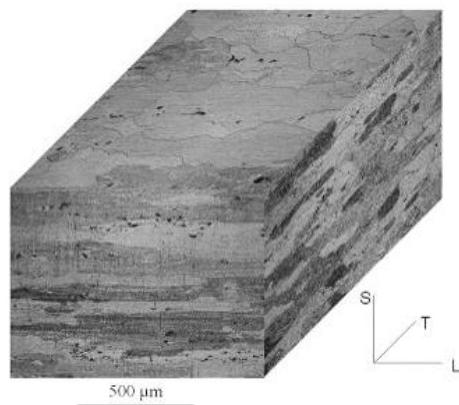


Matériaux

Structure de la matière Diagrammes de phases

Cours et exercices corrigés



Frédéric Menan

<https://lesdocsduprof.com/>

fmenan@cesi.fr

2024

Table des matières

1	LES MATERIAUX DANS L'HISTOIRE	3
1.1	LES MATERIAUX SONT UN GRAND FACTEUR DE PROGRES, D'INNOVATION, DE COMPETITIVITE.....	3
1.2MAIS DERRIERE TOUT GRAND POUVOIR SE CACHENT DE GRANDES RESPONSABILITES	4
1.3	LA SITUATION DES MATERIAUX AUJOURD'HUI.....	6
2	STRUCTURE DE LA MATIERE	9
2.1	L'ATOME	9
2.2	L'ELECTRON EST UNE PARTICULE.....	9
2.3MAIS AUSSI UNE ONDE.....	9
2.4	CONFIGURATION ELECTRONIQUE DE L'ATOME	9
2.5	CLASSIFICATION PERIODIQUE DES ELEMENTS	10
2.6	LIAISONS INTERATOMIQUES.....	11
2.7	ENERGIES DE LIAISON	14
2.8	STRUCTURE DES MATERIAUX SOLIDES	14
2.9	STRUCTURES AMORPHES.....	14
2.10	STRUCTURES CRISTALLINES	15
2.11	VIDEOS	22
3	DIAGRAMMES D'EQUILIBRES DE PHASES.....	23
3.1	DEFINITIONS.....	23
3.2	REGLE DE GIBBS.....	24
3.3	SYSTEMES A 1 CONSTITUANT (ETUDE DU CORPS PUR)	25
3.4	SYSTEMES A 2 CONSTITUANTS (ALLIAGES BINAIRES).....	26
3.5	COMPORTEMENTS TYPIQUES RENCONTRES DANS LES SYSTEMES BINAIRES	28
3.6	SYSTEMES A 3 CONSTITUANTS, DIAGRAMME TERNAIRE, REGLE DE GIBBS POUR UN SYSTEME A 3 CONSTITUANTS	35
3.7	DIAGRAMMES D'EQUILIBRES DE PHASES : DIAGRAMME DE L'AIR HUMIDE.....	38
4	EXERCICES.....	42
4.1	STRUCTURE DE LA MATIERE	42
4.2	ANALYSES ET MICROSCOPIE	46
5	REFERENCES	51

Remarque : certains chapitres de ce texte ont été rédigés il y a longtemps et démarrés sur des Powerpoint dont les crédits photos se sont parfois perdus en route. J'essaie de citer l'ensemble de mes sources dans les références en fin de document. Si j'ai oublié de vous citer vous pouvez m'envoyer un mail fmenan@cesi.fr et je corrigerai le document.

Pour toute info ou remarque : fmenan@cesi.fr

1 Les matériaux dans l'Histoire

Le domaine des matériaux est certainement une des disciplines scientifiques les plus décisives dans l'Histoire. L'importance des matériaux est telle que certaines périodes ont été nommées par le « matériau du moment » : l'âge de pierre (paléolithique, mésolithique, néolithique,), l'âge du fer, l'âge de bronze.

1.1 Les matériaux sont un grand facteur de progrès, d'innovation, de compétitivité.....

Citons le silex, une céramique naturelle aux propriétés très spéciales. Comme la plupart des céramiques c'est un matériau très dur. De plus une fois taillé, la courbure de son arête est très fine car du même ordre de grandeur que la taille de grains.



Figure 1. Réf CNRS Photothèque

Début XV^o : des boulets de canon en pierre aux boulets en fer : début du déclin des châteaux forts

1830-40 Charles Goodyear. Vulcanisation du caoutchouc : Quelques années plus tard (Thomson, Dunlop) : invention du pneumatique !

Biomédical

- 500 000 prothèses de hanche posées tous les ans dans le monde
- Prothèses de hanche, agrafes osseuses, vis, plaques, outillage de chirurgie...

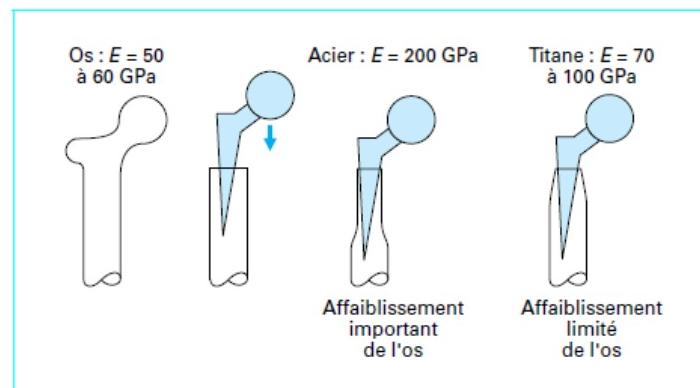


Figure 11 – Comparaison de prothèses de hanche en alliage de titane et en acier

Figure 2. Référence Techniques de l'Ingénieur TI-m557

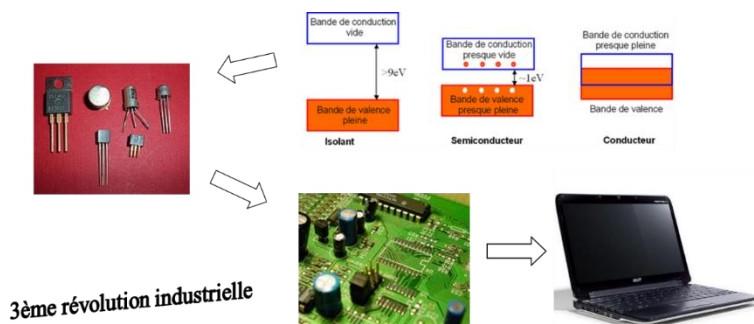
L'essor de l'aéronautique est directement lié à l'utilisation des alliages d'aluminium à la place du bois à partir des années 1920, à l'utilisation des superalliages résistant aux hautes températures et permettant la conception du réacteur à la place des moteurs à piston.

L'avion ci-dessous est le SR-71 Blackbird, un avion d'espionnage américain issu de la guerre froide. Son objectif ? Aller plus vite que les missiles russes pour voler au-dessus des territoires « ennemis » et prendre quelques photos au passage. Le frottement avec l'air était tel que les ingénieurs ont du concevoir un fuselage entièrement en alliages de titane pour résister aux températures élevées.



Figure 3. SR-71 Blackbird

L'effet Hall des semi-conducteurs, une simple propriété matériau parmi tant d'autres..... Découverte au XIX^{ème} siècle, elle est directement à l'origine de la révolution numérique qui nous bouleverse encore aujourd'hui. Les semi-conducteurs (années 1940-1950) ont permis la création du transistor, élément de base des cartes électroniques. On parle de 3^{ème} révolution industrielle et c'est grâce à l'effet Hall que j'écris cette phrase depuis mon ordinateur portable confortablement installé sur mon fauteuil.



Et puis les matériaux comme argument marketing, on ne pouvait pas y couper.....



1.2mais derrière tout grand pouvoir se cachent de grandes responsabilités

1.2.1 Sécurité des biens et des personnes



Figure 4. Fatigue corrosion Aloha Vol 243 28 avril 1988



. (a) General view of the failed crankshaft and (b) close-up view of fracture location.

Figure 5. [1]



Figure 6. Airbus A380 Qantas – 2010 (Air & Cosmos N°2244 10 décembre 2010 [2])

1.2.2 Corrosion

- Sécurité des personnes
- Coût économique
- Esthétique

20% de la production mondiale d'acier juste pour remplacer/réparer les structures corrodées.



Figure 7. Ma lampe de salon après quelques semaines d'utilisation (et patapon....)

1.2.3 Santé publique et Protection de l'environnement

- Nanomatériaux

« des matériaux très petits et potentiellement dangereux (rapport) AFP. L'agence française de sécurité alimentaire et sanitaire Anses a mis en garde jeudi contre les dangers potentiels mais encore largement inexplorés des matériaux de l'infiniment petit, les nanomatériaux, et réclamé une réglementation européenne plus stricte à leur égard. »

http://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/materiaux-innovants-nano-thematique_6342/nanomateriaux-des-materiaux-tres-petits-et-potentiellement-dangereux-rapport-article_285017/?utm_source=ABO&utm_medium=alerte&utm_campaign=72/WP/VY4MATI

- Produits chimiques dans les papiers, gestion des forêts

Figure 8. Le verso d'un ticket de caisse. 2023 Cela dit aujourd'hui le problème est résolu : finis les tickets papier, bonjour les tickets par mail. Ou comment le problème a seulement été déménagé.....

Boues rouges en Méditerranée (industrie de l'aluminium), Amiante, Bisphénol A, Plomb.....

Aujourd'hui où en est on ? https://www.francetvinfo.fr/replay-radio/dans-la-peau-de-l-info/reglement-reach-la-commission-europeenne-enterre-sa-reforme-de-reglementation-des-produits-chimiques_6101697.html



1.3 La situation des matériaux aujourd'hui

- Plus de 80 000 matériaux différents
- Production annuelle mondiale d'acier : ≈1000 millions de tonnes
- Production annuelle mondiale d'alu : ≈43,5 millions de tonnes (2011) (1.380 kilos par seconde)
- Production annuelle mondiale de matières plastiques : ≈265 millions de tonnes

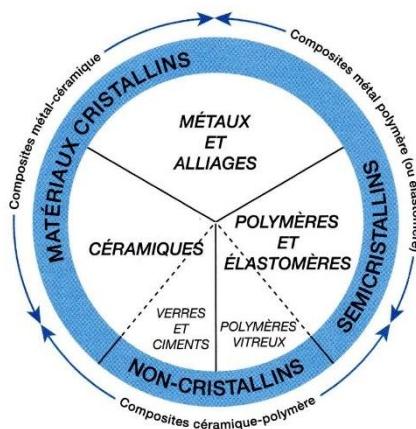


Figure 9. Typologie des types de matériaux d'après [3]

1.3.1 Des produits de la vie courante de haute technologie

« Quels matériaux se cachent derrière le prix exorbitant de l'iPhone 6 ?

L'écran rassemble un grand nombre de terres rares comme le praséodyme, le terbium, l'yttrium et le gadolinium, auxquels s'ajoutent de l'indium et de l'étain. En effet, pour obtenir la propriété « tactile », l'oxyde d'indium est combiné à du dioxyde d'étain pour former de l'oxyde d'indium dopé à l'étain. Pour renforcer son écran, on le plonge dans un bain de sels de potassium. Cette trempe chimique du verre permet de mettre la surface du verre en compression pour augmenter sa dureté en remplaçant les ions sodiums présents dans l'écran par les ions potassium, plus gros, contenus dans le bain. La batterie Lithium-ion contient évidemment du lithium. Le microphone est fait avec du nickel, de l'étain et du plomb. Les puces sont en silicium, lui-même dopé à l'arsenic, au phosphore, à l'antimoine ou au bore. »

http://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/quels-materiaux-se-cachent-derriere-le-prix-exorbitant-de-l-iphone-6-article_288856/?utm_source=ABO&utm_medium=alerte&utm_campaign=72/WP/VY4MATI



Figure 10. Catalogue Leroy Merlin Salons de jardin

Passons maintenant au vif du sujet et commençons par le commencement : la **structure de la matière**.

2 Structure de la matière

2.1 L'atome

Un atome est constitué d'un noyau et d'électrons. Le noyau est constitué de neutrons (charge neutre) et de protons chargés positivement. Le nombre de masse A est la somme des nombres de protons et de neutrons. Le numéro atomique Z est le nombre de protons, égal au nombre d'électrons dans un atome. Un élément chimique est défini par la valeur de Z .

2.2 L'électron est une particule.....

Dans l'Histoire, les premiers modèles de l'atome considèrent l'électron comme une particule de masse donnée, qui gravite autour de l'atome suivant une trajectoire appelée « orbite ».

2.3Mais aussi une onde

Le développement de la théorie quantique a mené à une autre façon d'aborder l'électron : c'est maintenant, dans cette théorie, une onde. On parle de dualité onde-particule.

Dans cette théorie, l'électron ne suit plus une trajectoire, mais peut être trouvé avec une certaine probabilité dans une région de l'espace autour du noyau, région appelée « orbitale atomique » (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

2.4 Configuration électronique de l'atome

Pour « décrire » totalement l'état d'un électron, il va falloir caractériser son niveau d'énergie, son orbitale, son moment magnétique et son spin. On utilisera pour cela les 4 nombres quantiques n , l , ml et ms (n , l et ml définissent le niveau d'énergie et l'orbitale).

- n : nombre quantique principal : 1, 2, 3, 4 : énergie globale de l'électron
- l : nombre quantique secondaire : 0, 1, 2, $n-1$: orientation de l'orbitale
- ml : moment magnétique : $-l$ à l
- ms : spin $\pm 1/2$

Le principe d'exclusion de Pauli (1925) précise que deux électrons ne peuvent avoir leurs 4 nombres quantiques égaux. Par conséquent, ils se répartissent en niveaux d'énergie discrets, appelés couches électroniques (elles deviennent des bandes dans les solides regroupant plusieurs atomes) et définis par le nombre quantique n . Ces couches se répartissent en sous-couches définies par le nombre quantique secondaire l . La nomenclature adoptée est en Figure 11.

La couche de Valence (ou couche externe) est la couche ayant le nombre quantique n le plus élevé.

<i>n</i> (couche)	<i>l</i> (sous-couches)	<i>m_l</i>	<i>m_s</i>	Nombre d'électrons	
				Sous-couche	Couche
1 (K)	0 (1s)	0	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$	2	2
2 (L)	0 (2s)	0	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$	2	8
	1 (2p)	-1	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$		
		0	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$	6	
		+1	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$		
3 (M)	0 (3s)	0	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$	2	18
	1 (3p)	-1	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$		
		0	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$	6	
		+1	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$		
	2 (3d)	-2	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$		
		-1	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$		
		0	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$	10	
		+1	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$		
		+2	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$		

Figure 11. Nomenclature pour la définition des couches et sous-couches électroniques [4]

2.5 Classification périodique des éléments

On a observé que les atomes de deux éléments différents, bien qu'ayant un nombre d'électrons différents, peuvent montrer des propriétés analogues s'ils ont le même nombre d'électrons absents de leur couche de valence (Figure 12). On parle de périodicité des propriétés des matériaux.

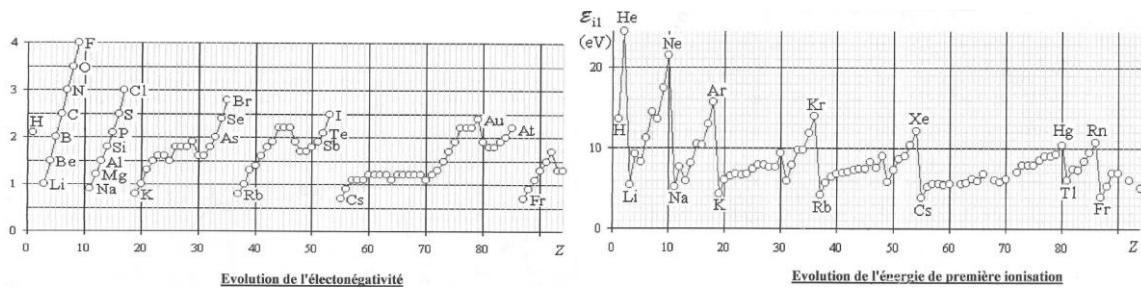


Figure 12. Exemples de la périodicité des propriétés physiques et chimiques des éléments

Cette observation a mené, au XIX^e, à proposer une classification des éléments basée sur cette périodicité : c'est la classification périodique des éléments (voir version simplifiée Figure 13).

- Les lignes (appelées périodes) sont les niveaux successifs des couches électroniques.
- Les colonnes (appelées groupes) sont le nombre d'électrons dans la couche externe. Tous les éléments chimiques d'une même colonne ont la même structure électronique de Valence : on parlera de famille d'éléments.
- Les éléments placés sur le côté gauche de la classification ont plutôt tendance à donner des électrons : on parle de métaux.
- Les éléments placés sur le côté droit de la classification ont plutôt tendance à capter des électrons : on parle de non métaux.

	Groupe I	Groupe II	Groupe III	Groupe IV	Groupe V	Groupe VI	Groupe VII	Groupe VIII
1 ^{re} Période (bande K)	Z = 1 A = 1 Hydrogène H							Z = 2 A = 4 Hélium He
2 ^e Période (bandes K et L)	Z = 3 A = 7 Lithium Li	Z = 4 A = 9 Béryllium Be	Z = 5 A = 11 Bore B	Z = 6 A = 12 Carbone C	Z = 7 A = 14 Azote N	Z = 8 A = 16 Oxygène O	Z = 9 A = 19 Fluor F	Z = 10 A = 20 Néon Ne
3 ^e Période (bandes K, L et M)	Z = 11 A = 23 Sodium Na	Z = 12 A = 24 Magnésium Mg	Z = 13 A = 27 Aluminium Al	Z = 14 A = 28 Silicium Si	Z = 15 A = 31 Phosphore P	Z = 16 A = 32 Soufre S	Z = 17 A = 35 Chlore Cl	Z = 18 A = 40 Argon Ar
4 ^e Période (bandes K, L, M et N)	Z = 19 A = 39 Potassium K	Z = 20 A = 40 Calcium Ca	...					
5 ^e Période...	:							

Figure 13. Schématisation de la classification périodique des éléments [5]

2.6 Liaisons interatomiques

1.1 Les liaisons fortes

Deux interactions se produisent lorsque l'on rapproche deux atomes : une répulsion entre les nuages électroniques de chaque atome et entre les noyaux de chaque atome, une attraction entre les électrons d'un atome et le noyau de l'autre. Ainsi deux atomes éloignés s'attirent, mais deux atomes trop rapprochés se repoussent. Une distance existe où ces deux interactions s'équilibrent : les atomes se trouvent liés.

1.1.1 Liaison covalente

Si la couche de Valence n'est pas totalement remplie (il y a des électrons dits « célibataires »), les deux atomes peuvent mettre en commun ces électrons pour créer un ou des doublets d'électrons. Une nouvelle orbitale se crée, appelé orbitale moléculaire, et accueille ces deux électrons. Ces deux électrons attirent les deux noyaux et les maintiennent unis. On parle de liaison covalente (modèle de Lewis). La liaison covalente est donc une mise en commun d'électrons de la couche de Valence de chaque atome. Elle est assurée par un doublet d'électrons commun aux deux atomes.

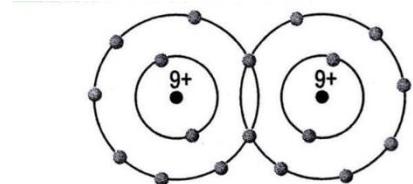
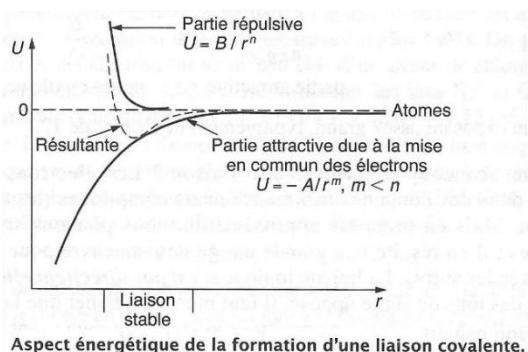


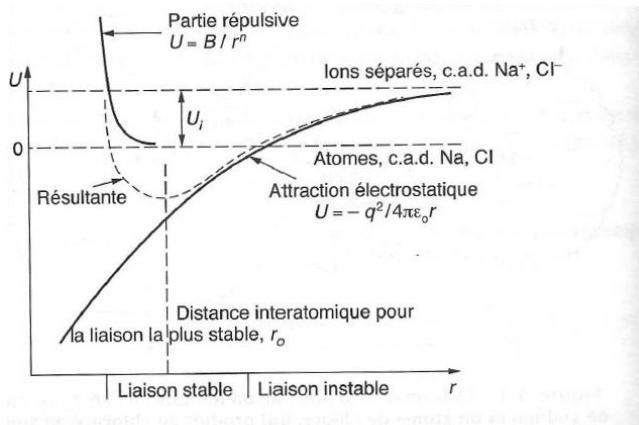
Figure 14. (a) Energie de liaison. Liaison covalente [6] (b) Exemple de liaison covalente [7]

1.1.2 Liaison ionique

La liaison ionique apparaît quand deux atomes en liaison covalente montrent une forte différence d'électronégativité. Un atome « attire » l'électron partagé par l'autre atome. Il se produit alors une attraction électrostatique (attraction Coulombienne) entre les deux atomes. L'énergie de liaison est de la forme

$$U = -\frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r} + \frac{B}{r^n}$$

Dans un solide ionique, chaque ion est soumis au champ électrostatique de ses voisins : la liaison est dite non directionnelle.



4.4 La formation d'une liaison ionique, sous l'aspect énergétique.

[6]

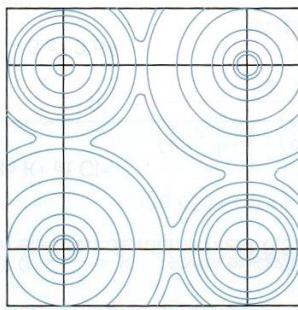


Figure 15. Liaison ionique. Carte de densité électronique du chlorure de sodium NaCl Na : 10.05 électrons (Z_{Na}=11) ; Cl : 17.80 électrons (Z_{Cl}=17)

1.1.3 Liaison métallique

La liaison métallique est une mise en commun des électrons de la couche périphérique avec tous les atomes adjacents. On parle de cations baignant dans un gaz ou une mer d'électrons libres. Quand physique et poésie se rejoignent !

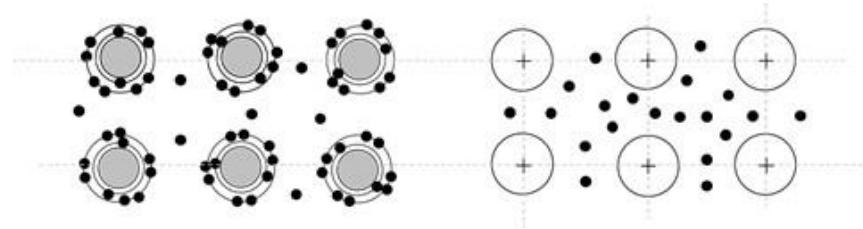


Figure 16. Liaison métallique. Gauche : atomes et électrons. Droite : schématisation

1.2 Les liaisons faibles

Les liaisons faibles ne consistent pas en un partage d'électrons. Ce sont des attractions électrostatiques entre charges de signes opposés dans des molécules polarisables qui deviennent des dipôles. Bref, le + attire le – qui lui-même attire le +.

Ces liaisons sont de faible intensité et donc faciles à rompre, par exemple par effort mécanique ou apport d'énergie par chaleur et vibration des atomes. On verra ainsi qu'elles sont à l'origine de la faible température de fusion et de la faible rigidité des polymères.

1.2.1 Van der Waals

L'interaction de Van der Waals est liée à l'existence d'un moment bipolaire dans un atome ou molécule (les barycentres des charges + et – ne sont pas au même point). Ce moment peut exister de par la géométrie de la molécule (molécule d'eau par exemple) ou peut être induit dans un atome lorsqu'on rapproche entre eux deux atomes.

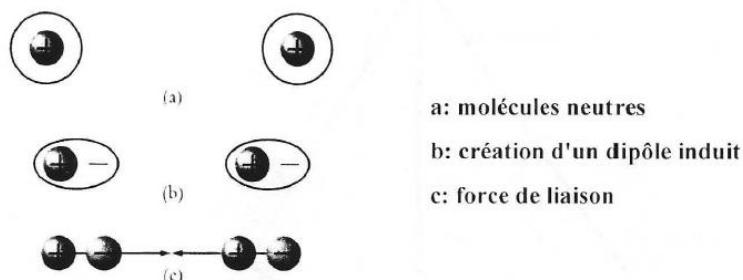


Figure 17. Attraction de Van der Waals

1.2.2 Pont hydrogène

Le pont hydrogène est une attraction principalement entre l'atome d'hydrogène H et l'atome d'oxygène O, mais aussi entre H et F, ou H et N (pauvre petit noyau d'hydrogène, si petit qu'il a bien du mal à garder son électron).

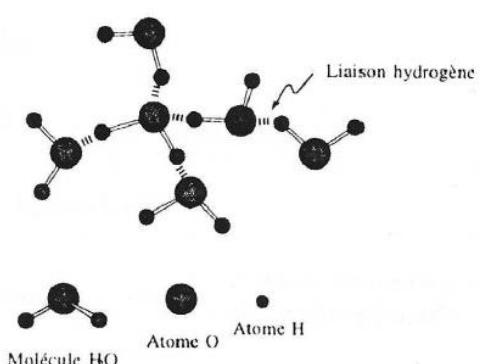


Figure 18. Pont hydrogène

2.7 Energies de liaison

On présente ci-dessous les ordres de grandeur des énergies des liaisons interatomiques.

Liaison	Énergie (kJ/mol)
Ionique	200-800
Métallique	100-800
Van der Waals	0.1-10
Pont H	5-40

Tableau 1. Energies de liaison

2.8 Structure des matériaux solides

Le type de liaison entre atomes dans un solide n'explique pas entièrement les propriétés des matériaux. (raideur, température de fusion, résistance à la corrosion....) des matériaux. En effet, si on peut assimiler les liaisons entre atomes à des petits ressorts, la raideur du ressort (dérivée de l'énergie de liaison) mais aussi le nombre de ressorts par unité de volume et l'agencement des atomes a une importance fondamentale sur les propriétés des matériaux.

2.9 Structures amorphes

Dans les structures amorphes, la distance interatomique moyenne entre un atome et ses voisins n'est pas constante. On parle d'absence d'ordre dans la structure.

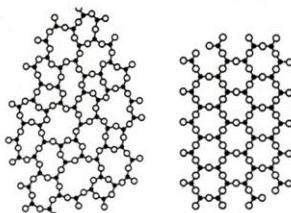


Figure 19. Structure des matériaux solides. Exemple de la silice. Gauche : silice amorphe. Droite : silice cristallisée (Quartz)

Cas des verres métalliques

Dans le cas des matériaux métalliques, la liaison métallique, on le verra plus tard, impose une structure ordonnée qui sera appliquée cristalline. Naturellement, lors du passe liquide – solide, les atomes d'un métal diffusent et se placent aux noeuds d'un réseau cristallin. Cette diffusion est très rapide et figer les atomes dans leur configuration liquide demanderait des vitesses de refroidissement très élevées.

En utilisant des alliages à la formule très complexe, montrant donc une organisation spatiale complexe et donc longue à se former lors du refroidissement, les vitesses de refroidissement nécessaires pour "figer" le matériau deviennent atteignables techniquement sur des bandes de faibles épaisseur.

On obtient des matériaux métalliques solides, à la structure atomique "figée comme un liquide".

2.10 Structures cristallines

2.10.1 Réseau

On attribue la naissance des travaux sur la cristallographie à Auguste Bravais [8], via son postulat : « *étant donné un point quelconque du milieu cristallin, il existe dans le milieu une infinité discrète, illimitée dans les trois directions de l'espace, de points autour desquels l'arrangement des atomes est identique, avec la même orientation.* ». Un réseau est ainsi un ensemble de points appelés nœuds disposés de manière périodique dans les 3 directions de l'espace.

Dans l'espace, le réseau est généré par répétition de 3 vecteurs de base qui définissent une maille élémentaire. Un réseau est alors entièrement défini par 6 paramètres de maille ; les vecteurs a, b, c et les angles α, β, γ . Les 7 systèmes cristallins ci-dessous résument l'ensemble des possibilités offertes par ces 6 paramètres.

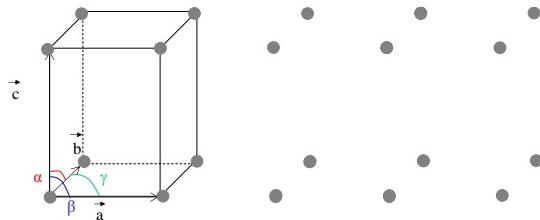
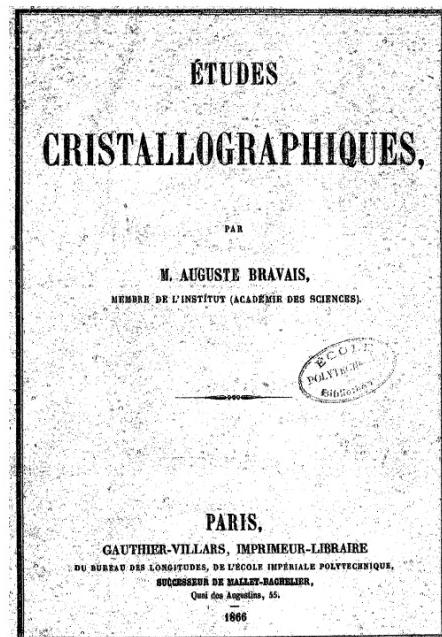


Figure 20. Réseau et paramètres de maille

Dans certaines mailles, on peut ajouter un nœud sans que le réseau ne change de périodicité et de symétrie. Cela donne les 14 réseaux de Bravais (Figure 21). En conclusion, on définit totalement le réseau par le système cristallin, ses 6 paramètres de maille, et le type de réseau de Bravais associé (simple, bases centrées, centré ou à faces centrées).

Système cristallin	Relations entre les axes	Relations entre les angles	Réseaux de Bravais			
			simple	à bases centrées	centré	à faces centrées
triclinique	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$				
monoclinique	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$				
orthorhombique	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$				
rhomboédrique	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$				
hexagonal	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ$ $\gamma = 120^\circ$				
quadratique	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$				
cubique	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$				



Figure 21. Réseaux de Bravais

2.10.2 Motif

Le motif constitue les atomes ou molécules placés aux noeuds du réseau.

2.10.3 Cristal

Un cristal est la combinaison d'un réseau et d'un motif.

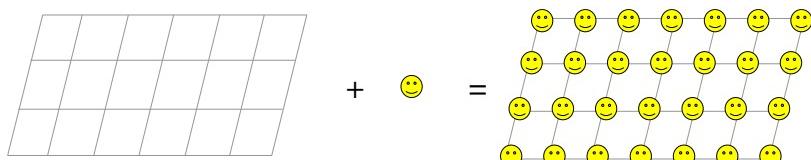


Figure 22. Notion de cristal

On peut classer les cristaux en fonction des liaisons atomiques qui assurent la cohésion entre chaque motif du cristal. On distinguera ainsi les cristaux covalents, les cristaux ioniques, les cristaux moléculaires, les cristaux métalliques.

2.10.4 Cas des cristaux métalliques : notions d'empilement compact et non compact

Dans les cristaux métalliques, les noyaux ainsi que les électrons des couches inférieures baignent dans une mer d'électrons constituée d'atomes de la couche externe. La liaison métallique n'est pas directionnelle : cela entraîne une densification orientée dans toutes les directions : on peut assimiler les atomes à des sphères dures en contact les unes avec les autres (analogie avec des billes empilées dans une boîte). On parlera d'« empilement ».

La Figure 23 montre un plan dense (plan A). La densité atomique d'un plan est le nombre d'atomes par unité de surface du plan. Il a été démontré que l'on ne peut pas poser des sphères sur un plan de façon plus dense que le plan A de la Figure 23.

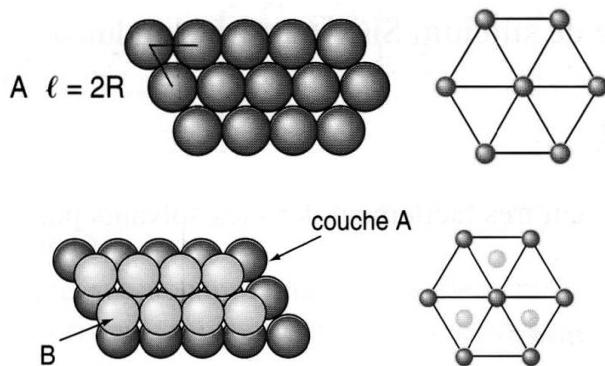


Figure 23. Plan dense et empilement compact [9]

Il existe ensuite deux possibilités pour la troisième couche.

1/ L'ajout d'une couche A forme un empilement ABAB. Dans cet empilement, la structure cristalline a un réseau hexagonal (Figure 24).

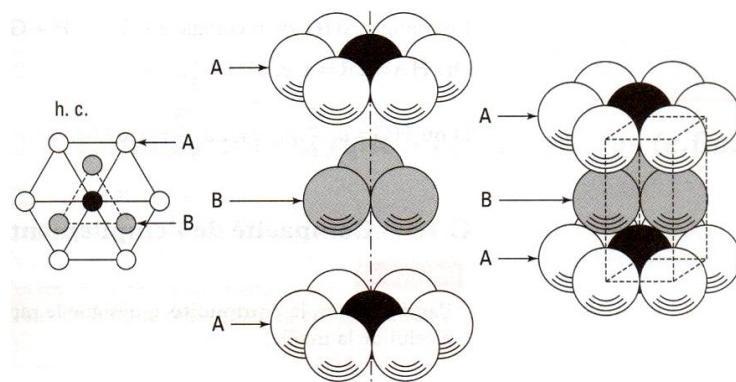


Figure 24. Structure hexagonale compacte [9]

2/ Si l'on ajoute des sphères au droit des trous de la couche A non remplis par la couche B, on crée un troisième plan appelé C. Dans cet empilement, la structure cristalline a un réseau cubique faces centrées (Figure 25).

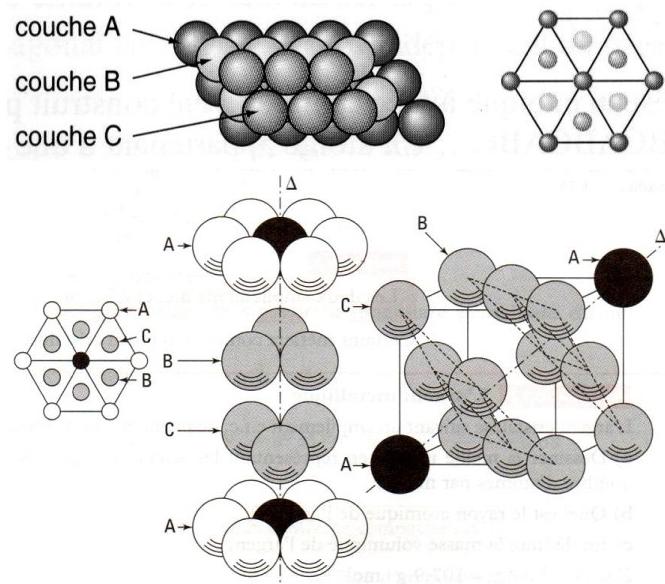


Figure 25. Structure cubique faces centrées [9]

Un autre type d'empilement existe. Ces empilements forment des réseaux cubique (ou cubique simple) et cubique centré. Ils sont dit non compacts (Figure 26).

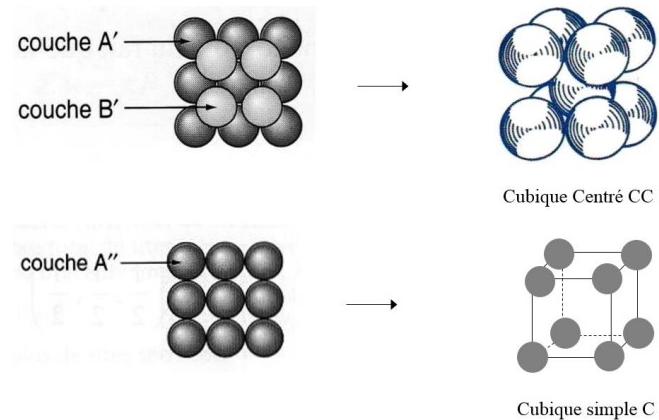


Figure 26. Empilements pseudocompacts. Réseau cubique centré et cubique simple

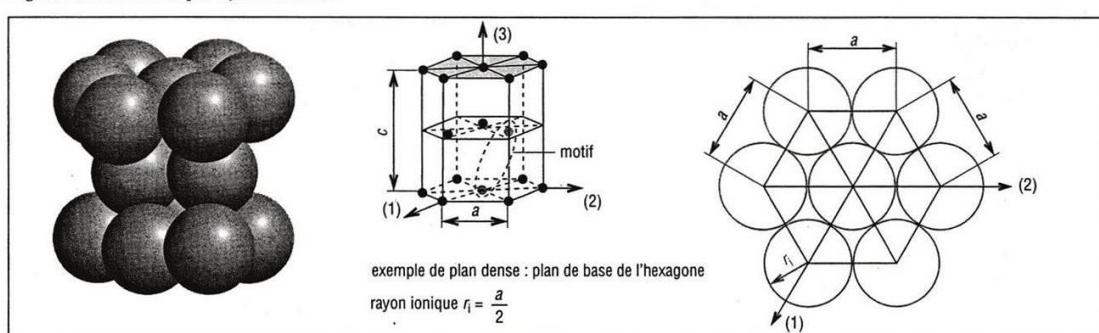
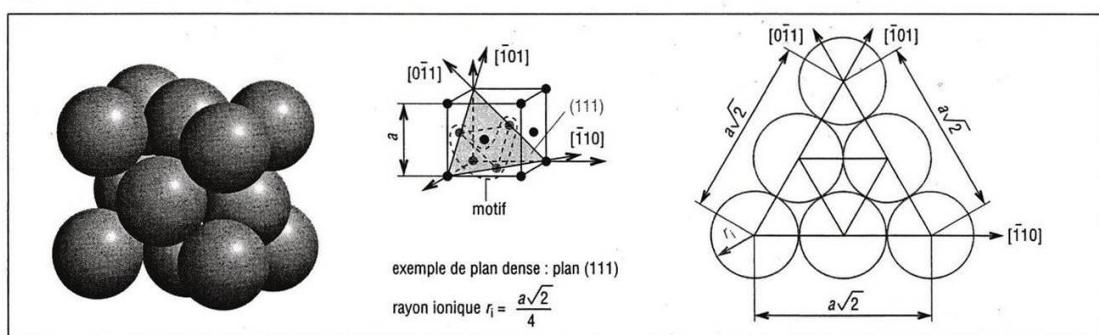
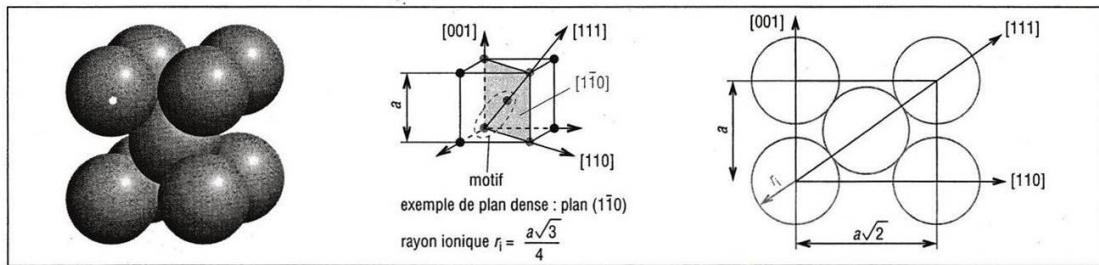
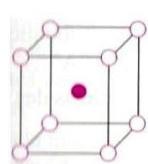


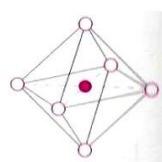
Figure 27. Structures cristallines typiques des métaux [7]

On peut constater que les atomes, assimilés à des sphères rigides, n'occupent pas tout le volume. Il reste des cavités appelées sites interstitiels (Figure 28). Ces sites interstitiels sont des sites favorables à l'insertion de petits atomes (exemple : le carbone dans le cristal de fer, donne l'acier).

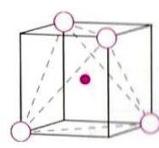
Site cubique



Site octaédrique



Site tétraédrique



Réseau CFC

Réseau HC

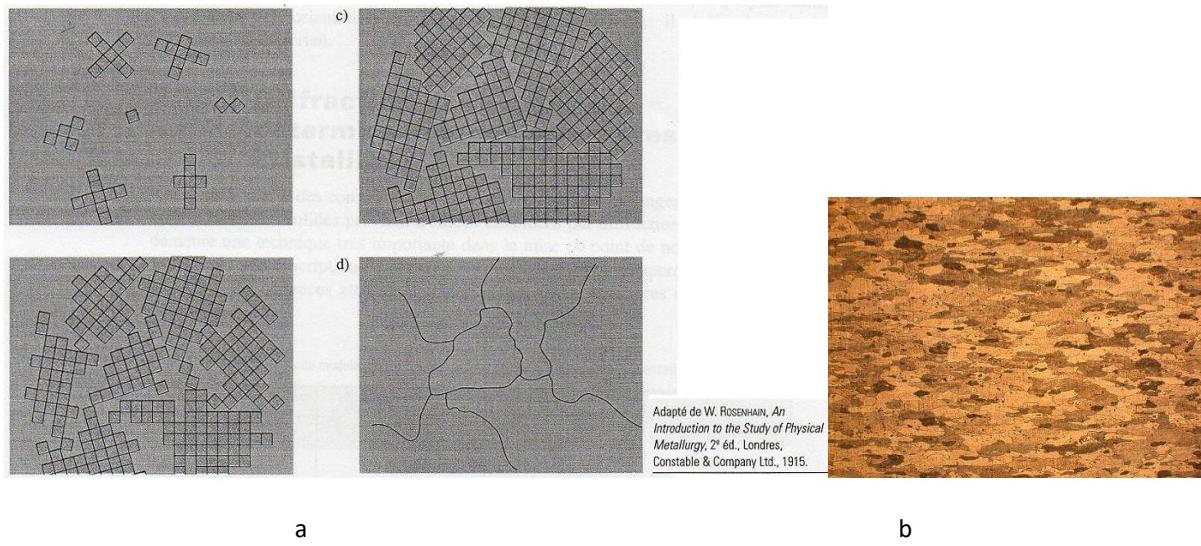
Réseau CFC

Réseau HC

Figure 28. Sites interstitiels dans les cristaux métalliques [9]

2.10.5 Matériaux polycristallins

Lors de la solidification d'un matériau, plusieurs points du liquide commencent à solidifier en même temps. Ainsi, la plupart des matériaux cristallins industriels sont des polycristaux (Figure 29). Chaque grain constitue un cristal doté d'une orientation particulière.



2.10.6 Défauts du cristal

2.10.6.1 Défauts ponctuels (0D) [11]

- Lacune : absence d'un motif à un nœud du réseau.
- Auto-interstiel : un motif du cristal se place dans un site interstiel du cristal.
- Atome étranger en insertion : un atome, différent du motif du cristal, s'est placé dans un site interstiel du cristal.
- Atome étranger en substitution : un atome, différent du motif du cristal, s'est placé à un nœud du cristal, à la place du motif de base.

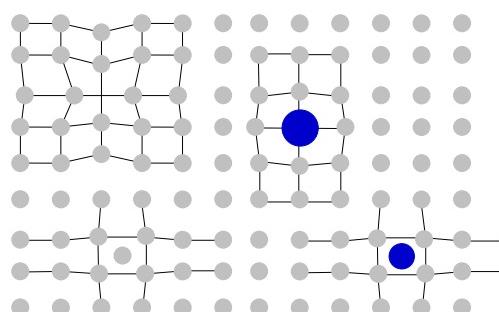


Figure 30. Défauts ponctuels du cristal

2.10.6.2 Défauts linéaires (1D)

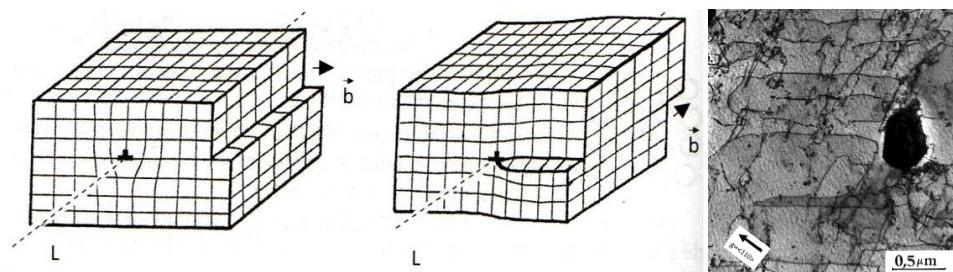


Figure 31. Défauts linéaires du cristal : dislocations (Réf Le Livre de l'Acier). Gauche : dislocation coin. Droite : dislocation vis

Dislocation coin : Défaut centré autour d'une ligne le long de laquelle se termine un 1/2 plan atomique supplémentaire à l'intérieur du cristal.

Dislocation vis : Résultat d'un cisaillement du réseau parallèlement à la ligne de dislocation.

2.10.6.3 Défauts surfaciques (2D)

Les joints de grains et les joints de phases sont la frontière entre deux grains ou deux phases. Dans ces zones, le cristal n'est pas parfait (Figure 29 et Figure 32).

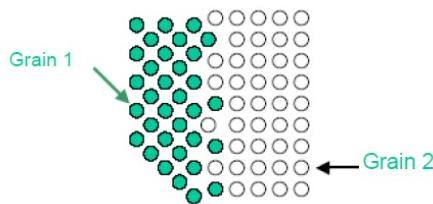


Figure 32. Joint de grain

Une faute d'empilement est une erreur dans la séquence d'empilement des plans atomiques. Par exemple, pour le réseau cubique faces centrées, l'empilement est BCABCABCAB. Si on observe l'empilement suivant, ABCABCAB, on voit qu'il manque un plan atomique de type C.

Une paroi d'antiphase est une surface le long de laquelle existe un décalage qui détruit l'ordre à courte distance dans le cristal.

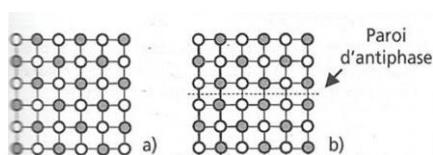


Figure 33. Paroi d'antiphase [5]

Un joint de macle est un joint entre deux grains, mais ces grains sont orientés par symétrie par rapport à un plan cristallographique (on parle de cristal mère et de cristal maclé). Les joints de macle sont aisément reconnaissables à leur tracé rectiligne.

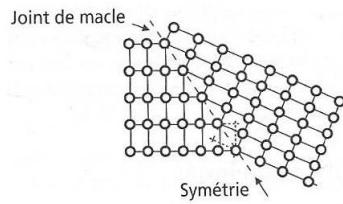


Figure 34. Joint de macle [5]

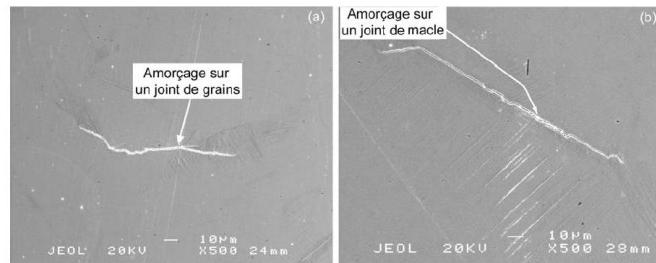


Figure III-27 : Amorçage sur un joint de grains (a) et sur un joint de macle (b)

Figure 35. Fissure mettant en évidence joints de grains et joints de macle [12]

2.10.6.4 Défauts volumiques (3D)

Une porosité est une cavité fermée à l'intérieur du cristal ou du polycristal.

Une inclusion est une particule d'un solide de nature différente enrobée dans le solide principal.

Un précipité est une particule d'un solide de nature différente entièrement enrobée au sein d'un grain. Les précipités peuvent montrer plusieurs configurations par-rapport au grain qui les enrobe.



Figure 36. Précipités dans un alliage d'aluminium aéronautique 2024-T351 [10]

2.11 Vidéos

[Carbone \(10mn\)](#)

3 Diagrammes d'équilibres de phases

3.1 Définitions

- Mélange / Constituant

Les constituants sont des éléments chimiques ou des corps purs qui constituent un mélange (un mélange sera aussi appelé un alliage dans le cas des métaux).

Mélange binaire : 2 constituants ; Mélange ternaire : 3 constituants

- Solution solide (SS)

Structure cristalline du constituant principal A (solvant) non modifiée par l'ajout d'atomes de soluté B.

SS de substitution : un atome de B est placé à la place d'un atome du constituant principal A, sur les nœuds du réseau cristallin.

SS d'insertion : des atomes de soluté sont placés en position interstitielle. Ces atomes ont donc de faibles dimensions par-rapport aux atomes de solvant A. Exemple : alliages Fe-C (les atomes de C se placent dans les sites octaédriques du réseau d'atomes de fer)



Solution solide de substitution / Solution solide d'insertion

Concentration massique du constituant A au sein d'une phase ou au sein d'un mélange : $m\%(A)$

$$m\%(A) = \frac{m(A)}{m \text{ totale}} \times 100$$

Concentration molaire du constituant A : $X\%(A)$

$$X\%(A) = \frac{\text{nombre d'atomes de (A)}}{\text{nombre d'atomes total}} \times 100$$

Phase : on appelle phase tout ensemble de particules de matière à limites bien définies qui possède une composition chimique homogène, des propriétés chimiques propres la rendant identifiable par analyse chimique, une structure homogène à l'échelle atomique (gaz, liquide, solide cristal CC, solide amorphe....), des propriétés physiques homogènes (couleur, dureté....).

Exemples

Dans ce verre on trouve deux phases : de l'eau à l'état solide et de l'eau à l'état liquide



Dans l'acier présenté ci-dessous, on trouve 3 phases



Figure 37. Patrick BARGES. Métallographie optique en couleur d'un acier duplex FeMnAlC à basse densité. L'attaque révèle la ferrite en bleu, l'austénite en blanc et la martensite en marron.

Fraction massique de phase

Soit une phase α au sein d'un mélange, alors la fraction massique de α , $fm\%(\alpha)$ est :

$$fm\%(\alpha) = \frac{\text{masse de } \alpha}{\text{masse totale mélange}} \times 100$$

Constitution d'un alliage

On a défini totalement la constitution d'un alliage lorsque l'on a défini :

1. Le nombre et la nature des phases
2. La concentration massique des constituants dans chaque phase
3. La fraction massique des phases dans le mélange

Finalement, la structure d'un matériau est totalement donnée par sa **constitution** (nb et nature des phases, concentration massique des constituants dans chaque phase, fraction massique des phases) + **microstructure** (forme, taille de chaque phase...).

3.2 Règle de Gibbs

La règle de Gibbs énonce :

$$V = C + P - \phi$$

C : nombre de constituants du mélange ; P : nombre de paramètres physiques pouvant modifier la nature du mélange à l'équilibre (pression et $T^{\circ}C$) ; ϕ : nombre de phases présentes à l'équilibre

La règle de Gibbs fixe le nombre V de variables parmi la température et les concentrations C_i des phases, pouvant évoluer sans modifier le nombre et la nature des phases.

Remarque : V est aussi appelée nombre de degrés de liberté

Remarque : Pour les équilibres entre solides, liquides et gaz, on aura $P = 2$ (pression et température). Pour les équilibres entre solides et liquides, la pression doit prendre des valeurs extrêmes pour modifier les équilibres en jeu, donc on étudie les évolutions à pression constante : on aura $P = 1$ (seule la température aura une influence notable sur le mélange)

Exemples :

Corps pur où 2 phases coexistent : $C = 1 : V = 1 + 1 - 2 = 0 \rightarrow$ solidification à température constante

Système binaire : $C = 2 ; V = 3 - \phi$

- $\phi = 2 : V = 1 \rightarrow$ si une des variables C_1, C_2 ou $T^\circ C$ est imposée, les 2 autres sont fixées
- $\phi = 3 : V = 0 \rightarrow$ un équilibre entre 3 phases est possible mais pour une température et une concentration C_1, C_2 , et C_3 fixées.

3.3 Systèmes à 1 constituant (étude du corps pur)

Analyse thermique

L'échauffement et le refroidissement du corps pur sans changement d'état est décrit par les courbes ci-dessous.



Figure 38. Echauffement et refroidissement du corps pur sans changement d'état

En cas de changement d'état, un palier de température est observé (Figure 39).

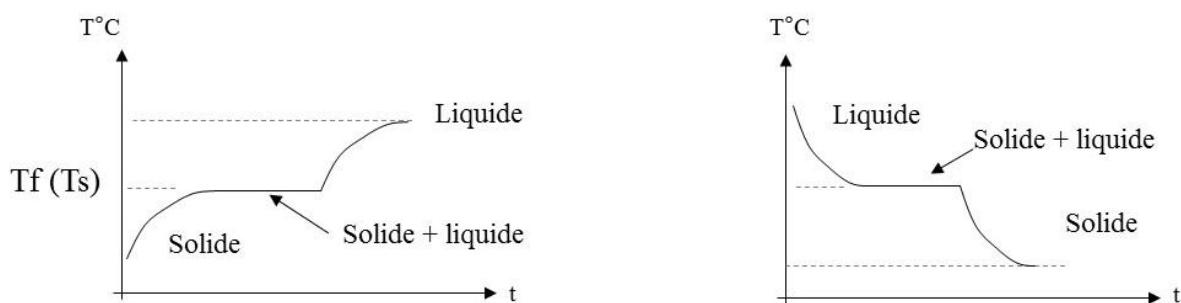


Figure 39. Echauffement et refroidissement du corps pur avec changement d'état

Diagramme P-T

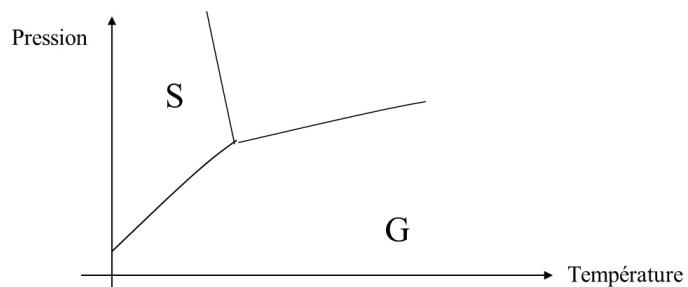


Figure 40. Diagramme Pression – Température

[Animation Phase Diagram \(10min\)](#)

[Les états de la matière \(2 min\)](#)

Explaining the Triple Point (6min)

Application industrielle : la lyophilisation

« Lyophilisation : opération de déshydratation à basse température qui consiste à éliminer par sublimation, la majeure partie de l'eau contenue dans un produit. Elle autorise une conservation à long terme grâce à l'abaissement de l'activité de l'eau du produit. » Techniques de l'Ingénieur F3240

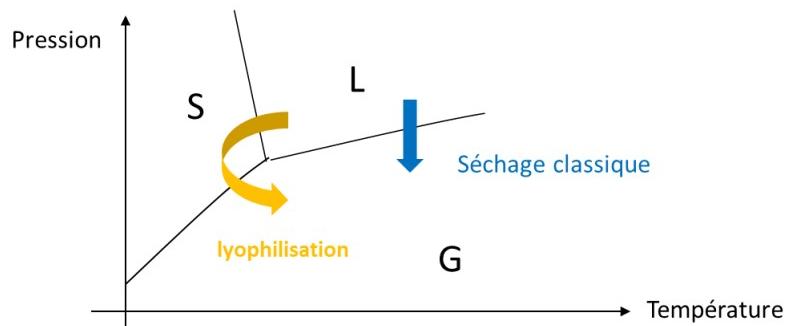


Figure 41. La lyophilisation

1.3 Diagramme 1D à pression constante

Dans un diagramme 1D à pression constante, l'axe représente la température. On peut y faire apparaître les températures de changement de phase et donc les domaines d'existence des phases.

3.4 Systèmes à 2 constituants (alliages binaires)

3.4.1 Analyse thermique et mise en évidence des diagrammes binaires

Lors d'une évolution de température avec changement d'état, un alliage binaire a un comportement différent de celui du corps pur : l'alliage ne montre pas de palier lors du changement d'état.

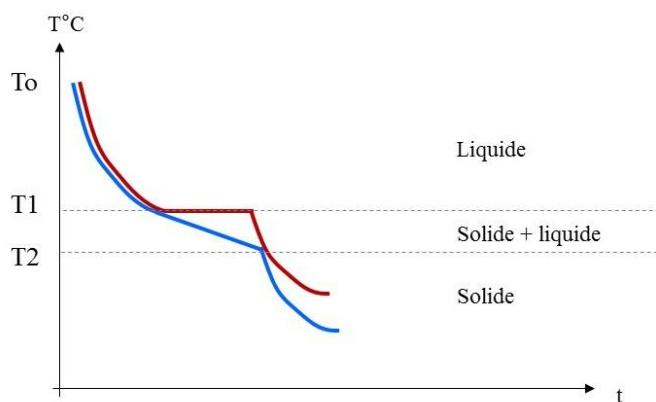


Figure 42. Solidification d'un alliage A-B et d'un corps pur

On présente ci-dessous le refroidissement de plusieurs mélanges $\text{H}_2\text{O} - \text{NaCl}$ contenant différentes teneurs en NaCl .

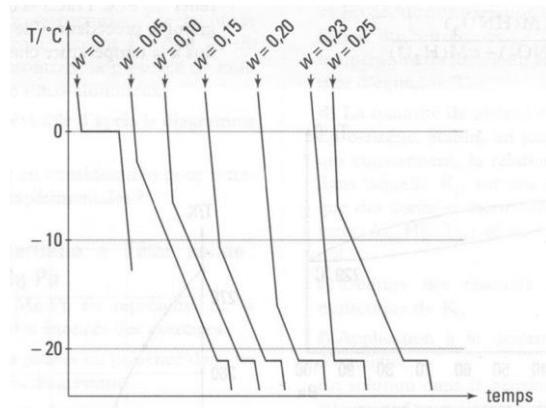


Figure 43. Courbes de refroidissement de quelques mélanges $H_2O-NaCl$ [9]

On voit que les températures de changement d'état dépendent des concentrations des constituants. La question est alors : comment représenter les phases présentes dans le mélange en fonction de $m\%(H_2O)$, de $m\%(NaCl)$ et de la température ? On tracera un diagramme de phases tel que celui-ci-dessous.

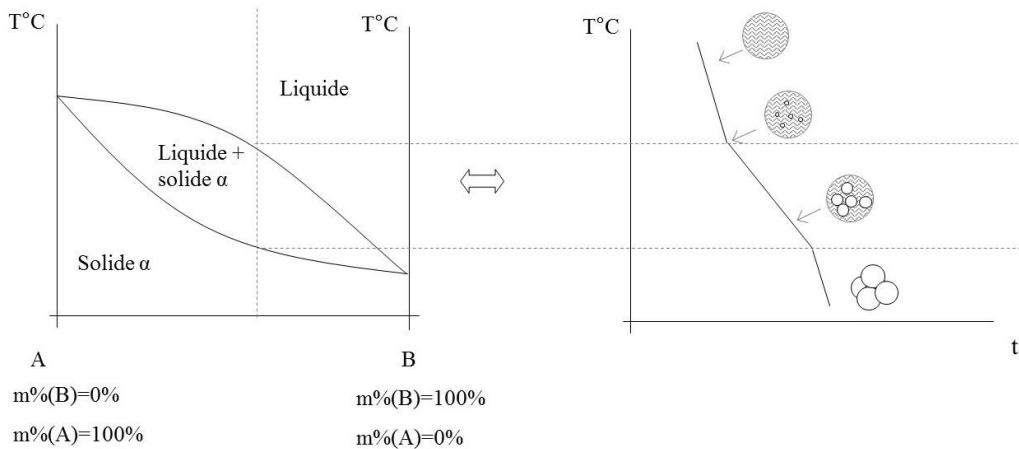


Figure 44. Diagramme de phases pour un alliage binaire A-B

3.4.2 Définitions

- Liquidus : au-dessus de la courbe de liquidus, tout le mélange est à l'état liquide.
- Solidus : en-dessous de la courbe de solidus, la ou les phases en présence sont toutes solides.
- Dans le cadre de ce cours, on se cantonnera aux alliages ne montrant qu'une seule phase lorsque tout le mélange est à l'état liquide.
- Domaine : zone du diagramme. Dans une zone du diagramme, la composition chimique ou la température du mélange peut varier sans apparition ou disparition des phases existantes.
- Domaine monophasé : domaine du diagramme où une seule phase existe dans le mélange.
- Domaine biphasé : domaine du diagramme où deux phases existent dans le mélange.

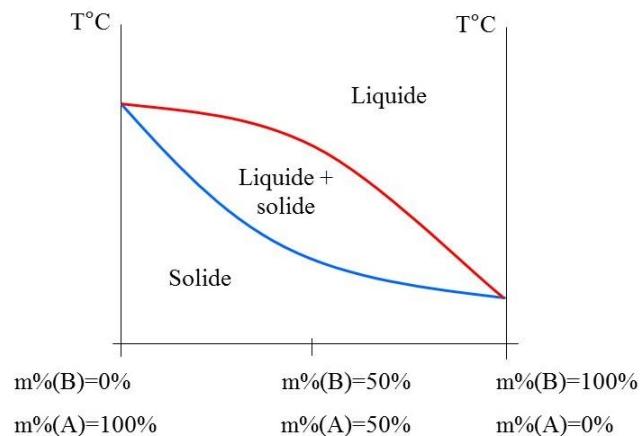
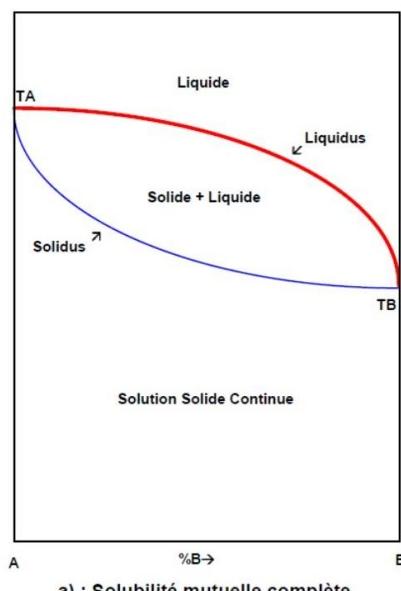


Figure 45. Solidus et Liquidus d'un diagramme binaire

3.5 Comportements typiques rencontrés dans les systèmes binaires

3.5.1 Miscibilité totale

Pour toute concentration en A et B, une seule phase se crée à l'état solide, réunissant les deux constituants. On distingue deux types d'alliage rencontrés lors d'une miscibilité totale : Solution solide de substitution, Solution solide d'insertion.



a) : Solubilité mutuelle complète

Figure 46. Diagrammes binaires. Miscibilité totale

Règles de Hume – Rothery :

- différence de rayon atomique < 15%
- structures cristallines identiques
- valences égales
- électronégativité semblables

Rappel : La valence d'un élément chimique est le nombre maximal de liaisons covalentes ou ioniques qu'il peut former en fonction de sa configuration électronique. Dans une molécule ou un ion, la valence d'un atome est le nombre de liaisons covalentes que cet atome a formées. Dans un ion monoatomique, sa valence est sa charge, on parle alors d'électrovalence.

3.5.2 Miscibilité nulle

Pour toute concentration en A et B, deux phase se créent à l'état solide : du A pur et du B pur. On ne peut pas créer de phase solide où les deux constituants coexistent.

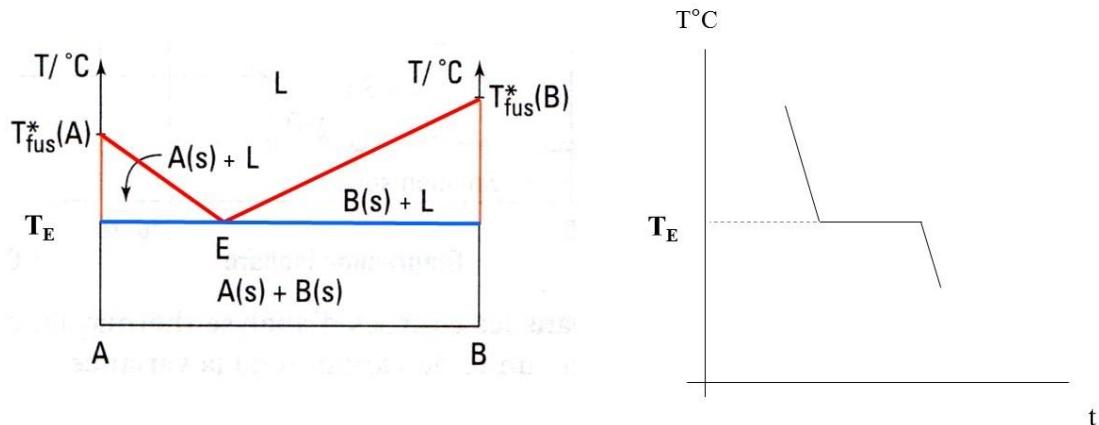


Figure 47. Diagrammes binaires. Miscibilité nulle. Point eutectique

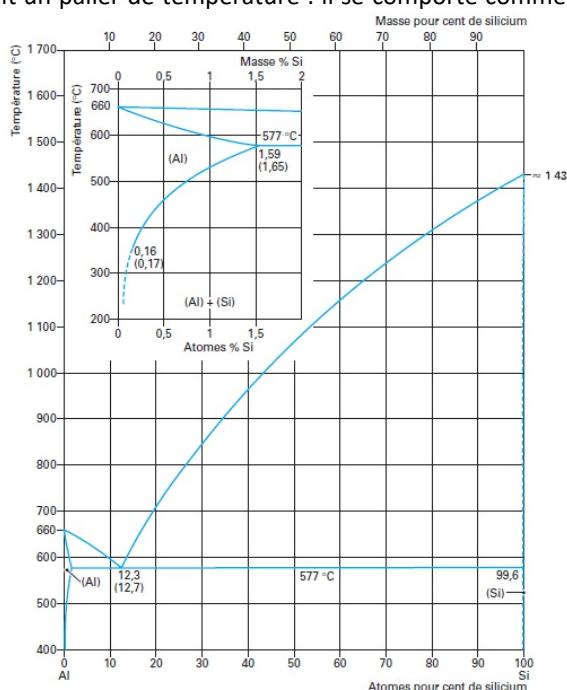
Un point E appelé point eutectique se crée sur le diagramme. Un alliage ayant la composition correspondant au point E passe de l'état liquide à l'état solide en montrant un palier de température : il se comporte comme un corps pur (mais ce n'en est pas un). On parle de transformation eutectique. On voit qu'un alliage ayant la composition correspondant au point E montre un bas point de fusion, comparé aux corps purs A et B. Ceci a des applications industrielles intéressantes.

3.5.2.1.1 Applications du bas point de fusion de l'eutectique

- Salage des routes

On peut citer l'eutectique sel-H₂O pour le salage des routes. NaCl – H₂O eutectique à -21°C : la glace est liquide en présence de sel si T>-21°C.

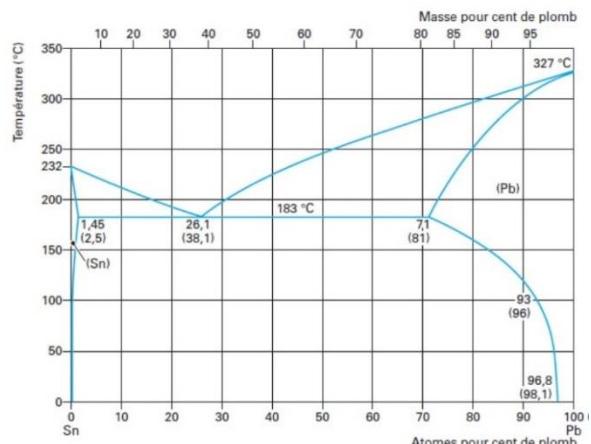
Figure 48. Diagrammes binaires. Fonderie : alliages d'aluminium proches de l'eutectique Al-Si pour 12% de Si (Techniques de l'Ingénieur)



- Brasage de composants électroniques

Figure 49. Diagrammes binaires. Brasage de composants électroniques grâce à l'eutectique Pb-Sn (Techniques de l'Ingénieur)

[Muddiest Point- Phase Diagrams II: Eutectic Microstructures \(19 min\)](#)



3.5.3 Miscibilité partielle

Pour certains domaines de concentration en A et B, peut exister une seule phase solide les réunissant. Ce seront les phases α et β du diagramme ci-dessous.

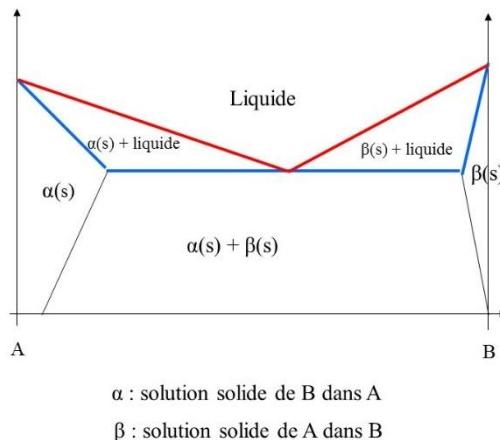


Figure 50. Diagrammes binaire. Miscibilité partielle

3.5.4 Formation d'un composé défini

AB_2 est un composé défini. C'est une phase, dont le domaine est la droite verticale pointillée, où un nombre entier d'atomes de A coexiste avec un nombre entier d'atomes de B (dans notre exemple, un atome de A pour deux B).

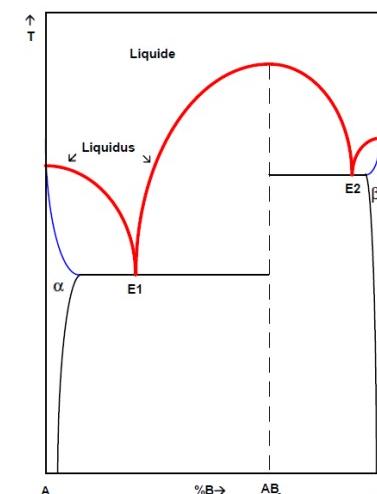


Figure 51. Diagrammes binaire. Formation d'un composé défini

3.5.5 Remarque importante

Tout diagramme de phase peut se décomposer à l'aide des 4 comportements "simples" vus précédemment.

Voir exemple ci-dessous

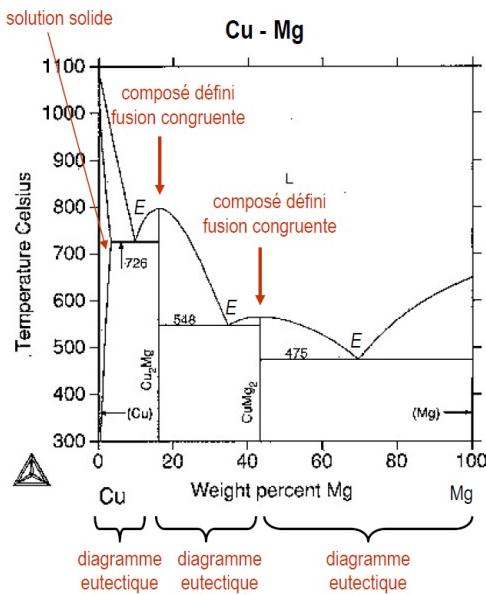


Figure 52. PDF issu d'internet, je ne me souviens plus du lien, aucune info dans le doc : je suis preneur de toute info !

3.5.6 Autres transformations des alliages binaires

Eutectoïde : Solide $\beta \rightarrow$ solide $\alpha +$ solide γ

Péritectique : Liquide + Solide $\alpha \rightarrow$ Solide β

Péritectoïde : Solide A + solide B \rightarrow Solide δ

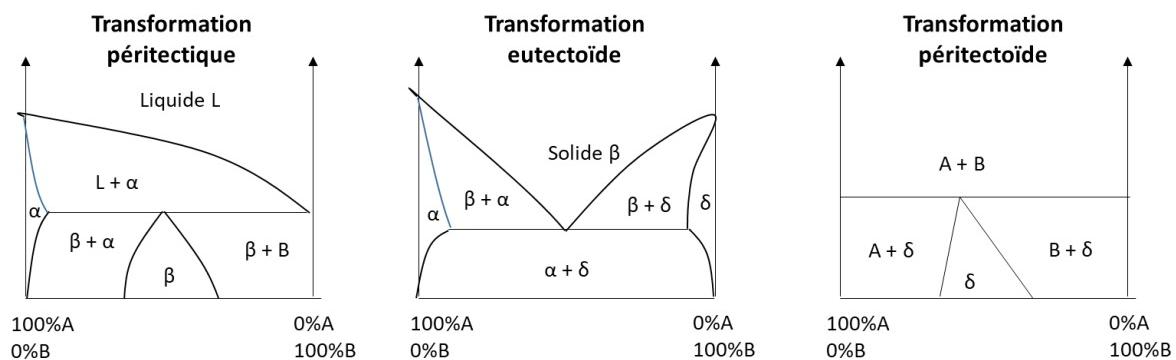


Figure 53. Autres transformations des alliages binaires

3.5.7 Exploitation d'un diagramme binaire : détermination de la constitution d'un matériau

Dans un domaine monophasé, la constitution de l'alliage est aisément connue (1 seule phase, de composition chimique identique à celle de l'alliage, de fraction massique fm% = 100%).

Pour un domaine biphasé :

- La règle de l'horizontale fournit les phases présentes et leur composition chimique
- La règle des segments inverses donne la fraction massique de chaque phase.

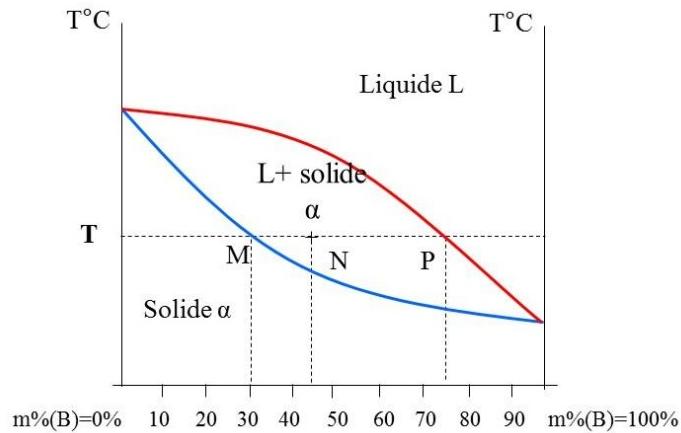


Figure 54. Diagrammes binaires. Exploitation d'un domaine biphasé. Règle de l'horizontale et règle des segments inverses.

Exemple détaillé : soit un alliage à 45% B chauffé à la température T

Règle de l'horizontale : composition des phases

La concentration massique de B dans la phase L est 75% : $m\%(B)$ dans L=75%

La concentration massique de B dans la phase $\alpha_{(s)}$ est 30%. $m\%(B)$ dans α =30%.

Règle des segments inverses : fraction massique des phases

Fraction massique de L

$$fm\%(L) = \frac{45 - 30}{75 - 30}$$

Fraction massique de $\alpha_{(s)}$

$$fm\%(α) = \frac{75 - 45}{75 - 30}$$

Règle des segments inverses : demo

Par définition, concentration massique de B dans le mélange :

$$m\%(B) = N = \frac{masse(α).M + masse(L).P}{masse_{totale}} = \frac{masse(α)}{masse_{totale}}.M + \frac{masse(L)}{masse_{totale}}.P$$

$$m\%(B) = fm\%(α).M + fm\%(L).P$$

Par ailleurs : $fm\%(α) + fm\%(L) = 1$ donc $fm\%(α) = 1 - fm\%(L)$

Donc

$$m\%(B) = N = fm\%(α).M + (1 - fm\%(α)).P = fm\%(α).(M - P) + P$$

Donc la fraction massique de phase α est

$$fm\%(\alpha) = \frac{N - P}{M - P} = \frac{P - N}{P - M}$$

3.5.8 Exemples récapitulatifs : études de refroidissements

3.5.8.1 Exemple 1 : pas de réaction eutectique

On étudie un alliage Pb-Sn à 80% de Pb (concentration atomique) (Figure 55).

De 350 à 305°C : une seule phase liquide.

De 305 à 255°C : le liquidus est atteint vers 305°C. Une transformation liquide \rightarrow solide (solution solide riche en Pb) commence. La proportion en liquide évolue de 100% (point 1) à 0% (point 2).

De 255 à 160°C : 1 seule phase, solide. Sa composition (concentration en Pb et Sn) est la même que celle de l'alliage. Sa fraction massique est bien évidemment 100%.

De 160°C à l'ambiante : la phase unique riche en Pb devient instable lorsque la limite de phase à 160°C est traversée. Elle se décompose en deux phases solides dont les compositions sont données par les extrémités de la conode à la température considérée. Lors du refroidissement, la composition des phases évolue. La fraction massique de chaque phase est donnée par la règle des segments inverses (domaine biphasé).

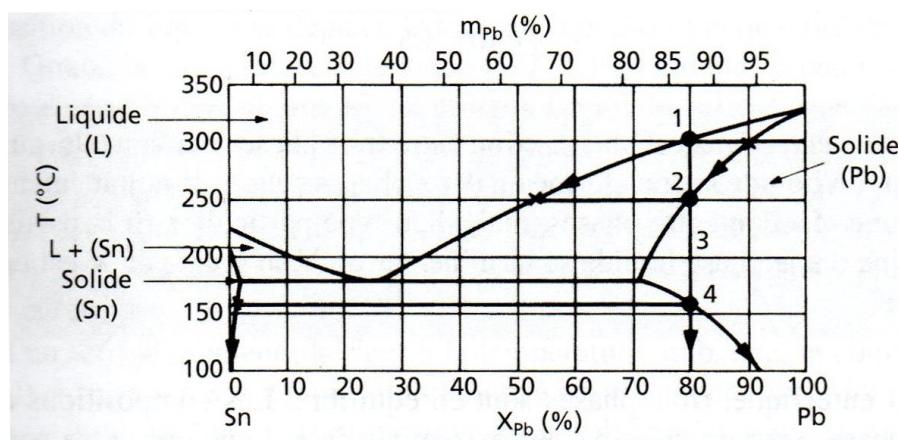


Figure 55. Exemple de synthèse, étude d'un diagramme binaire [13]

3.5.8.2 Exemple 2 : réaction eutectique

On étudie un alliage Pb-Sn à 50% de Pb (concentration atomique) (Figure 55).

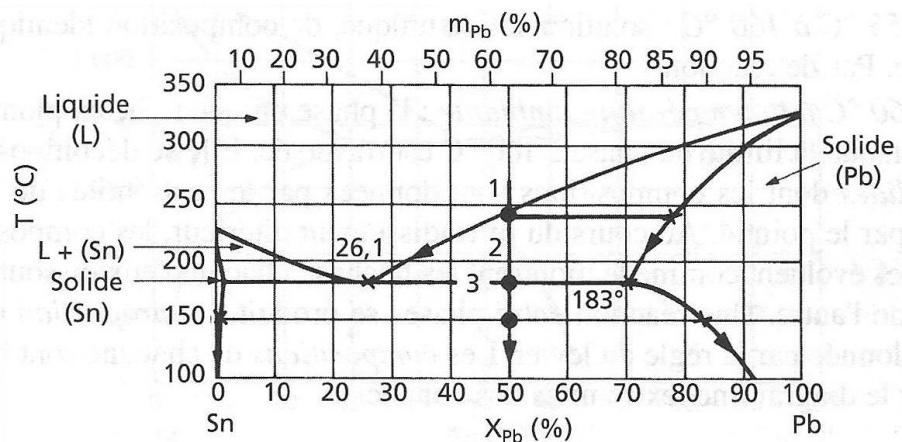


Figure 56. Exemple de synthèse, étude d'un diagramme binaire [13]

Température	Phases présentes	Commentaires
De 300 à 245°C	Une phase liquide	La phase liquide a même composition que l'alliage
De 245 à 183°C	Liquide + SS riche en Pb	Le liquidus est atteint à 245°C. Une SS riche en Pb se forme. La composition du liquide suit le liquidus, la composition de la SS riche en Pb suit le solidus.
A 183+ε°C	Liquide de composition eutectique + SS riche en Pb	La composition du liquide atteint la composition du point eutectique.
A 183°C	Le liquide restant se transforme en deux phases solides : une phase solide riche en Sn et une phase solide riche en Pb. On parle de réaction eutectique : Liquide de composition eutectique $\rightarrow \alpha_{(s)} + \beta_{(s)}$.	
De 183°C à l'ambiance	2 phases solides SS riche en Sn + SS riche en Pb	Pour la phase riche en Pb, une partie est issue de la SS formée après le passage du point 1, une partie est issue de la réaction eutectique

Tableau 2. Exemple 2. Etude du refroidissement. SS : solution solide

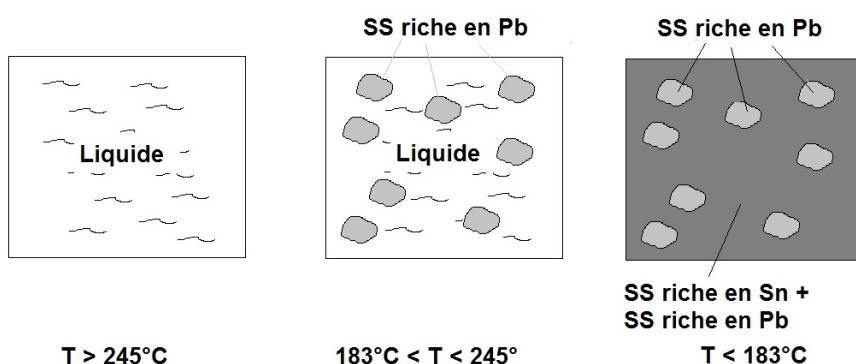


Figure 57. Exemple 2. Etude du refroidissement. SS : solution solide

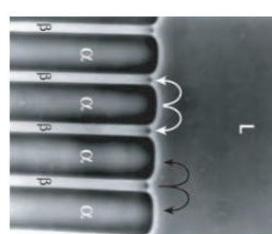


Figure 58. Structure eutectique alpha + beta

3.5.9 Vidéos

[Solid-Liquid Phase Diagrams \(7 min\)](#)

[Binary Phase Diagrams - Cu-Ni System \(7 min\)](#)

[Muddiest Point- Phase Diagrams I: Eutectic Calculations and Lever Rule \(16min\)](#)

[Intro to Phase Diagrams {Texas A&M: Intro to Materials} \(14 min\)](#)

3.6 Systèmes à 3 constituants, diagramme ternaire, règle de Gibbs pour un système à 3 constituants

Dans les alliages ternaires, on rappelle que, comme pour tout alliage, la somme des concentrations en constituants vaut 1. Pour un alliage A-B-C,

$$m\%(A) + m\%(B) + m\%(C) = 100\%$$

Par ailleurs, la variance vaut $V = 4 - P$ (Gibbs). Les réactions entre 4 phases se feront donc à température constante.

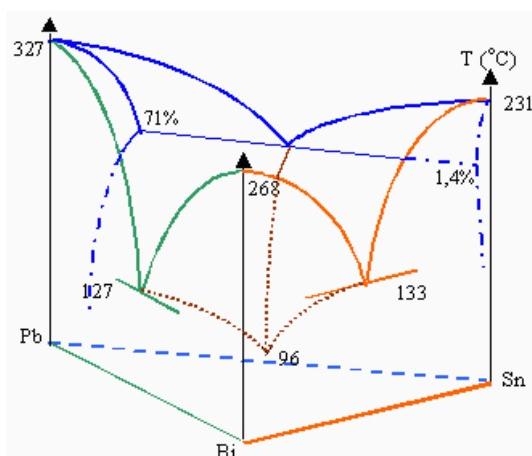
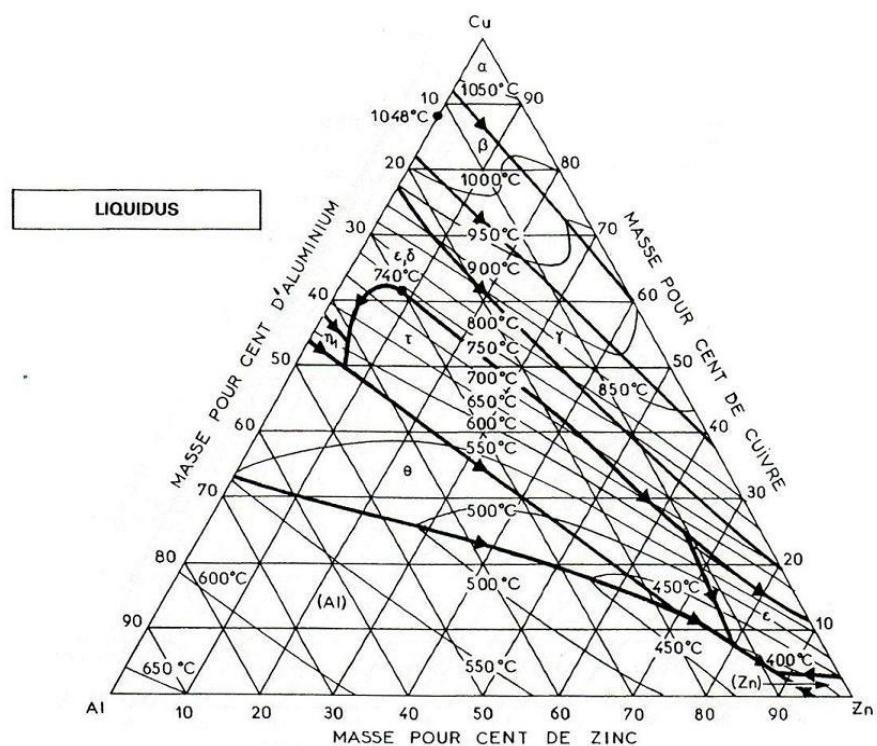
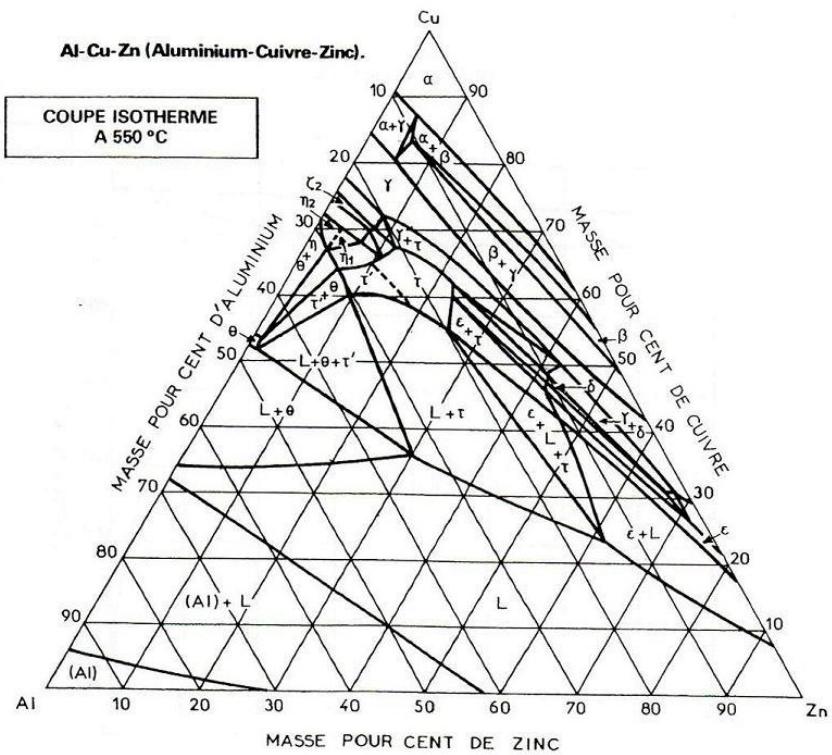


Figure 59. Exemple de diagramme ternaire (Pascal, Tome XX-2, 1913, 1860) <http://www.uqac.ca>

3.6.1 Coupes 2D dans un diagramme ternaire

Les diagrammes ternaires sont en forme de « prismes » dont chaque face représente un des diagrammes binaires du système. Ces diagrammes sont généralement exploités en 2D, par des coupes. On peut citer :

- Coupe quasi-binaire : parallèle au plan d'un des diagrs binaires
- Coupe isotherme : triangle équilatéral
- Coupe isoplète : passe par l'un des constituants et conserve un rapport constant entre les concentrations des 2 autres
- Coupe autre : le long du liquidus



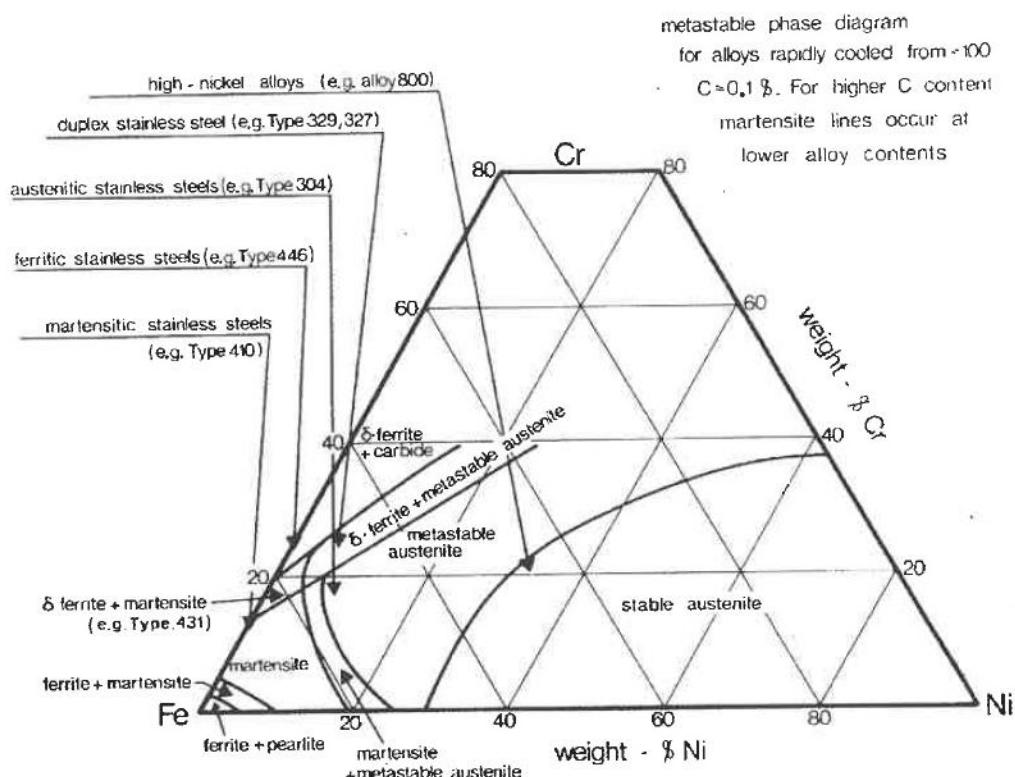
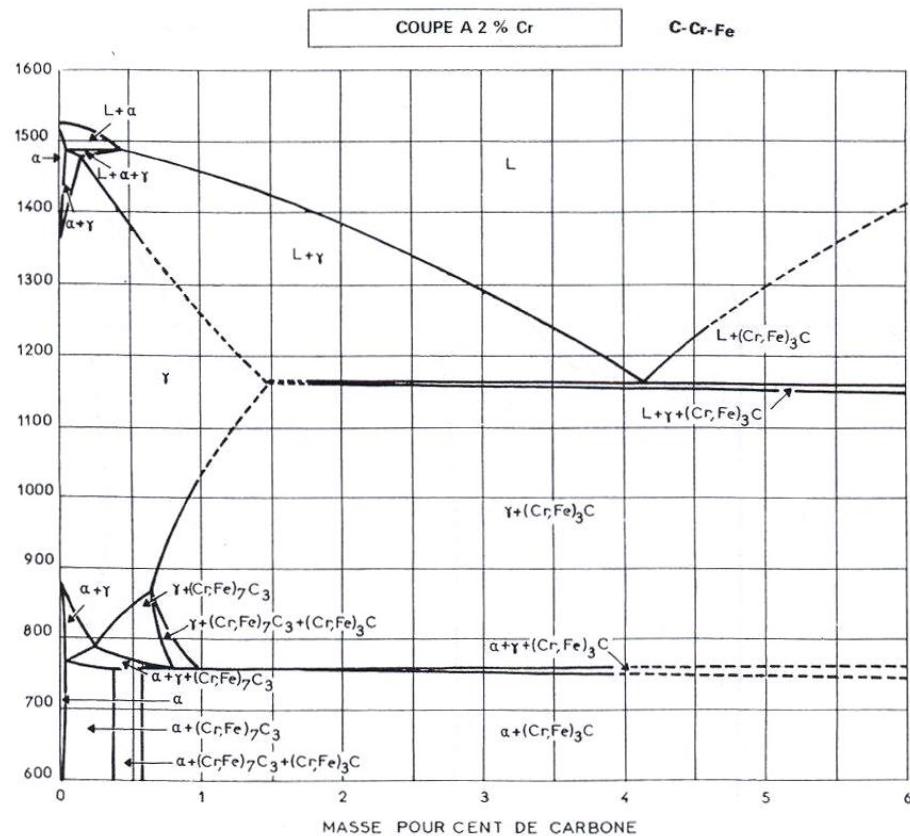


Fig. 12: Ternary Fe-Ni-Cr metastable phase diagram, indicating the designation, microstructure, and composition region of several classes of stainless steels important in power-generating equipment.

Figure 60. Exemples de coupes sur diagrammes ternaires [14], [15]

3.6.2 Vidéos

[Vidéo anglais 6 min www.youtube.com/watch?v=GXap5CC8MN4](https://www.youtube.com/watch?v=GXap5CC8MN4)

[Vidéo anglais 7 min www.youtube.com/watch?v=h8tFnC4pNGc](https://www.youtube.com/watch?v=h8tFnC4pNGc)

[Comment construire et analyser un diagramme triangulaire \(13 min\)](#)

3.7 Diagrammes d'équilibres de phases : diagramme de l'air humide

L'air humide est constitué d'air sec et d'eau sous forme de vapeur d'eau. En fonction de la pression et de la température, il peut y avoir condensation ou évaporation d'eau présente. Ces phénomènes sont des transformations de phases dépendant de la température et de la pression. Il semble donc raisonnable de souhaiter les décrire à l'aide de diagrammes de phases. On utilisera en fait le diagramme de l'air humide.

[Vidéo DAH anglais \(0 à 6 min\) https://www.youtube.com/watch?v=5JHcknTpARU](https://www.youtube.com/watch?v=5JHcknTpARU)

[Vidéo DAH Anglais \(4min\) https://www.youtube.com/watch?v=Qsl5yQsinIY](https://www.youtube.com/watch?v=Qsl5yQsinIY)

3.7.1 Définitions

Soit un air humide de masse totale M constitué d'une masse d'air sec A et une masse m_v de vapeur d'eau. On a :

$$M = A + m_v$$

L'humidité absolue w (kg de vapeur d'eau / kg air sec) est la masse de vapeur d'eau contenue dans l'air pour 1kg d'air sec. Elle est donc donnée par

$$w = \frac{m_v}{A}$$

L'humidité absolue de saturation (kg vapeur d'eau /kg air sec) est la masse maximale de vapeur d'eau par kg d'air sec que l'air peut contenir pour une pression et température données

L'humidité relative (%) est alors

$$HR(Pression, T^\circ C) = \frac{\text{Masse de vapeur d'eau contenue dans l'air pour 1kg d'air sec}}{\text{Masse maximale de vapeur d'eau par kg d'air sec que l'air peut contenir}}$$

3.7.2 Bilan de masse

Soit un air humide de masse totale M constitué d'une masse d'air sec A et une masse m_v de vapeur d'eau. On a :

$$M = A + m_v$$

Or soit w l'humidité absolue. On a par définition

$$w = \frac{m_v}{A}$$

donc

$$M = A + w.A = A.(1+w)$$

3.7.3 Mise en évidence du DAH

Exploitons la Figure 61. Il est admis que la quantité maximale que peut contenir l'air augmente avec la température. Ainsi, le niveau $HR = 100\%$ augmente avec w . On obtient alors le diagramme de la Figure 62 : c'est le diagramme de l'air humide DAH.

3.7.4 Composantes remarquables du DAH

La température sèche est la température lue sur un thermomètre standard (c'est donc l'axe des abscisses).

La température de rosée est la température de début de condensation lors d'un refroidissement isobare.

La température humide est la température d'équilibre d'une masse d'eau s'évaporant dans l'air. Elle est donnée par un thermomètre dont le bulbe est recouvert d'un coton saturé d'eau. L'air au contact avec le bulbe produit une évaporation qui diminue la température du bulbe. La température se stabilise lorsque l'air est saturé.

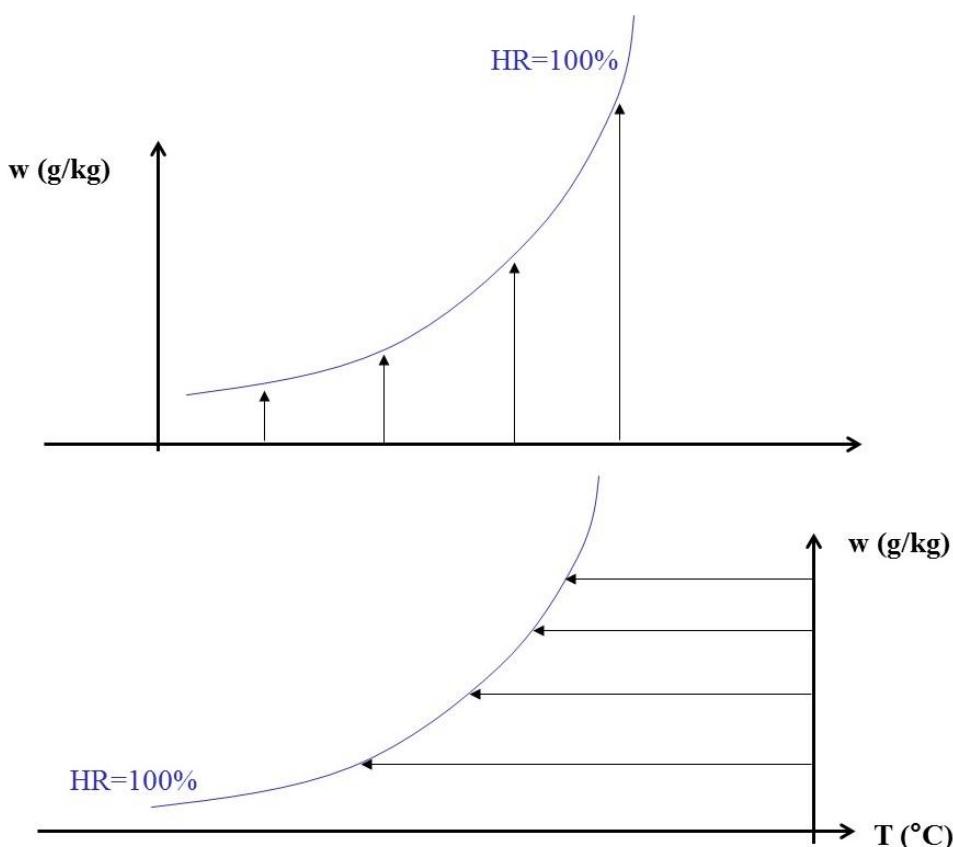


Figure 61. Mise en évidence du DAH

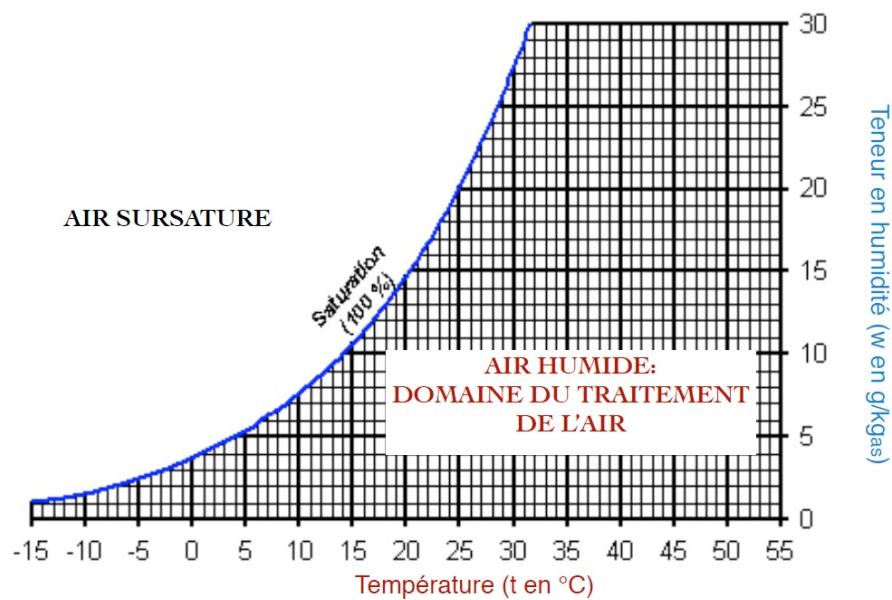


Figure 62. DAH (<http://talbourdel.yves.free.fr/resources/DOC/v3-diagramme-de-lair-humide.pdf>)

Les courbes d'humidité relative constante fournissent un abaque donnant le niveau d'humidité relative en fonction de la température et de la quantité de vapeur d'eau présente.

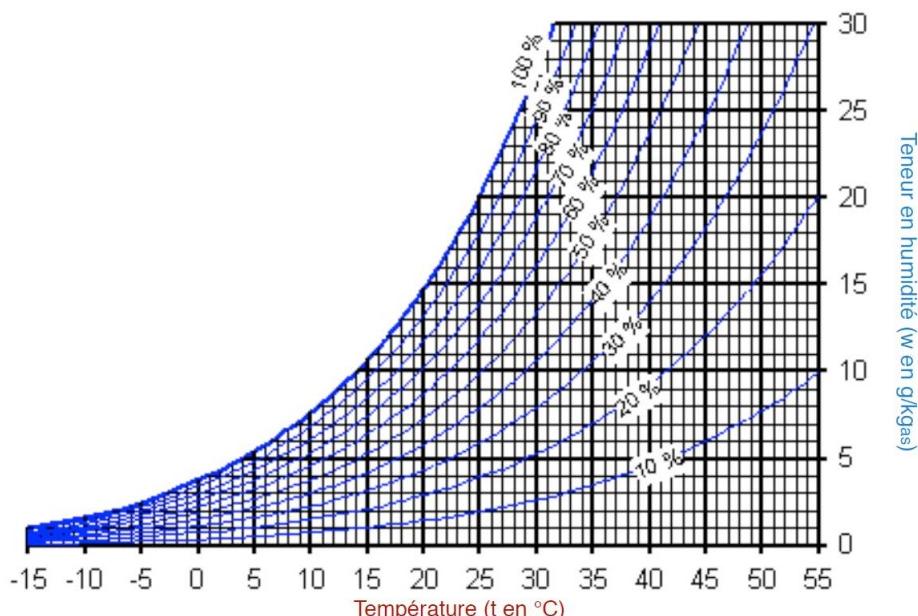


Figure 63. Courbes d'iso HR du DAH (<http://talbourdel.yves.free.fr/resources/DOC/v3-diagramme-de-lair-humide.pdf>)

3.7.5 Notion d'enthalpie

L'enthalpie (J/kg air sec) est une des grandeurs thermodynamiques usuelles caractérisant l'énergie de l'air. On peut, sur le DAH, tracer des courbes d'isoenthalpie.

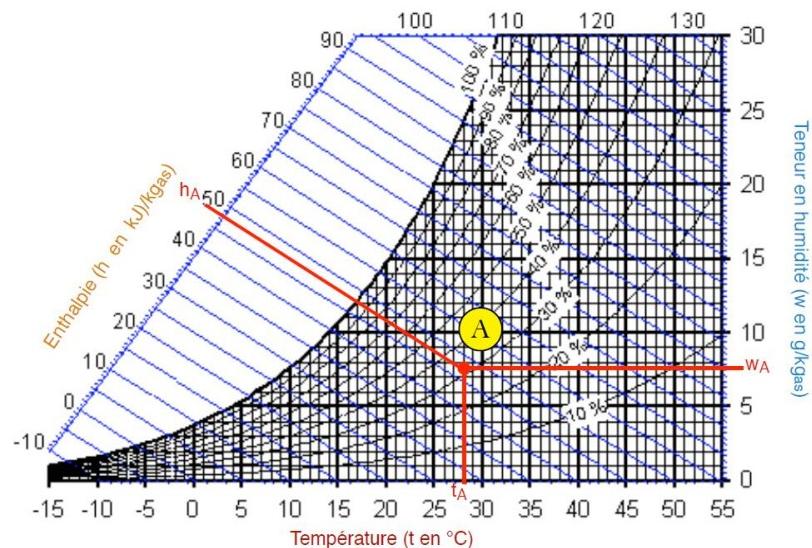


Figure 64. Courbes d'iso enthalpie du DAH (<http://talbourdel.yves.free.fr/resources/DOC/v3-diagramme-de-lair-humide.pdf>)

3.7.6 Bilans de masse et d'énergie

Si l'on mélange deux volumes d'air, alors les masses d'air sec, de vapeur d'eau et les enthalpies totales s'additionnent.

4 Exercices

4.1 Structure de la matière

4.1.1 QCM

Une phase est un volume de matière à limites bien définies qui montre

- a) Une composition chimique homogène seulement
- b) Une organisation des atomes et molécules homogène seulement
- c) Une composition chimique homogène et une organisation des atomes et molécules homogène

4.1.2 Exercice : motif et réseau

Donner le motif et le réseau du cristal diamant

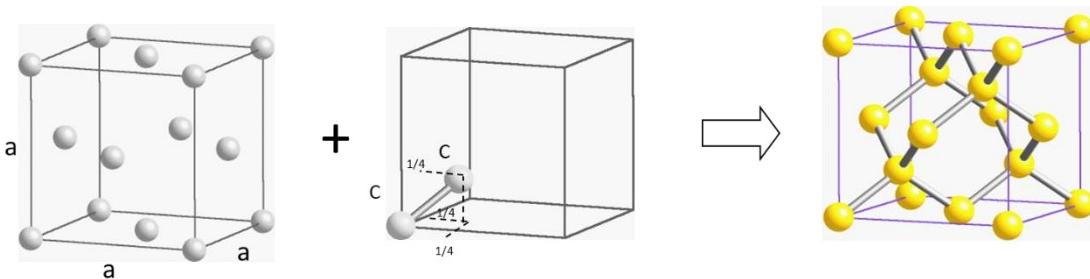


Figure 65. Référence cge2014.impmc.upmc.fr

Donner le motif et le réseau du cristal NaCl

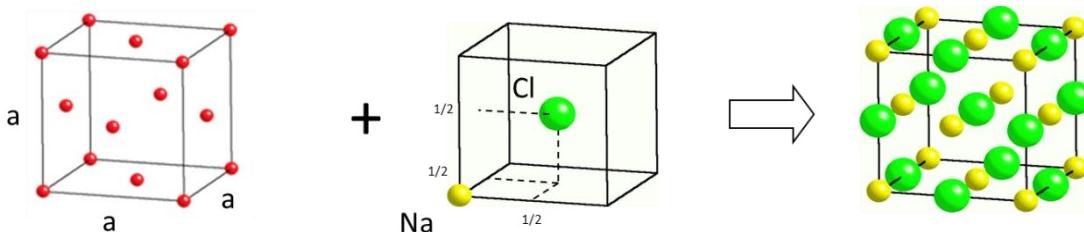


Figure 66. Référence cge2014.impmc.upmc.fr

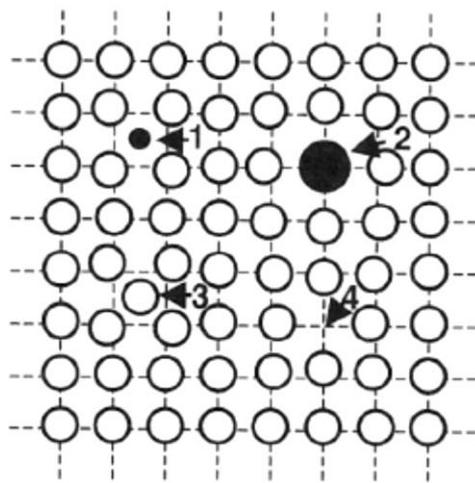
Correction

Diamant : Réseau CFC, Motif : 2 atomes C en 0, 0, 0 et 1/4, 1/4, 1/4

NaCl : Réseau CFC, motif : 1 atome Na en 0,0,0 et 1 atome Cl en 1/2, 1/2, 1/2

4.1.3 Exercice : défauts du cristal

Indiquer les noms des 4 types de défauts ponctuels schématisés ci-dessous



Correction

1 : Atome différent en insertion / 2 : Atome différent en substitution 3 : Auto-Interstitial / 4 : Lacune

4.1.4 Exercice : compacité

La compacité est le rapport entre le volume occupé par les atomes et le volume du cristal.

- Calculer la compacité de la ferrite α (CC) et du cuivre (CFC)
- Pourquoi parle-t-on d'empilement compact et non compact ?

Ressource à visionner : <http://phymain.unisciel.fr/un-reseau-cristallin-de-pieces-de-monnaie/>

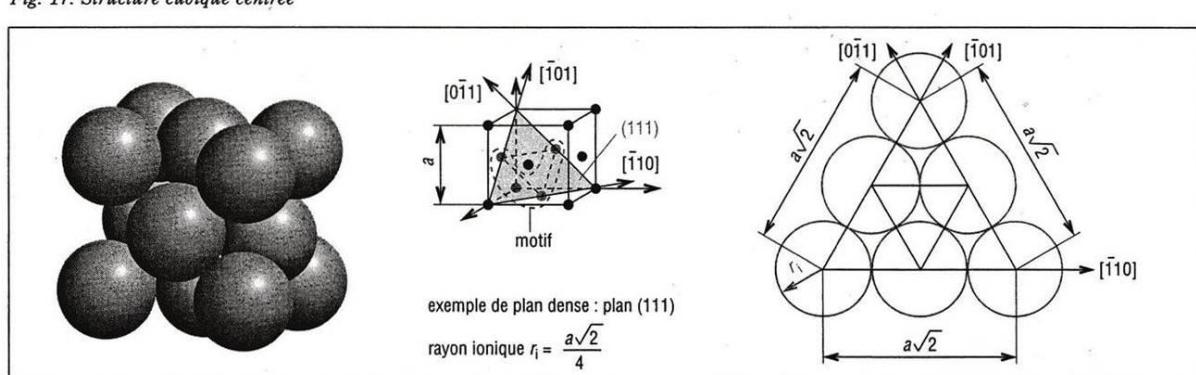
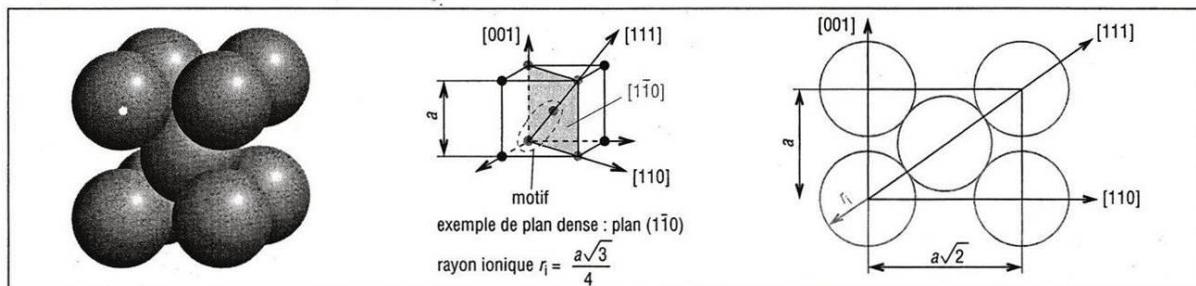


Figure 67. Référence [9]

Correction

CC : 0.68 ; CFC : 0.74

Le réseau CC n'est pas compact, on n'est pas à la compacité maximale possible

4.1.5 Exercice : la cémentite

Les masses molaires du fer et du carbone sont 56 et 12 g/mol.

Calculer le % en masse du carbone dans la cémentite Fe_3C .

Correction

$$m\%(C) = \frac{12}{3 * 56 + 12} = 6.67\%$$

4.1.6 Exercice : diagramme de l'air humide

On souhaite expédier une caisse carton dans un pays froid. Dans la caisse, la masse d'air sec est de 1kg.

La caisse est considérée parfaitement étanche.

Afin de contrôler l'humidité relative au sein de la caisse, on place un sachet déshydratant 1/32UD pouvant absorber jusqu'à 3g d'eau.

1. Le conditionnement se fait à $T = 23^\circ\text{C}$ et un taux d'humidité relative $HR = 40\%$. Placer le point correspondant sur le diagramme. Quelle quantité de vapeur d'eau est alors contenue dans la caisse (en g) ?
2. La température reste à 23°C et le sachet absorbe la quantité maximale d'eau prévue dans le catalogue (3g). Quel est le nouveau taux d'humidité relative à 23°C ? Placer le point correspondant sur le diagramme.
3. Quelle température peut-on maintenant atteindre dans la caisse sans dépasser une humidité relative de 40% ? Placer le point correspondant sur le diagramme.
4. Déterminer la température de rosée et placer le point correspondant sur le diagramme.

PROTÈGE DE L'HUMIDITÉ!

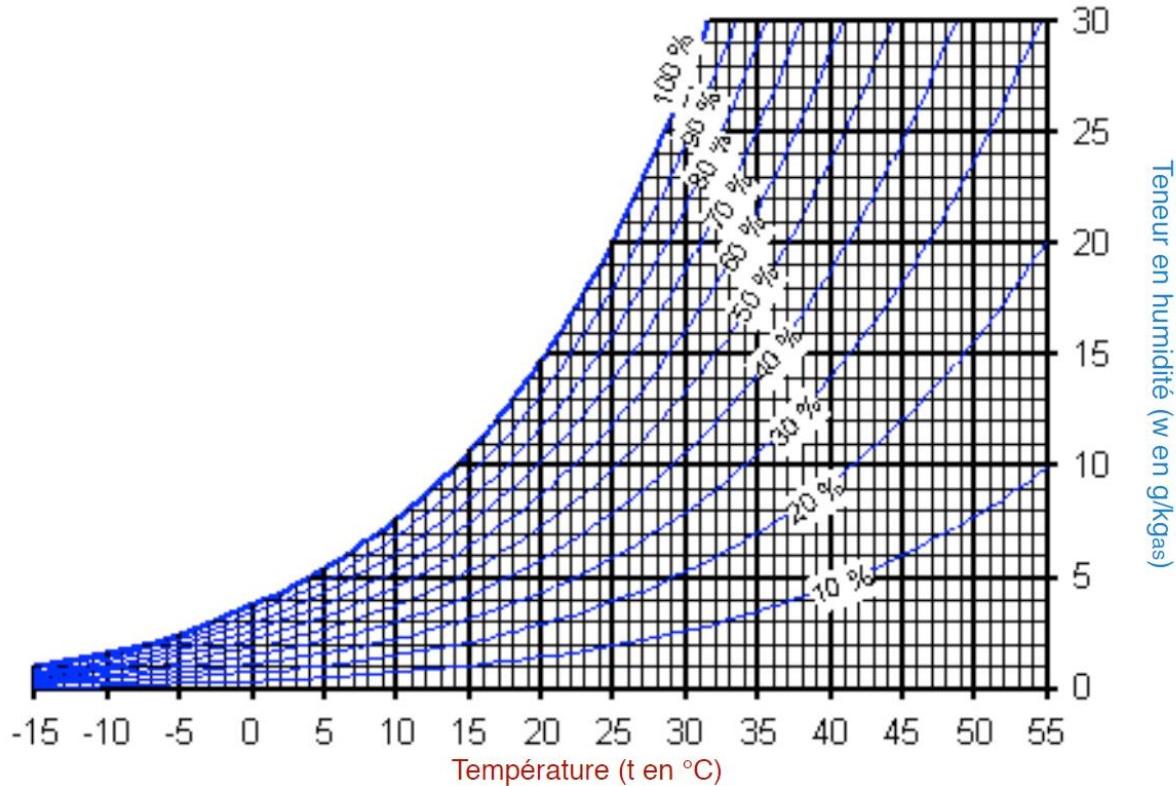
Sachet déshydratant

- Facile à utiliser et très efficace : il maintient à l'intérieur de caisses, containers... un niveau d'humidité suffisamment bas pour éviter la formation d'eau.
- Sans danger pour la marchandise** : il conserve un aspect sec même quand il est saturé.
- Non toxique** : matière naturelle à base d'argile inerte. Non inflammable.

-15% -30%

Référence	capacité en UD	absorption d'eau* en g	longueur x largeur en cm	poids en g	colis de	€ ht le colis		
						1 et +	3 et +	6 et +
4FSD100U	1/100	1	8,5 x 4	6	2000	189,-	159,-	132,-
4FSD32U	1/32	3	10 x 7	18	600	149,-	126,-	104,-
4FSD16U	1/16	6,5	13 x 7	36	300	115,-	97,75	80,50
4FSD8U	1/8	13	12 x 9,5	71	200	105,-	89,25	73,50
4FSD2U	1/2	50	16 x 16	283	80	94,55	80,35	66,15
4FSD1U	1	100	22 x 16	565	40	70,50	59,90	49,35

* À saturation. Pour exemple, à 40 % d'humidité et 23°C, la capacité d'absorption est de 100 g pour 1 sachet 1 UD. Contient du chlorure de calcium et de l'argile.

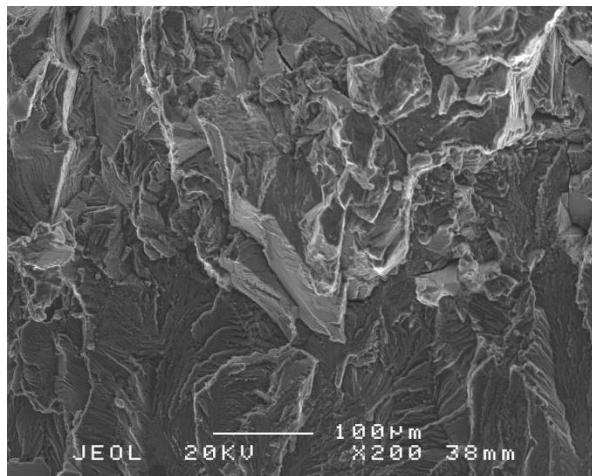


Correction

4.2 Analyses et microscopie

4.2.1 Exercice : fractographie

La fractographie présente un alliage d'aluminium 2024-T351 fissuré en fatigue. Avec quel type d'instrument a-t-on obtenu cette fractographie ?



Correction

Microscope Electronique à Balayage (MEB)

4.2.2 Dilatométrie et diagramme de phases du fer

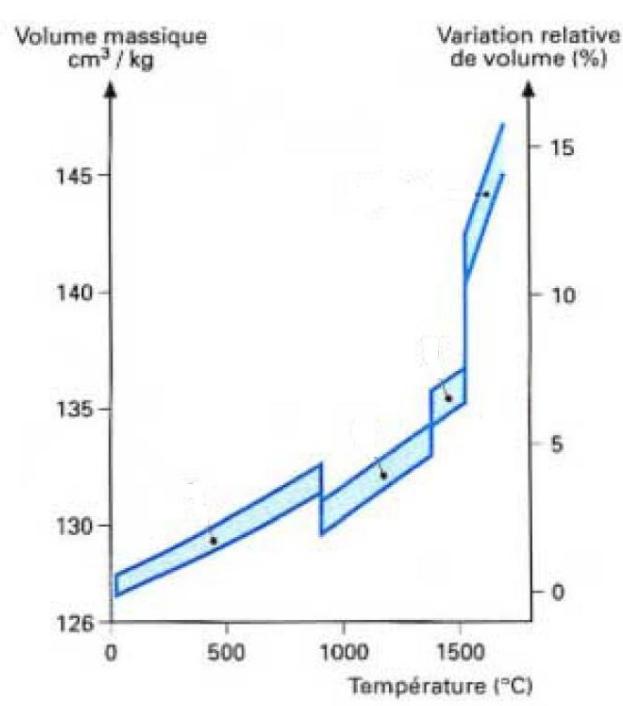
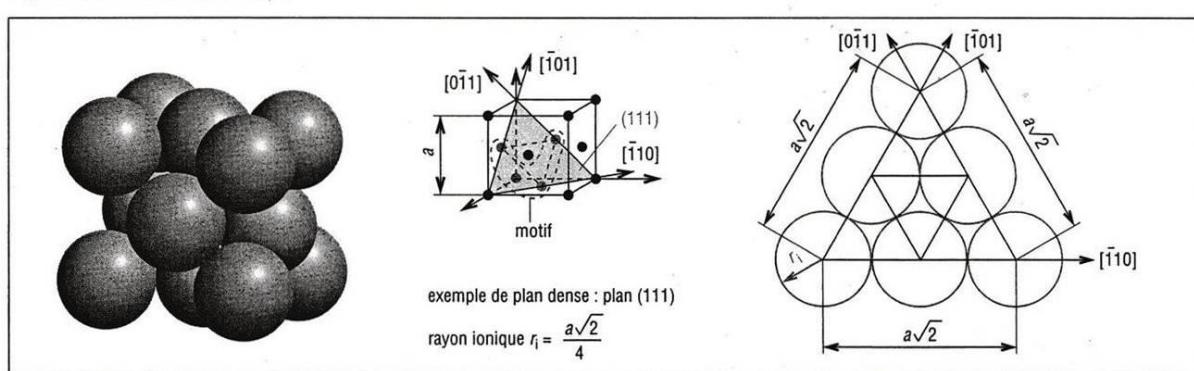
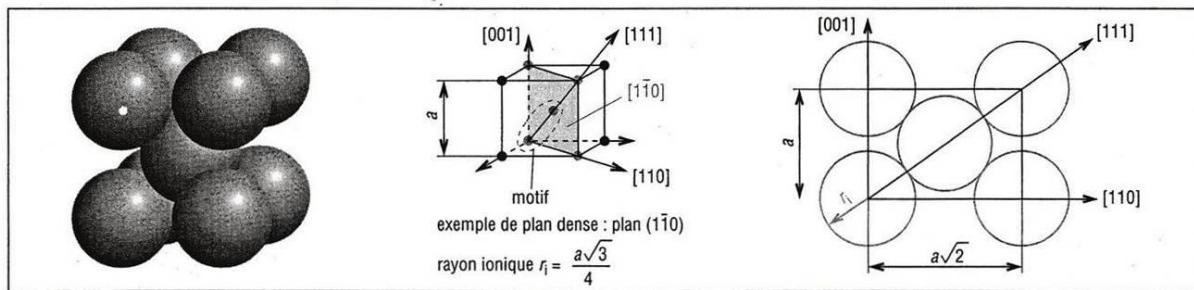
Toute modification de la température d'un matériau s'accompagne de variations de son volume :

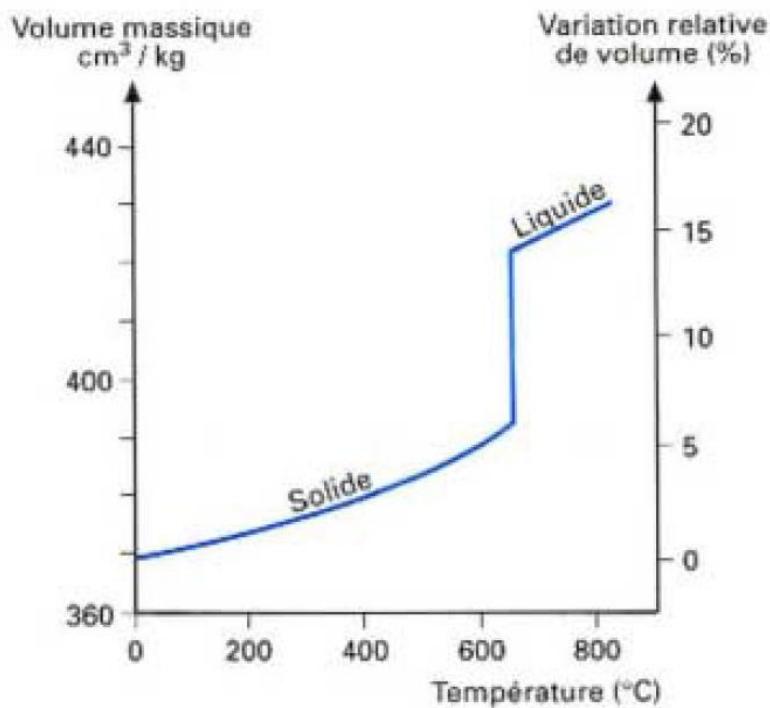
- continues par le jeu de la dilatation
- discontinues par le jeu des changements d'états et des transformations allotropiques.

1/ La compacité est le rapport entre le volume occupé par les atomes et le volume du cristal. Déterminer la compacité des phases cubiques centrées du fer (ferrite α et ferrite δ) et de la phase cubique faces centrées du fer (austénite γ)

2/ On mesure la variation de volume dans un échantillon de fer de masse constante. On obtient la courbe suivante. Retrouver le diagramme de phases du fer pur à partir de cette analyse

3/ On donne ci-dessous la courbe de dilatométrie obtenue sur un échantillon d'aluminium pur. Que peut-on dire de ce matériau lors du refroidissement à l'état solide ?





(b) aluminium

Correction

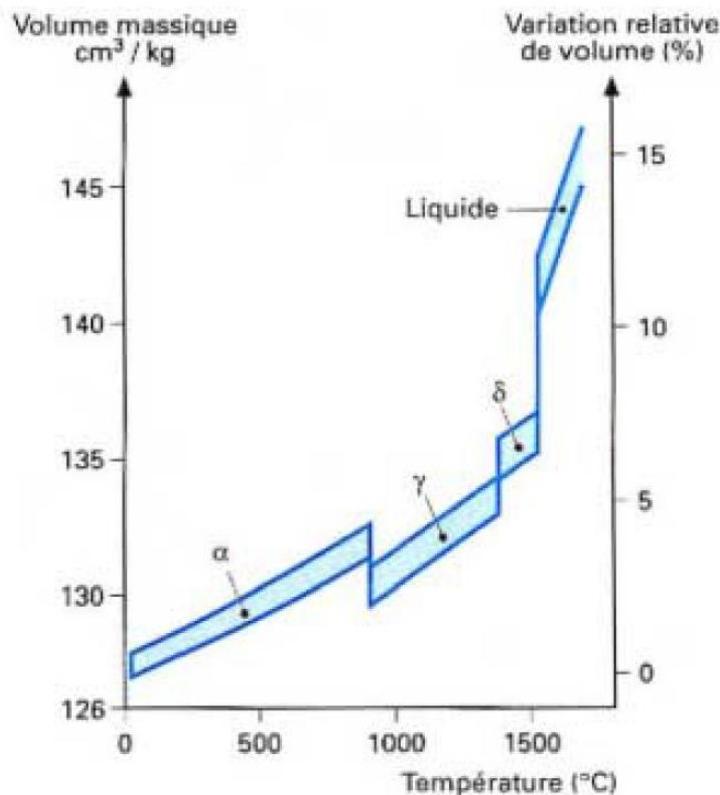
À une pression 1 atmosphère, le fer fond à 1536°C et bout à 2860°C.

En début de solidification, il devient cristallin avec une structure CC (fer δ).

À 1391°C il évolue vers une structure cristalline CFC (fer γ).

À 914°C il revient à la structure cristalline CC (fer α).

CC : 0,68 et CFC : 0,74



Ⓐ fer

4.2.3 Exercice : transitions de phases d'un acier

On présente ci-dessous l'analyse DSC d'un acier à 0,2% C.

Expliquer le résultat obtenu par DSC à l'aide du diagramme de phases Fe-C

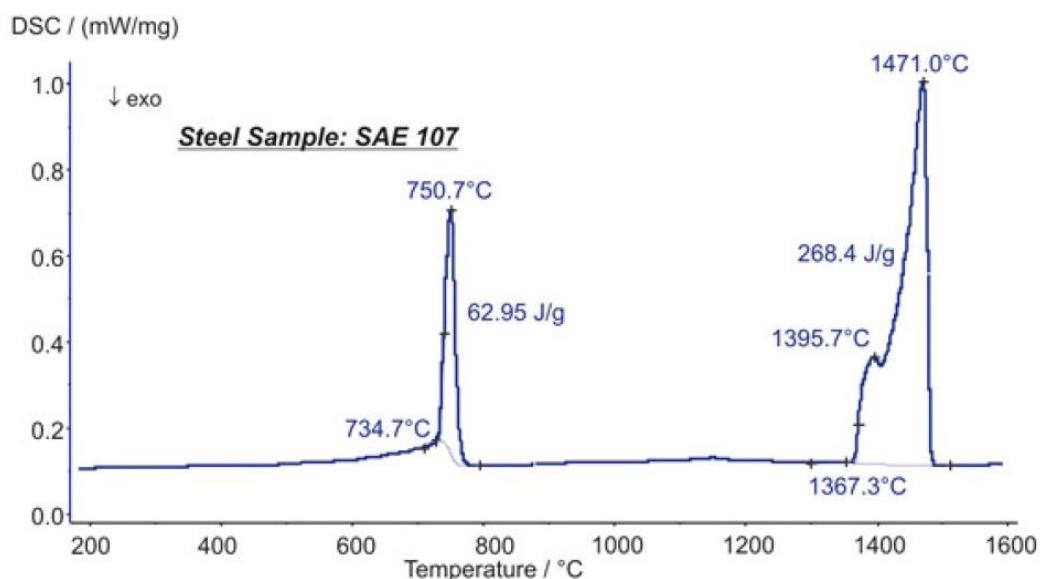


Figure 68. Réf NETZSCH

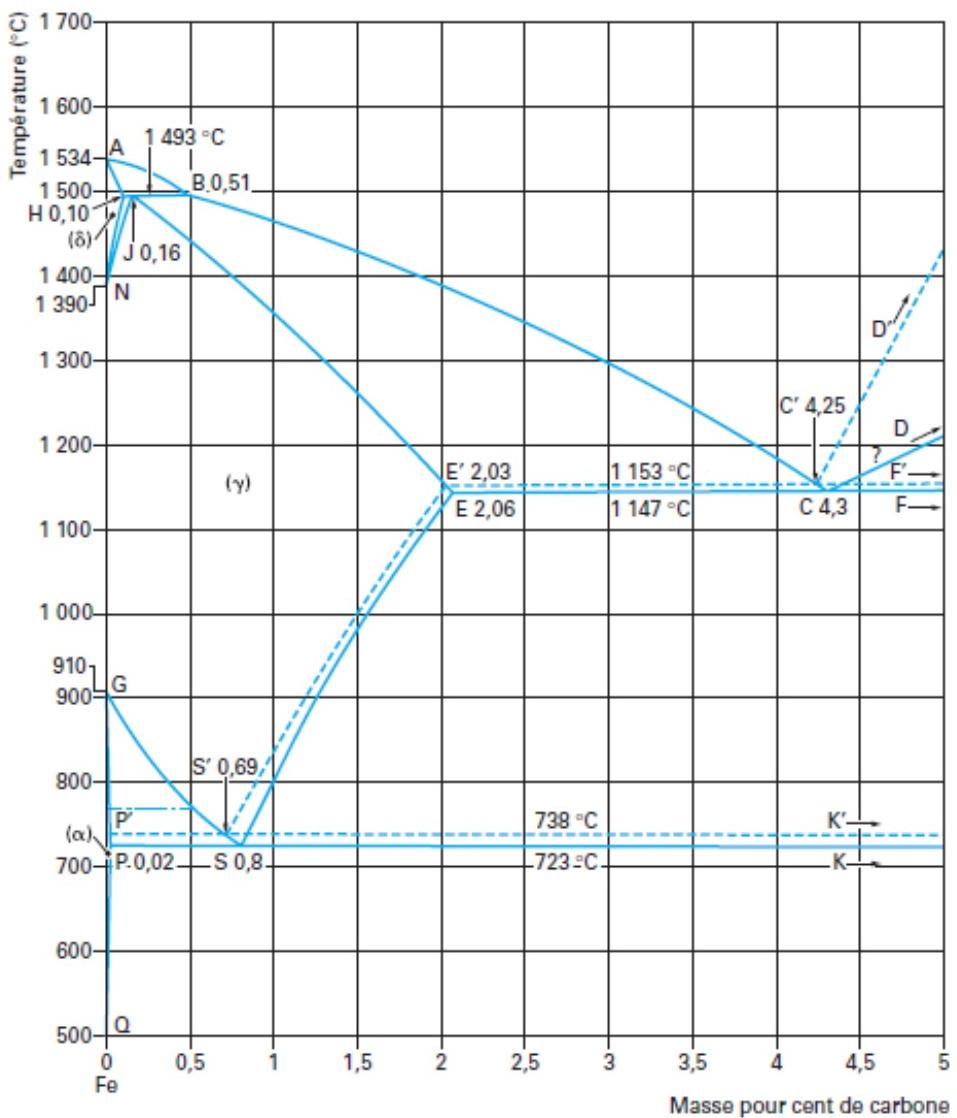


Figure 69. Diagramme d'équilibre du système Fe-C [16]

Correction

Les énergies de transformation d'un acier (SAE 107) sont présentées ici.

A 751°C, 2 transitions de phase se superposent. L'augmentation du flux thermique jusqu'à 735°C est due à la transition de Curie (changement dans les propriétés magnétiques).

Un changement dans la structure cristalline (CC -> CFC) est la cause du principal pic.

La fusion a été détectée à 1367°C et s'est déroulée en 2 pics (pics à 1395°C et 1471°C). L'enthalpie de fusion est de 268 J/g. (mesure avec DSC 404 F1 Pegasus®)

5 Références

- [1] O. Asi, « Failure analysis of a crankshaft made from ductile cast iron », *Engineering Failure Analysis*, vol. 13, n° 8, p. 1260-1267, déc. 2006, doi: 10.1016/j.engfailanal.2005.11.005.
- [2] « Air & Cosmos », *Air & Cosmos*, n° 2244, 10 décembre 2010.
- [3] Fédération française des matériaux, *Vade-mecum des matériaux*, Fédération Française des Matériaux. 2010.
- [4] P. Arnaud, *Les cours de Paul Arnaud. Chimie Physique*, 6^e éd. DUNOD, 2007.
- [5] M. Dupeux, *Aide-mémoire de science des matériaux*, 3^e éd. DUNOD, 2013.
- [6] M. Ashby et D. Jones, *Matériaux. 1. Propriétés, applications et conception*. DUNOD, 2013.
- [7] J. Barralis et G. Maeder, *Métallurgie: élaboration, structures-propriétés, normalisation*, Nouv. éd. in Précis. [Paris-La Défense] Paris: AFNOR Nathan, 1997.
- [8] A. Bravais, *Etudes cristallographiques ; Mémoire sur les systèmes formés par des points distribués régulièrement sur un plan ou dans l'espace*. 1866. [En ligne]. Disponible sur: gallica.bnf.fr / Ecole Polytechnique
- [9] J. Mesplède, *Thermodynamique, matériaux, PC: nouveau programme*. in Les nouveaux précis Bréal. Rosny-sous-Bois: Bréal éd, 2004.
- [10] F. Menan, « Influence de la corrosion saline sur la tolérance aux dommages d'un alliage d'aluminium aéronautique 2XXX », 2008. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.theses.fr/2008POIT2301/document>
- [11] J.-M. Dorlot, J.-P. Baillon, et J. Masounave, *Des Matériaux*, 2. ed., rev. Augmentée. Montréal: École Polytechnique de Montréal, 1986.
- [12] Y. Lehericy, « Endommagement et cumul de dommage en fatigue dans le domaine de l'endurance limitée d'un acier inoxydable austénitique 304L », 2007.
- [13] M. Ashby et D. Jones, *Matériaux. 2. Microstructure et procédés de mise en oeuvre*, 4^e éd. DUNOD, 2014.
- [14] M. O. Speidel, « Stress corrosion cracking of aluminum alloys », *Metall Trans A*, vol. 6, n° 4, p. 631-651, avr. 1975, doi: 10.1007/BF02672284.
- [15] A. Rivière, « Cours de matériaux ISAE-ENSMA ». ISAE ENSMA, 2003.
- [16] J. Hertz, « Diagrammes d'équilibre - Alliages binaires », *Étude et propriétés des métaux*, déc. 1999, doi: 10.51257/a-v2-m70.
- [17] B. Hocheid, *Que sais-je ? La métallurgie*, Presses Universitaires de France. 1970.
- [18] M. Dupeux et J. Gerbaud, *Exercices et problèmes de sciences des matériaux*. in Sciences sup. Paris: Dunod, 2010.

- <http://fr.wikipedia.org/wiki/Pi%C3%A9zo%C3%A9lectricit%C3%A9>
- <https://fr.wikipedia.org/wiki/Temp%C3%A9rature>
- <http://btscira.perso.sfr.fr/page1/page29/page29.html>
- <http://www.uvt.rnu.tn/resources-uvt/cours/Distillation/chapitre2/general/toc.html>
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Effet_Seebeck
- <https://fr.wikipedia.org/wiki/Thermistance>
- <http://www.uvt.rnu.tn/resources-uvt/cours/Distillation/chapitre2/Chapitre-3/Section-3-5.html>
- <http://perso.wanadoo.fr/philippe.boeuf/robert/physique/mouille.htm>
- http://www.biophysique.sitew.com/dl/Root/9n4dm-tension_superficielle.pdf