **Ca = 40,08** **F = 19,00**
 Nombre d'Avogadro: $N_A = 6,022 \times 10^{23} \text{ mole}^{-1}$



Exercice n°8

L'arséniure de gallium GaAs est un semi-conducteur très prometteur. Sa structure cristalline est représentée ci-contre. Son paramètre de maille **a** est égal à 0,565 nm.

- Quel est le réseau de Bravais du GaAs ?
- Quel type de sites occupent les atomes d'arsenic (As) dans la maille élémentaire et en quelle proportion ?
- Sur la figure donnée au formulaire de réponse, dessinez le plan (110) et calculez la densité atomique superficielle d'atomes dans ce plan.
- Calculez la masse volumique théorique ρ du GaAs (en g/cm^3)

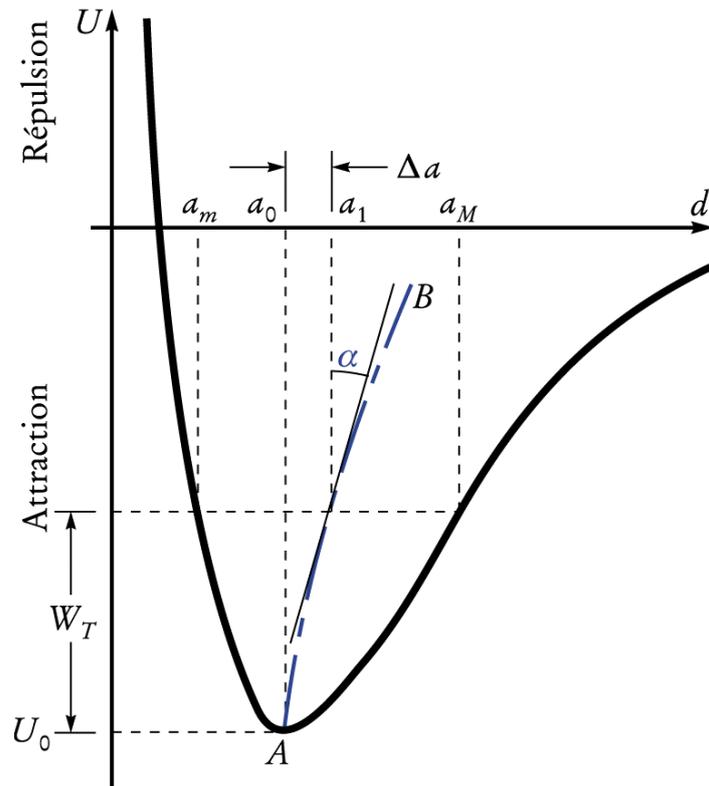


Données : Masse atomique (g/mole): **Ga = 69,72** **As = 74,92**
 Nombre d'Avogadro : $N_A = 6,022 \times 10^{23} \text{ mole}^{-1}$

Exercice n°9

La courbe ci-contre schématise la variation de l'énergie interne **U** d'un ensemble d'atomes (au zéro degré absolu) en fonction de la distance **d** entre ces atomes. Cette courbe est caractérisée par certains paramètres **A**, **B**, **C**, **D** et **F**.

Dans la liste des propriétés d'un matériau qui est donnée sur le formulaire de réponse, associez l'un des paramètres **A**, **B**, **C**, **D** ou **F** à la propriété qui y est directement reliée.



Exercice n°10

Selon la température, l'étain peut se présenter à l'état solide sous deux formes allotropiques : L'étain gris (α) et l'étain blanc (β). À la température ambiante, la forme d'équilibre est la forme β , dont la maille cristalline est représentée ci-contre. La masse atomique de l'étain (Sn) est égale à 118,7 g/mole. Nombre d'Avogadro $N_A = 6,022 \times 10^{23}$

- Quel est le système cristallin de l'étain blanc (β) ?
- Quel est le réseau de Bravais de l'étain blanc (β) ?
- Quelle est la masse volumique théorique ρ (en g/cm³) de l'étain blanc (β) ?
- Calculez la densité linéique d'atomes (en at/nm) selon la direction $[1\ 1\ 1]$.
- Calculez la densité surfacique d'atomes (en at/nm²) dans les plans (101) et (1 10) .
- Combien de plans particuliers contiennent la famille $\{101\}$ et la famille $\{110\}$?

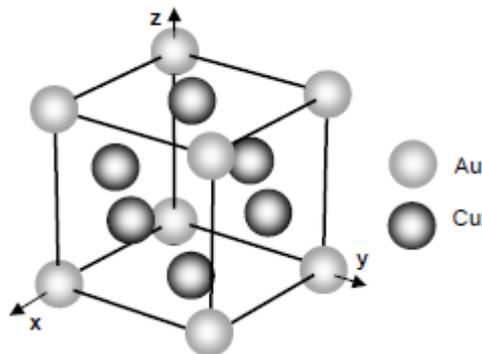
Exercice n°11

Ci-contre, voici la disposition des atomes d'or (Au) et de cuivre (Cu) dans la maille élémentaire d'un composé de ces deux métaux. Afin d'assurer plus de lisibilité, les atomes représentés sur la figure ne sont pas tangents, mais en réalité, les atomes de Au et de Cu se touchent selon les directions (011).

Données :

Rayon atomique r : $r_{\text{Cu}} = 0,128 \text{ nm}$; $r_{\text{Au}} = 0,144 \text{ nm}$
Masse molaire A : $A_{\text{Cu}} = 63,54 \text{ g/mole}$ $A_{\text{Au}} = 197,0 \text{ g/mole}$
Nombre d'Avogadro : $N_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ at/mole}$

- Quel est le réseau de Bravais qui décrit ce composé ?
- Quel est le motif associé à ce réseau ? *Sur la figure donnée au formulaire de réponse, encerclez par un seul trait l'ensemble des atomes constitutifs de ce motif.*
- Sur la figure donnée au formulaire de réponse, tracez le plan (1 10) .
- Quelle est la densité surfacique (en at/nm²) d'atomes de cuivre et celle d'atomes d'or dans ce plan (1 10) ?
- Quelle est la densité linéique (en at/nm) d'atomes de cuivre et celle d'atomes d'or le long de la direction {112} ?
- Quelle est la compacité (exprimée en %) de ce cristal ?
- Quelle est la masse volumique théorique (en g/cm³) de ce cristal ?



Exercice n° 12

A l'annexe 1, vous disposez du diagramme d'équilibre étain – or (Sn – Au). Vous disposez aussi des données suivantes :

Masse atomique : $A_{\text{Sn}} = 118,65$ g/mole

$A_{\text{Au}} = 196,97$ g/mole

a) Combien y a-t-il de réactions eutectiques sur ce diagramme ? Identifiez une réaction eutectique en donnant la température de cette réaction ainsi que les phases en présence et leurs compositions exprimées en %m Au.

b) Sur ce diagramme, la verticale notée β représente-t-elle :

- Un composant ?
- Une réaction eutectoïde ?
- Une réaction eutectique ?
- Un composé défini stoechiométrique ?
- Un composé défini non stoechiométrique ?

c) Quelle est la formule chimique de la phase γ ?

d) A $216,9$ °C, quels sont les constituants présents dans un alliage Sn + 20% m Au, refroidi à l'équilibre à partir de 300 °C ? Donnez la composition et la proportion massique de ces constituants.

e) Quelle est la solubilité maximale de l'étain dans l'or (exprimée en %m Sn) ?

f) Les alliages riches en or (%m Au > 90 %) peuvent-ils théoriquement se prêter à un traitement de durcissement structural ? Justifiez votre réponse et, si oui, indiquez pour quelle composition on obtiendrait un durcissement structural maximal.

Exercice n° 13

Diagramme d'équilibre Mg – Pb

Considérez le diagramme d'équilibre Mg – Pb donné en annexe.

- Quelle est la formule chimique du composé Mg_xPb_y ? Est-ce un composé stoechiométrique ? Justifiez votre réponse.
- Quelles sont les phases en présence dans les domaines numérotés **1** et **2** sur le diagramme ?
- A quelle température la solubilité du Pb dans le Mg est-elle maximale ?
- Combien y a-t-il de réactions eutectiques dans ce diagramme ? Écrivez ces réactions indiquez leur température et les compositions des phases en présence.
- Quels sont les phases et les constituants présents à 465 °C dans un alliage contenant 10% molaire de Pb ? Pour chacun(e) d'entre eux (elles), donnez leur composition (en % mol. de Pb) et leur proportion (en % mol.).

f) Que se passe-t-il si l'on refroidit, à l'équilibre, l'alliage (contenant 10% molaire de Pb) de 465°C à 20°C ?

