

!!!!!! ATTENTION !!!!!

Interdiction Formelle de reproduire

(Désolé , je n'ai pas eu le temps de mettre la bibliographie utilisée!!)

- Ce document est un support du cours que je donne et non pas un cours en lui-même.

Les métaux et leurs alliages

Les premiers métaux

Les 7 premiers métaux, connus sous le nom de métaux anciens sont des métaux sur lesquels les civilisations se sont construites.

Métaux anciens

Or	-6000 (JC)
Cuivre	-4200
Argent	-4000
Plomb	-3500
Etain	-1750
Fer	-1500
Mercure:	-750

Introduction

Avantages

Les matériaux métalliques sont parmi les matériaux les plus anciens que l'homme a synthétisé et utilisés. Ils sont caractérisés par des liaisons métalliques où les électrons de valence sont pratiquement libres de circuler à travers le métal. Ces électrons mobiles sont responsables des bonnes propriétés de conductivité thermique et électrique et de leur aspect brillant, un éclat particulier dit éclat métallique ainsi qu'une aptitude à la déformation.

La température de fusion de ces matériaux est relativement élevée. Ils sont pour la plupart ductiles et relativement tenaces. L'association de leur ténacité et de leur ductilité est un atout majeur pour leur mise en forme.

Inconvénients

Par contre, ils sont souvent sensibles à la corrosion. De plus, du fait de leur plasticité, leur tenue à la fatigue peut poser des problèmes. Enfin, les métaux sont en général des matériaux lourds et denses, ce qui est parfois un handicap.



Propriétés générales des métaux

Température de fusion

Métal	Etain	Zinc	Aluminium	Argent	Cuivre	Or	Fer
T (C°)	232	420	660	961	1084	1064	1539

On utilise le tungstène pour fabriquer le filament des lampes à incandescence car sa température de fusion est la plus élevée. Il résiste a des grandes chaleurs.

Densité

Métal	Etain	Zinc	Aluminium	Argent	Cuivre	Or	Fer
Densité	7,36	7,14	2,70	10,49	8,94	19,30	7,87

Conductivité électrique

bons conducteurs électriques

Conductivité thermique

très bons conducteurs thermiques.

Propriété Magnétique

Les 3 principaux métaux fortement attirés par un aimant sont le fer, le nickel et le cobalt.

Les formes de corrosion

La corrosion galvanique

La corrosion par piqures

La corrosion carverneuse

La corrosion erosion – corrosion cavitation

La corrosion intergranulaire

La corrosion sous contrainte

La biocorrosion

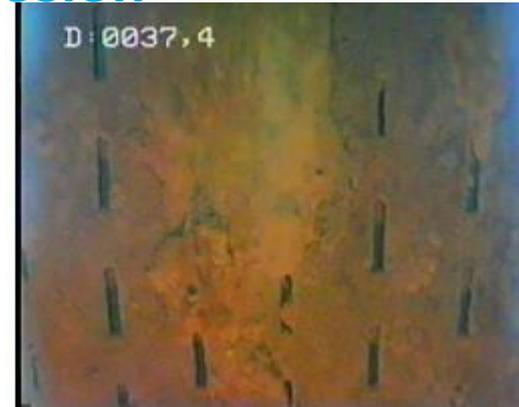
Corrosion généralisée



C. intergranulaire



Biocorrosion



Les différentes classes de métaux :

1) les métaux « nobles » (Au, Ag, Pt)

peu réactifs (non-oxydables)

se rencontrent à l'état « natif » (pur) dans la nature

2) les métaux alcalins (Na, K,...) et alcalino-terreux (Mg, Ca..)

très réactifs (en particulier avec les gaz halogènes)

remplissage des niveaux s

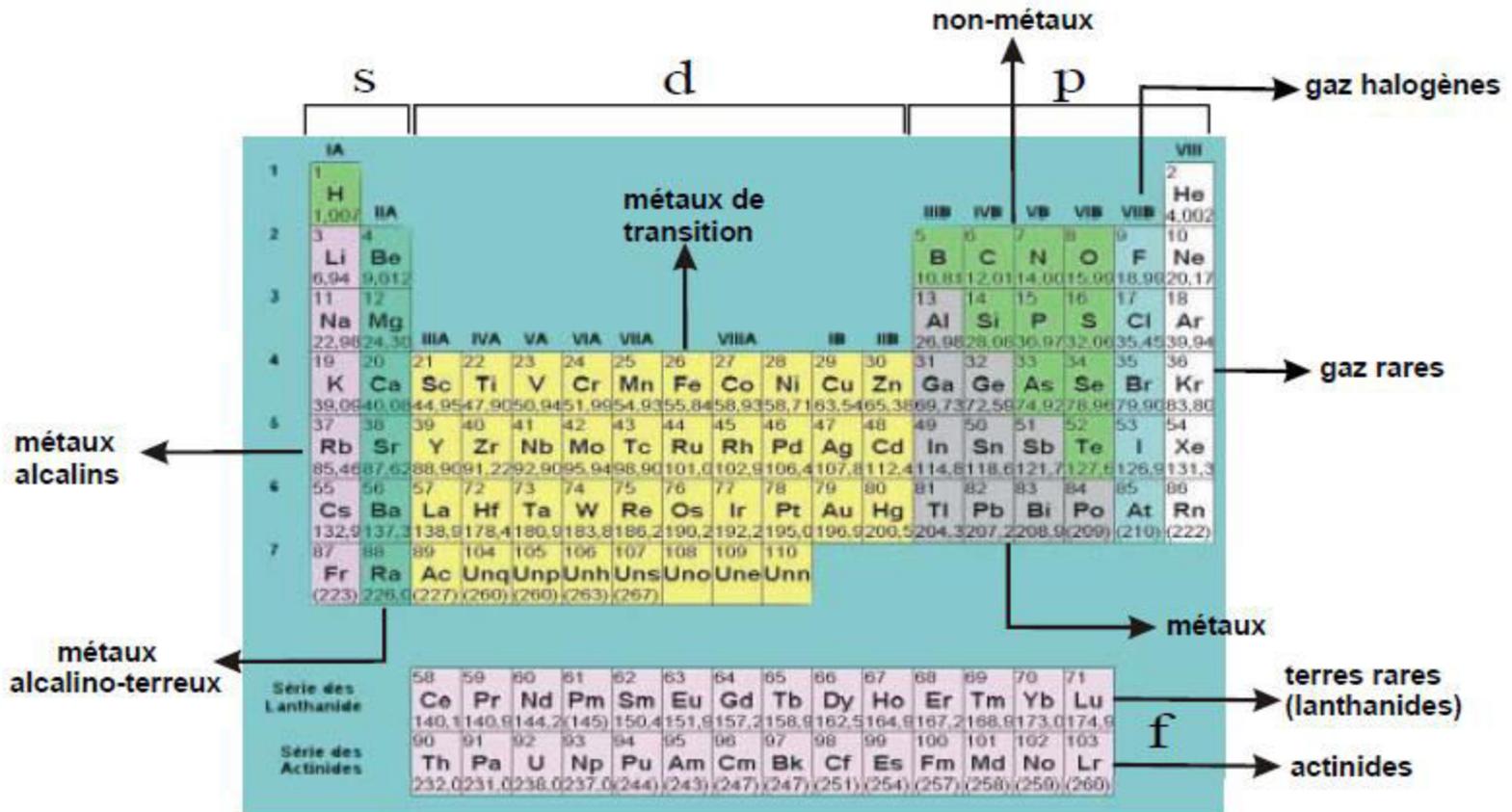
3) les métaux de transitions (Ti, Fe, Ni...)

remplissage des bandes d et chevauchement avec sp

4) Terres rares (lanthanides)(La, Ce...) et actinides (Th, U, Pu,...)

remplissages des couches f

Les métaux et Mendeleïev



les métaux sont majoritaires

Origine des métaux

On peut trouver les métaux soit a l'état natif soit sous forme de minerais.

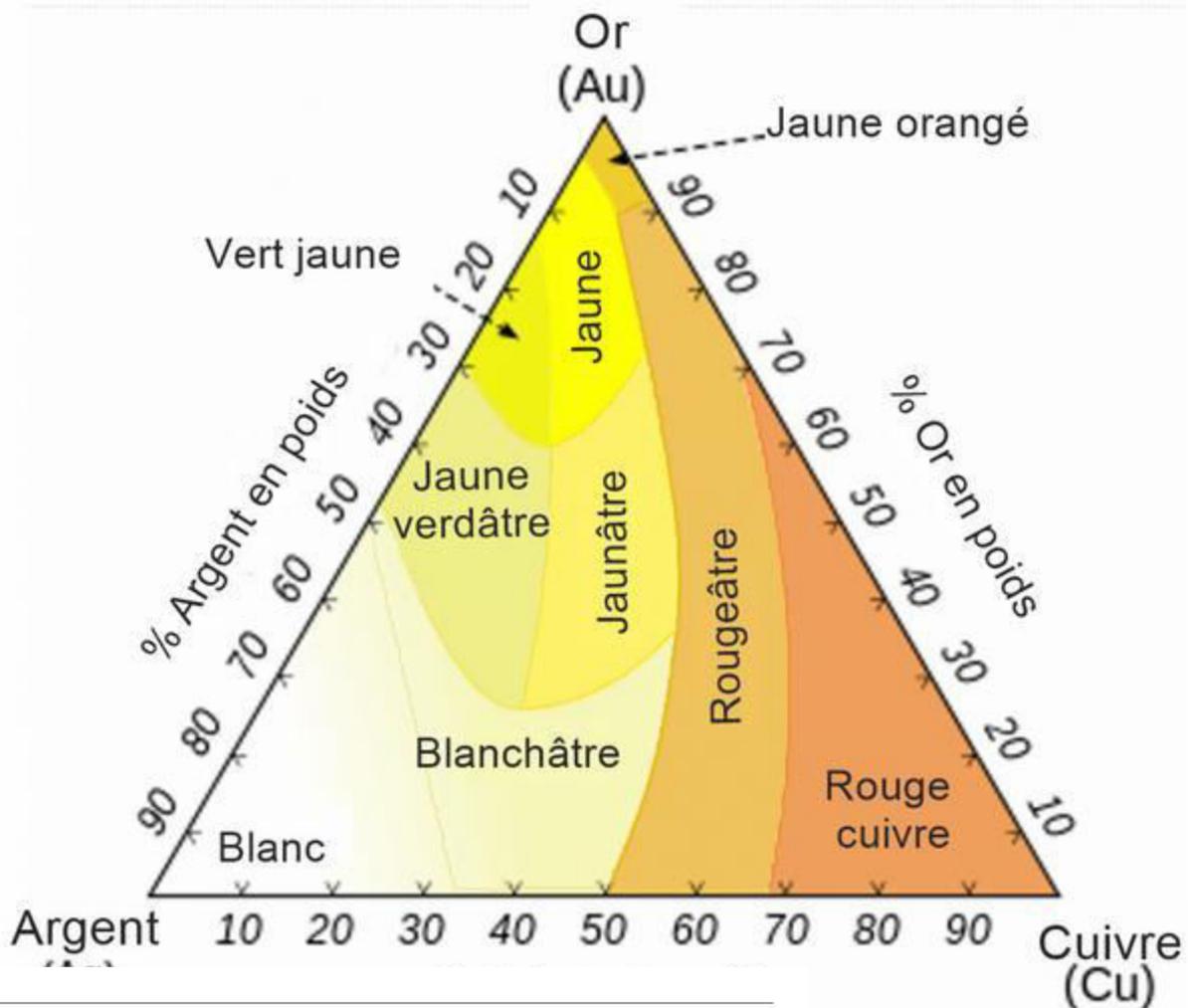
- Etat natif: état de corps simples non combinés a d'autres éléments.
- Minerais: Roches a partir desquels les métaux doivent être extraits.

La teneur en minerais mesurée en % massique représente ce que le minerais contient du métal en question.

<u>Métal</u>	<u>Etat natif</u>	<u>Minerais</u>
Or	seulement	non
Argent	minoritaire	majoritaire
Cuivre	minoritaire	majoritaire
Fer	exceptionnel	principalement

<u>Métal</u>	<u>Minerais</u>	<u>teneur</u>
Mercure	Cinabre	96.00%
Fer	Magnétite	74.00%
Cuivre	Cuprite	1 a 2%

Or et couleur!



Reconnaître l'or!

Poinçon		 ou 		
Carats	24K	18K	14K	9K
Teneur en Millièmes	1000	750	585	375
Titrage en % Or	100	75	58,5	37,5

Le matériaux métallique est composé d'un métal (élément chimique) ou de plusieurs métaux s'il s'agit d'un alliage (mélange).

L'usage des métaux à l'état pur est limité (sauf les métaux nobles: or et platine). Nous les utilisons le plus souvent sous forme d'alliages.

Selon leurs compositions, nous distinguons:

- les alliages **ferreux**, à base de fer (aciers et fontes),
- les alliages **non ferreux** à base d'autres éléments métalliques tels que: le cuivre, l'aluminium, le magnésium, le titane et le zinc.

Les métaux et leurs alliages

On appelle un alliage **binaire** un alliage composé de deux métaux:

- Le métal principal est appelé métal de base.
- Les éléments ajoutés sont appelés les éléments d'alliage ou d'addition.

Exemples:

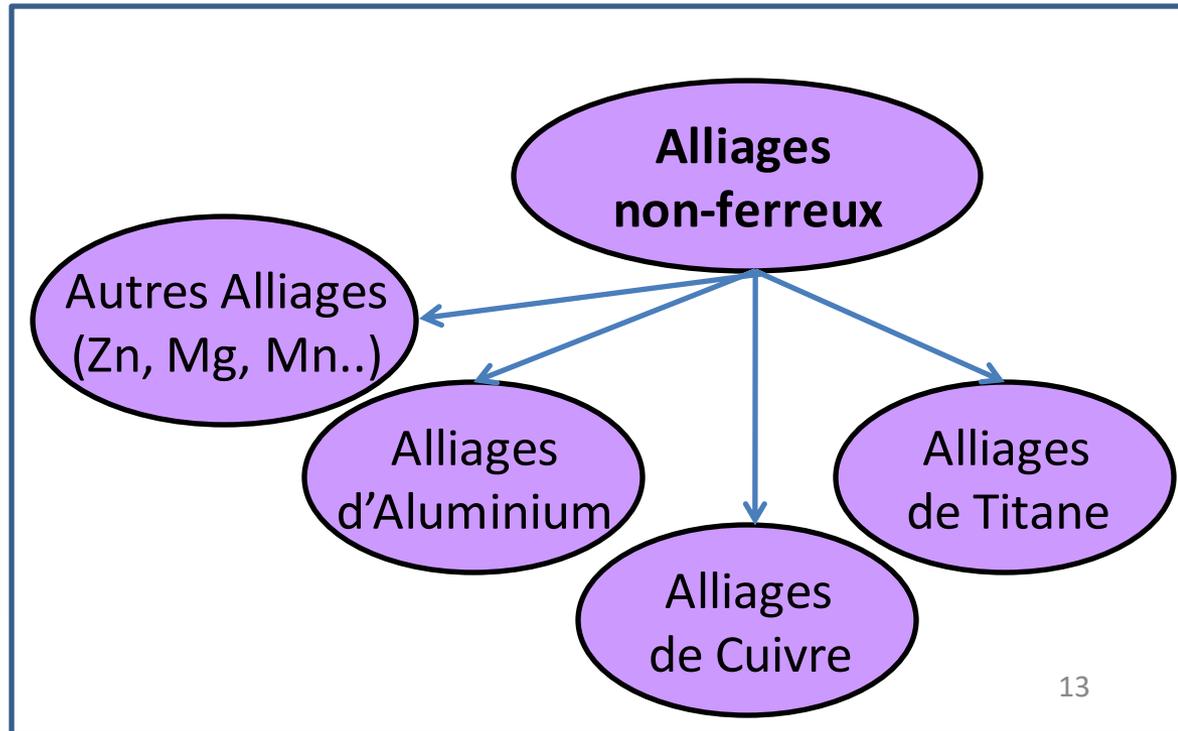
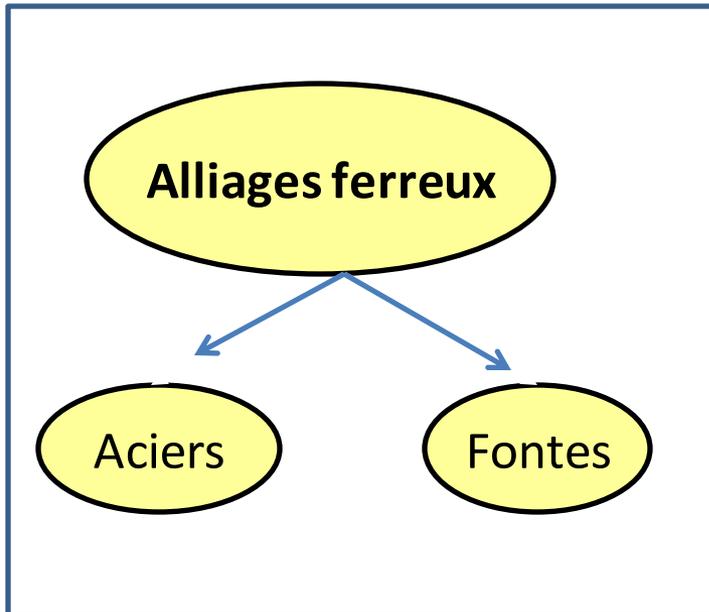
Alliage	Métal de base	Élément d'addition
Bronze	Cuivre	Etain (3 à 20%)
Laiton	Cuivre	Zinc (5 à 50%)
Acier	Fer	Carbone (- de 2%)
Fonte	Fer	Carbone (2 à 6%)
Inox (acier inoxydable)	Fer	Carbone+chrome (+ de 12%)

Les métaux et leurs alliages

se décomposent en deux classes:

- a) les métaux **ferreux** (fer, fontes, aciers, etc.) et
- b) les métaux **non ferreux** (aluminium, cuivre, magnésium, titane, etc.).

Elle possèdent principalement des liaisons métalliques.



a) Les métaux ferreux

L'exploitation du **diagramme Fe-C** permet de comprendre la modification de la structure cristallin du matériau par traitements thermiques, permettant d'améliorer les caractéristiques des matériaux.

Les alliages à base de fer (aciers et fontes) jouent un rôle capital sur le plan technologique. Ils constituent en masse **près de 90 %** de la production mondiale de matériaux métalliques. Plusieurs facteurs expliquent cette importance:

- Les alliages ferreux se prêtent facilement à une production en masse,
- Ils sont bon-marché et disponibles.
- On peut les acquérir sous différentes formes (plat, rond, profilés)
- Ils ont des caractéristiques mécaniques variées et ajustables grâce à la diversité des traitements thermiques, chimiques et des éléments d'addition.

Les alliages à base de fer

Deux grandes familles sont définies en fonction du pourcentage de carbone :

- Les aciers % de carbone compris entre **0,008 et 2,1**.

Aciers **hypo**euctoïdes constitués de ferrite et de perlite

Aciers **hyper**euctoïdes constitués de cémentite et perlite.

- Les fontes %de carbone compris entre **2,11 et 6,67**
(le matériau est alors fragile et cassant).

Qu'est ce que c'est un diagramme des phases?

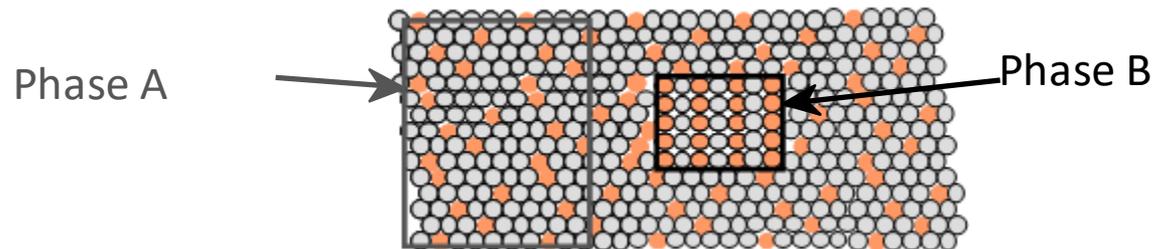
- Lorsqu'on combine deux éléments...
 quels états d'équilibre nous obtenons?
- En particulier, si on specifie...
 - la composition (e.g., wt% Cu - wt% Ni), et
 - la temperature (T)

Alors...

Combien de phases obtient-on?

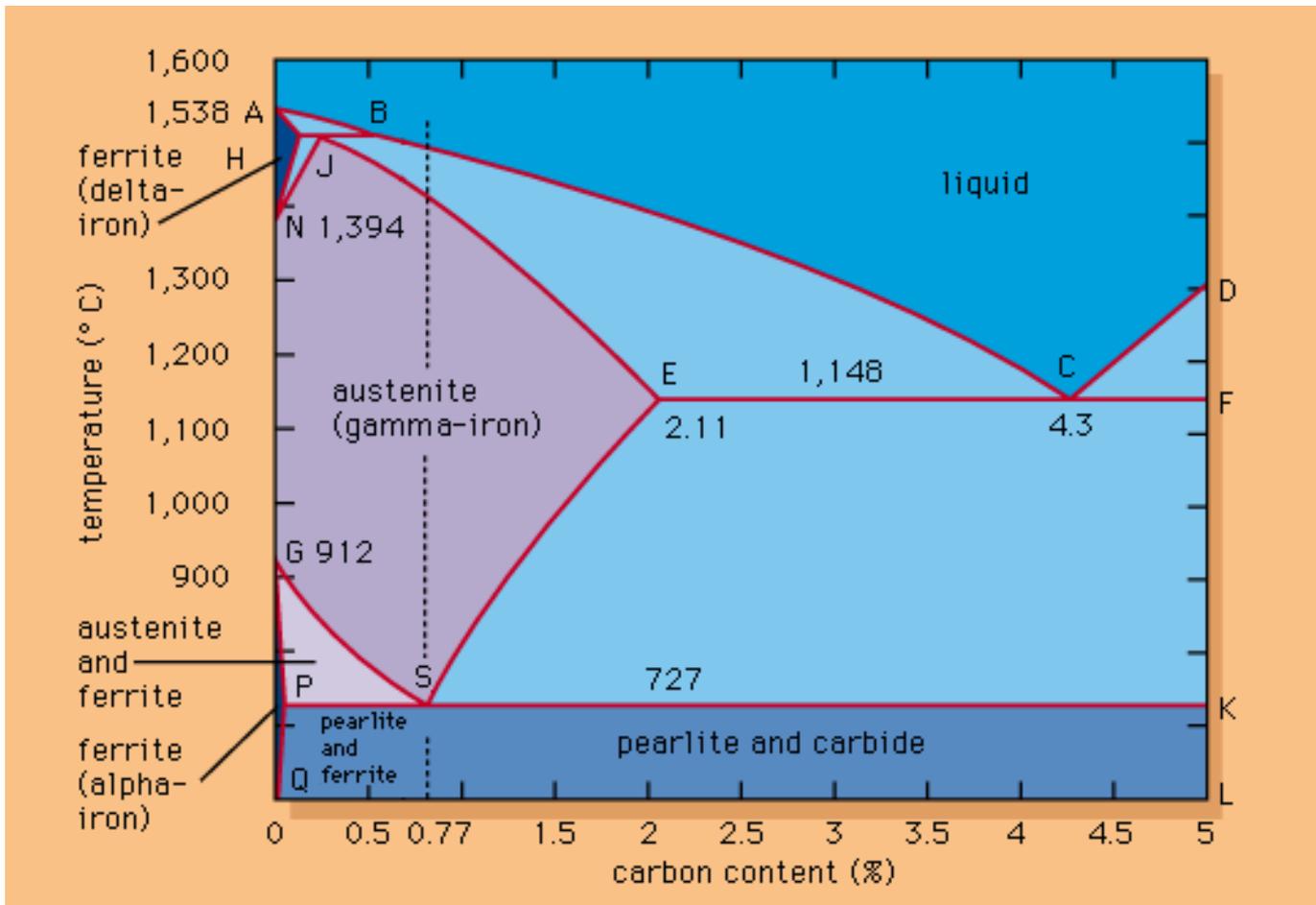
Quelle composition pour chaque phase?

Quelle est alors la quantité de chaque phase?



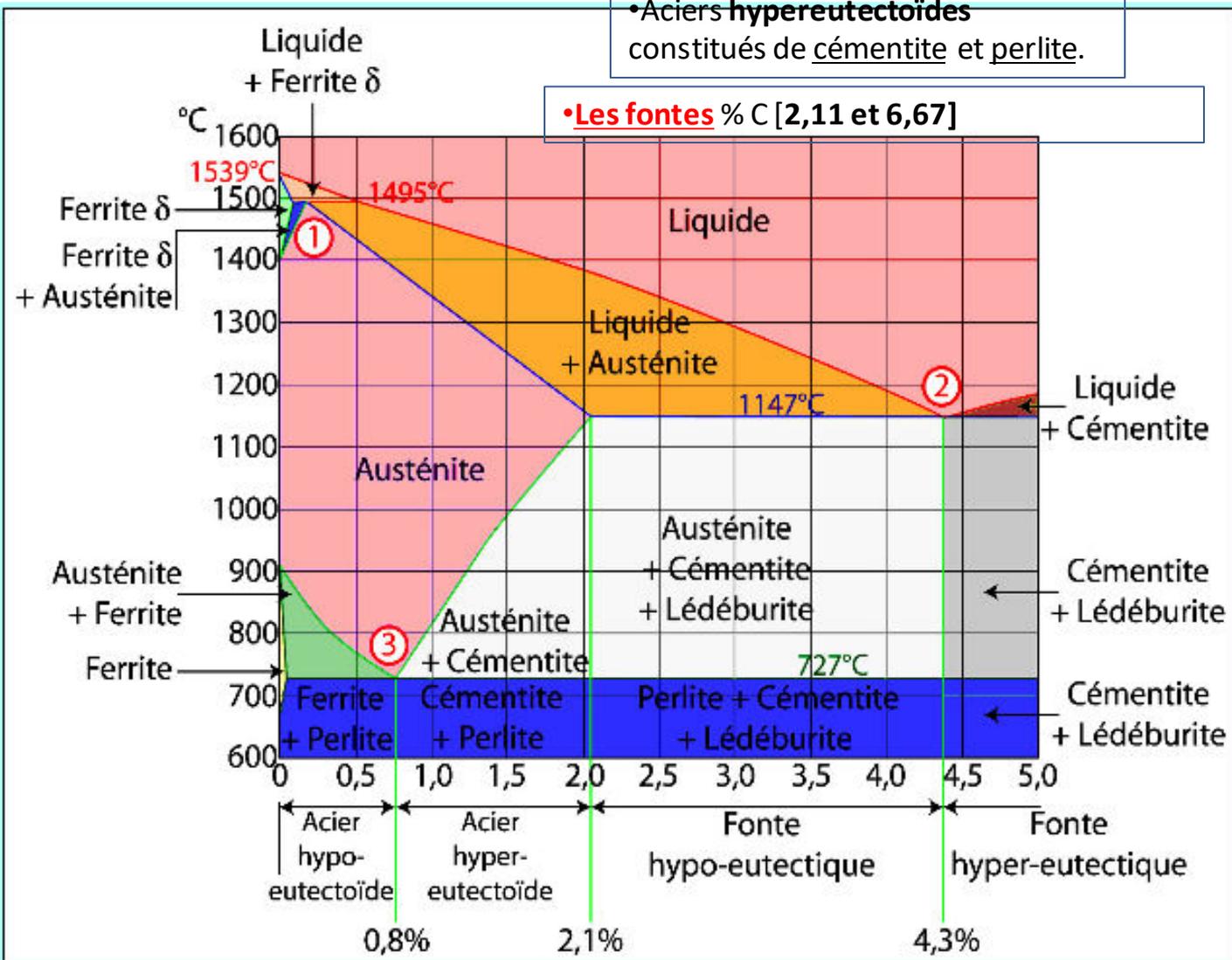
- Atome de Nickel
- Atome de Cuivre

Qu'est ce que c'est un diagramme des phases?



Le plus important dans l'industrie est celui du Fe-C

- **Les aciers** % C [0,008 et 2.1]
- Aciers **hypo-eutectoïdes** constitués de ferrite et de perlite
- Aciers **hyper-eutectoïdes** constitués de cémentite et perlite.



• **Les fontes** % C [2,11 et 6,67]

Figure: Diagramme de phases Fer-Carbonate

Diagramme des phases Fe-C

Ferrite (Fe- α)

- Soft, ductile, magnetic.
- BCC
- Solid solution (0.022% carbon) almost pure iron.

Austenite (Fe- γ)

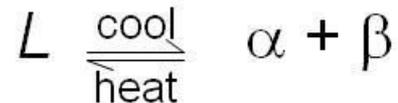
- (α -iron)
- Soft, ductile, magnetic.
- BCC
- Solid solution (0.022% carbon) almost pure iron.

Cementite (carbures de Fe)

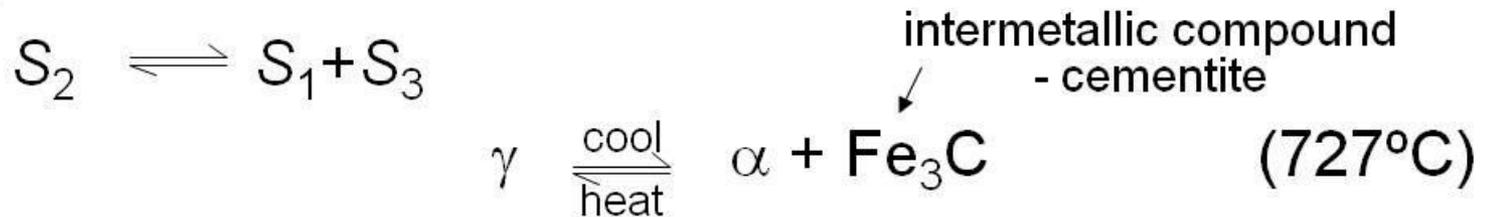
- Iron carbide (Fe₃C) 6.67% carbon
- Hard & brittle Intermetallic Compound.

Eutectoid & Peritectic

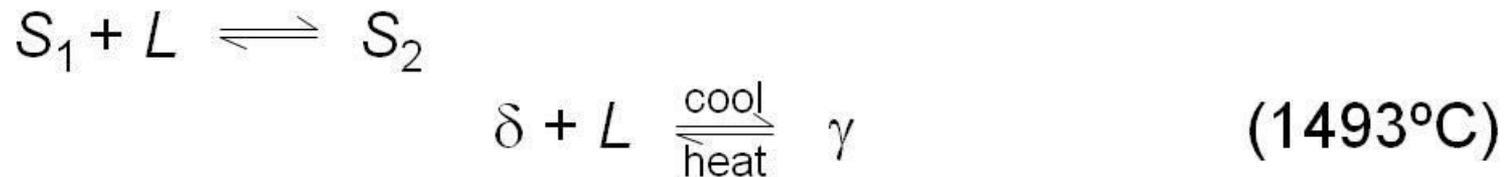
- **Eutectic** - liquid in equilibrium with two solids



- **Eutectoid** - solid phase in equilibrium with two solid phases



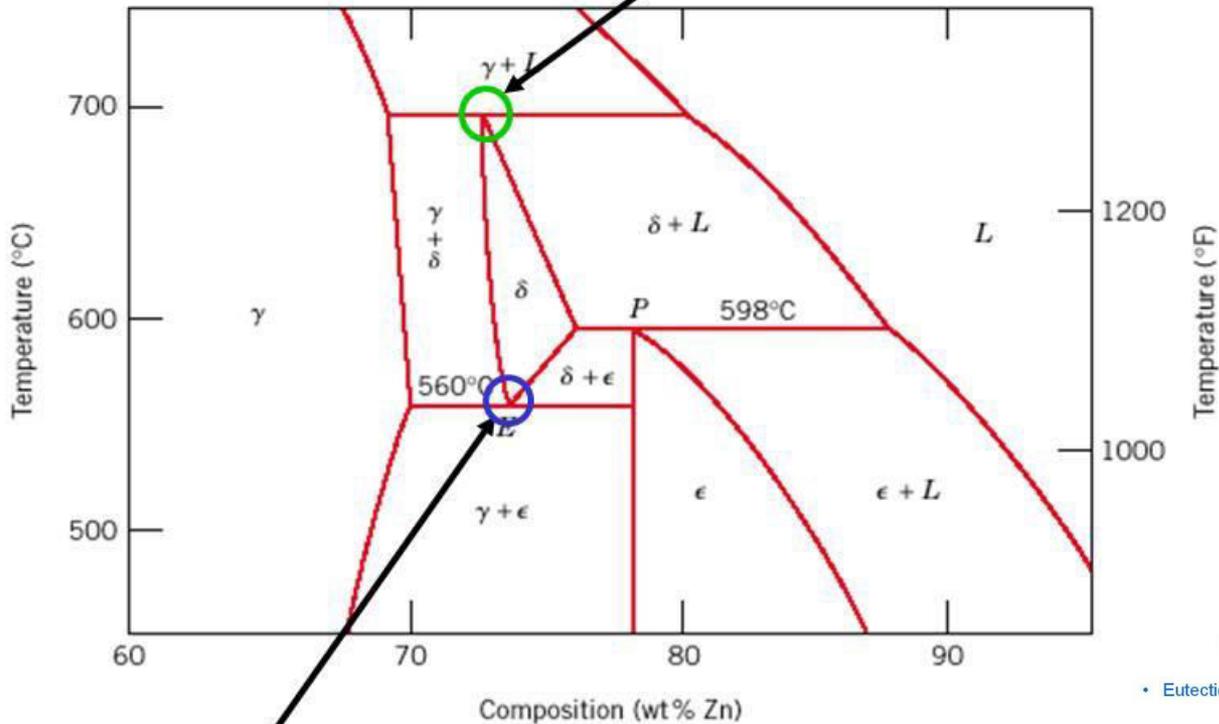
- **Peritectic** - liquid + solid 1 \rightarrow solid 2



Eutectoid & Peritectic

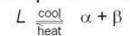
Cu-Zn Phase diagram

Peritectic transition $\gamma + L \rightleftharpoons \delta$



Eutectoid & Peritectic

- Eutectic - liquid in equilibrium with two solids



- Eutectoid - solid phase in equation with two solid phases



- Peritectic - liquid + solid 1 \rightarrow solid 2



Eutectoid transition $\delta \rightleftharpoons \gamma + \epsilon$

Les ACIERS

L'acier est un alliage à base de fer additionné d'un faible pourcentage de carbone (de 0,008 à environ 2,14 % en masse).

La teneur en carbone a une influence considérable (et assez complexe) sur les propriétés de l'acier:

- en deçà de 0,008 %, l'alliage est plutôt malléable et on parle de " fer " ;
- au-delà de 2,14 %, les inclusions de carbone sous forme graphite fragilisent la microstructure et on parle de fonte.

Entre ces deux valeurs, l'augmentation de la teneur en carbone a tendance à améliorer la résistance mécanique et la dureté de l'alliage.

On modifie également les propriétés des aciers en ajoutant d'autres éléments, principalement métalliques (éléments d'addition), et on parle d'aciers alliés. De plus, on peut encore améliorer grandement leurs caractéristiques par des traitements thermiques (notamment les trempes); on parle alors d'aciers traités.

Outre ces diverses potentialités, et comparativement aux autres alliages métalliques, l'intérêt majeur des aciers réside d'une part dans le cumul de valeurs élevées dans les propriétés mécaniques fondamentales: module d'élasticité, limite élastique, résistance mécanique, dureté; résistance aux chocs (résilience).

Les aciers

▷ Maximum : 1,8% de carbone

Avantages

- ▷ Métal ductile
- ▷ Peut subir des changements de forme à froid et à chaud
- ▷ Il prend la trempe

Inconvénient majeur

- ▷ Il est sensible à la corrosion



Les aciers d'usage général

- ▷ $\sigma_m \leq 500 \text{ MPa}$
- ▷ $\sigma_{el} \leq 350 \text{ MPa}$
- ▷ $A\% \square 25\%$

▷ Faible teneur en carbone $< 0,2\%$



- ⇒ Produits longs
- ⇒ Produits plats



Les aciers à faible teneur de carbone (%C < 0.25%)

- Ces aciers sont produits en grande quantité et à moindre coût et se caractérisent par une grande ductilité et une grande ténacité mais une faible résistance.
- Ils sont généralement renforcés par écrouissage (amélioration de la résistance et de la dureté par déformation plastique). Leur résistance à la traction se situe entre 415 et 550 MPa et leur allongement à la rupture peut atteindre 25 %. Par ailleurs, ils peuvent être facilement usinés et soudés.
- On les trouve dans diverses applications (**éléments de construction** tels que les **poutres**, les **profilés**, les **cornières**, **carrosserie de voitures**, **boîtes de conserve**,).

les aciers à moyenne teneur de carbone (0.25% à 0.6% de C)

- Ces aciers offrent de meilleures combinaisons résistance-ductilité lorsqu'ils sont traités thermiquement (austénisation, tempe, revenu et recuit). L'apport d'éléments d'addition tels que le chrome, le nickel et le molybdène facilitent ces traitements.
- Ces aciers sont utilisés dans la fabrication de **vilebrequins**, d'**engrenages**, de **roues** et **voies ferrés** et autres pièces de structures qui nécessitent de grandes résistances et ductilité.
- L'austénisation consiste à chauffer au cours de l'élaboration l'alliage à une température comprise entre 750 et 900°C pour obtenir la structure austénite CFC (ou fer gamma).

Les aciers à forte teneur de carbone (0.6% à 1.4% de C)

- Ils sont caractérisés par une grande dureté, une grande résistance et une faible ductilité.
- Etant résistant à l'usure, ils sont, utilisés dans la fabrication **d'outils de coupe**, des **lames de scies** et de **matrices**. On associe souvent à ces aciers des éléments d'addition tels que le chrome, le vanadium et le tungstène afin d'obtenir des composés de carbures pour améliorer leur dureté. (**Carrosserie d'une voiture, Toiture d'un stade, Grillage métallique..**)

Les aciers inoxydables (12-30 % de Cr)

- Les aciers inoxydables, ou « inox », sont des aciers à haute teneur en chrome (supérieure à 10 %) ; le chrome s'oxyde (Cr_2O_3) et forme une couche passive, protectrice. Ce sont donc des aciers fortement alliés.
 - Les inox doivent se travailler à froid. En effet, l'oxydation augmente avec la température, il se forme donc une couche d'oxyde de chrome d'épaisseur importante qui d'une part est inesthétique, et qui d'autre part consomme le chrome proche de la surface. Si cette couche se dégrade, l'acier superficiel ne contient plus de chrome et ne peut pas se repassiver, il rouille. Pour éviter ce phénomène:
 - La soudure se fait sous atmosphère protectrice (en général argon).
 - Le formage se fait à froid, donc pour des tôles d'une épaisseur de 3 mm et plus.
- (Produits à base d'acier inoxydable: **outils de cuisine, montre..**)

Composition/Nomination des aciers inox

Compositions of AISI-SAE Standard Stainless Steels

AISI Type (UNS)	Typical Composition (%)								
	Cr	Ni	C	Mn	Si	P	S	Mo	N
316 (S31600) Austenitic	16–18	10–14	0.08	2.0	0.75	0.045	0.030	2.0–3.0	0.10
302 (S30200) Austenitic	17–19	8–10	0.15	2.0	0.75	0.045	0.030	---	0.10
316L (S31603) Austenitic	16–18	10–14	0.03	2.0	0.75	0.045	0.030	2.0–3.0	0.10
303 (S30300) Austenitic	17–19	8–10	0.15	2.0	1.0	0.20	0.015 min	0.60 optional	---
304 (S30400) Austenitic	18–20	8–10.50	0.08	2.0	0.75	0.045	0.030	---	0.10
304L (S30403) Austenitic	18–20	8–12	0.03	2.0	0.75	0.045	0.030	---	0.10
321 (S32100) Austenitic	17–19	9–12	0.08	2.0	0.75	0.045	0.030 [Ti, 5(C + N) min, 0.70 max]	---	0.10 max
430 (S43000) Ferritic	16–18	0.75 Ni	0.12	1.0	1.0	0.040	0.030	---	---
416 (S41600) Martensitic	12–14		0.15	1.25	1.0	0.060	0.15min	0.060 optional	---

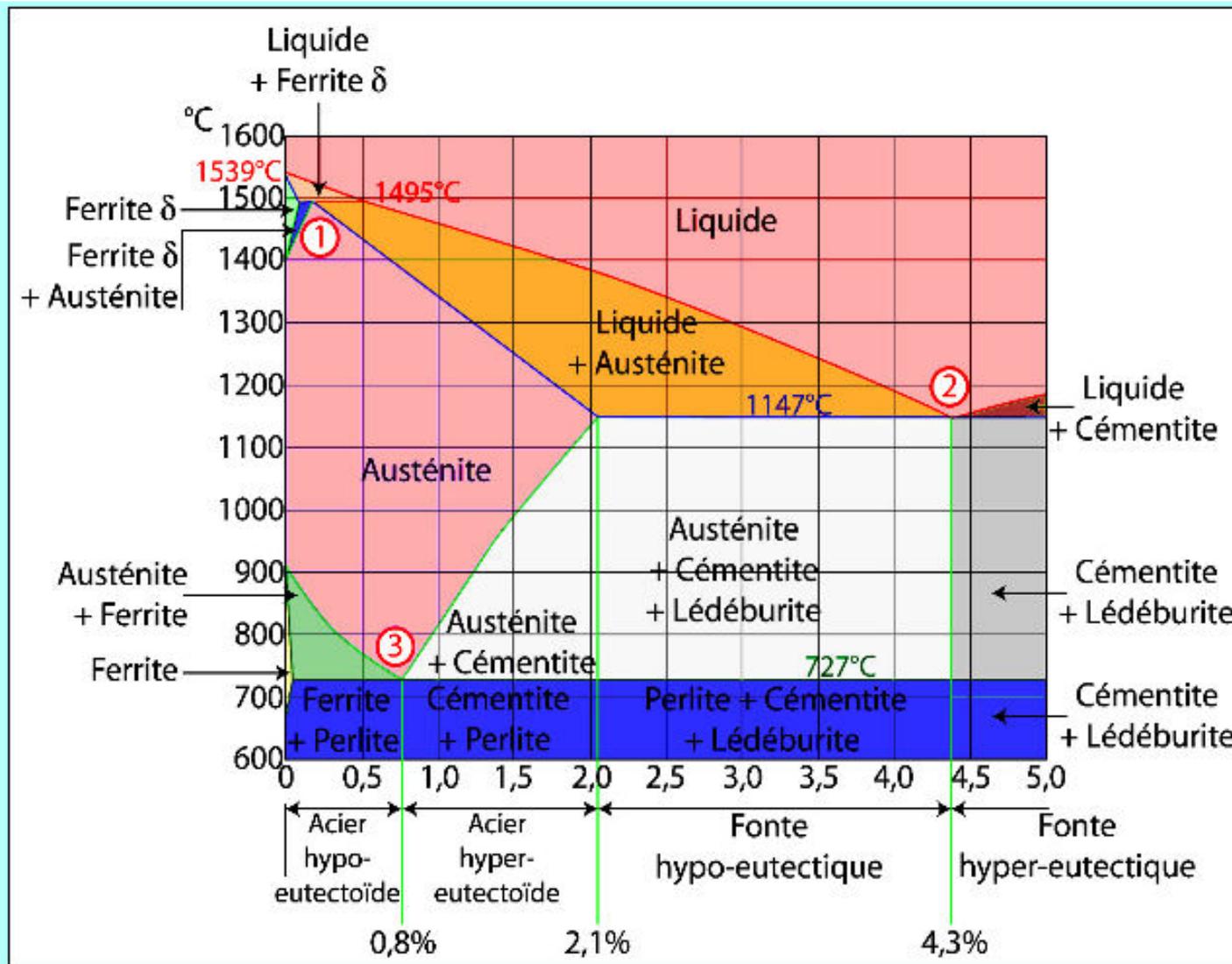


Figure: Diagramme de phases Fer-Carbonate

Éléments d'addition à l'acier pour changer certaines propriétés!

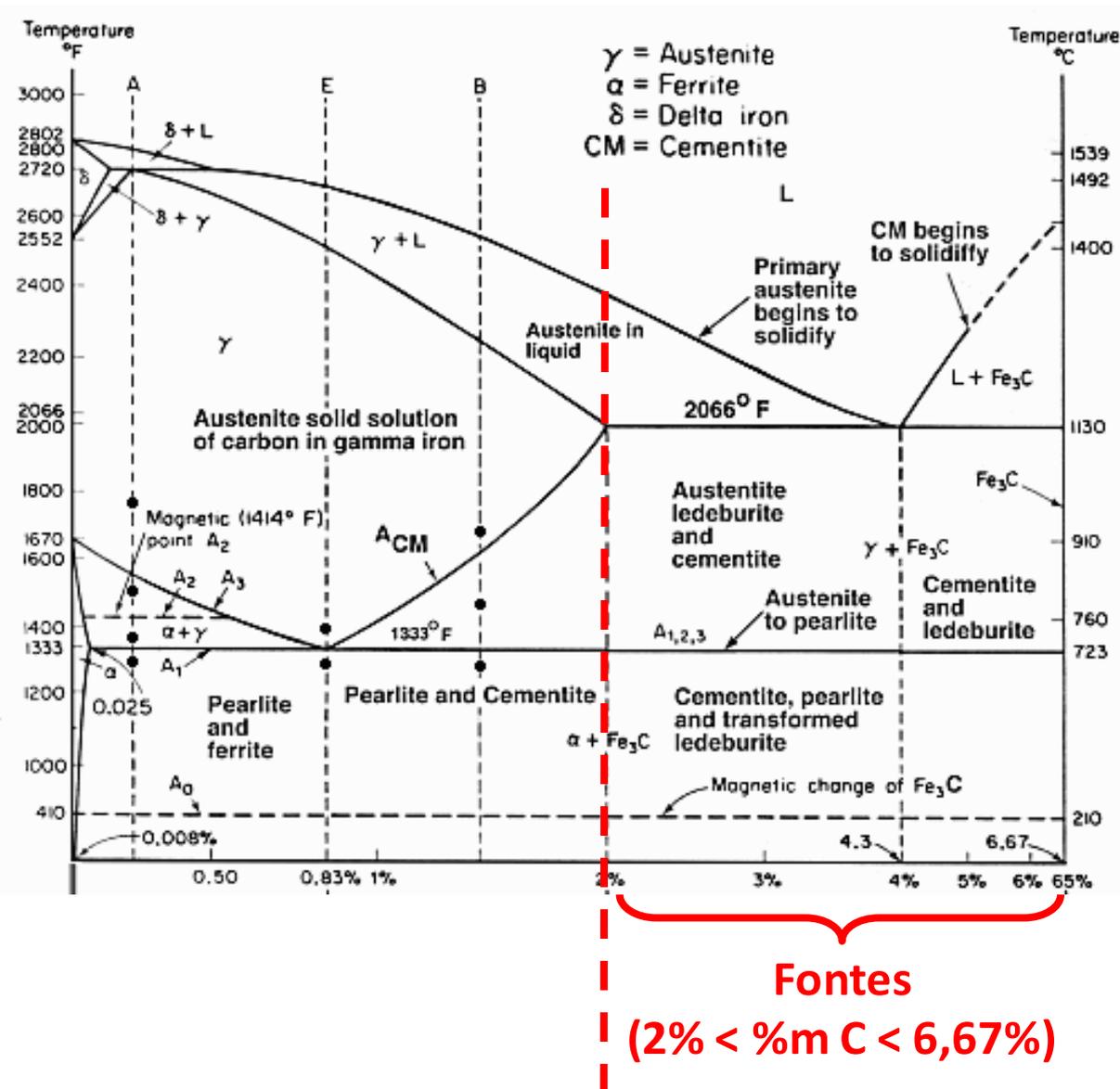
TABLE 6-3 Principal Effects of Major Alloying Elements in Steel

Element	Percentage	Primary Function
Aluminum	0.95–1.30	Alloying element in nitriding steels
Bismuth	—	Improves machinability
Boron	0.001–0.003	Powerful hardenability agent
Chromium	0.5–2	Increase of hardenability
	4–18	Corrosion resistance
Copper	0.1–0.4	Corrosion resistance
Lead	—	Improved machinability
Manganese	0.25–0.40	Combines with sulfur to prevent brittleness
	>1	Increases hardenability by lowering transformation points and causing transformations to be sluggish
Molybdenum	0.2–5	Stable carbides; inhibits grain growth
Nickel	2–5	Toughener
	12–20	Corrosion resistance
Silicon	0.2–0.7	Increases strength
	2	Spring steels
	Higher percentages	Improves magnetic properties
Sulfur	0.08–0.15	Free-machining properties
Titanium	—	Fixes carbon in inert particles
		Reduces martensitic hardness in chromium steels
Tungsten	—	Hardness at high temperatures
Vanadium	0.15	Stable carbides; increases strength while retaining ductility,
		Promotes fine grain structure

Les fentes



Diagramme Fer-Carbone : Fontes



Définitions :

Les fontes sont des alliages dont la teneur en carbone est supérieure à 2% en masse

Les fontes subissent toujours la transformation eutectique (vers 1140°C)

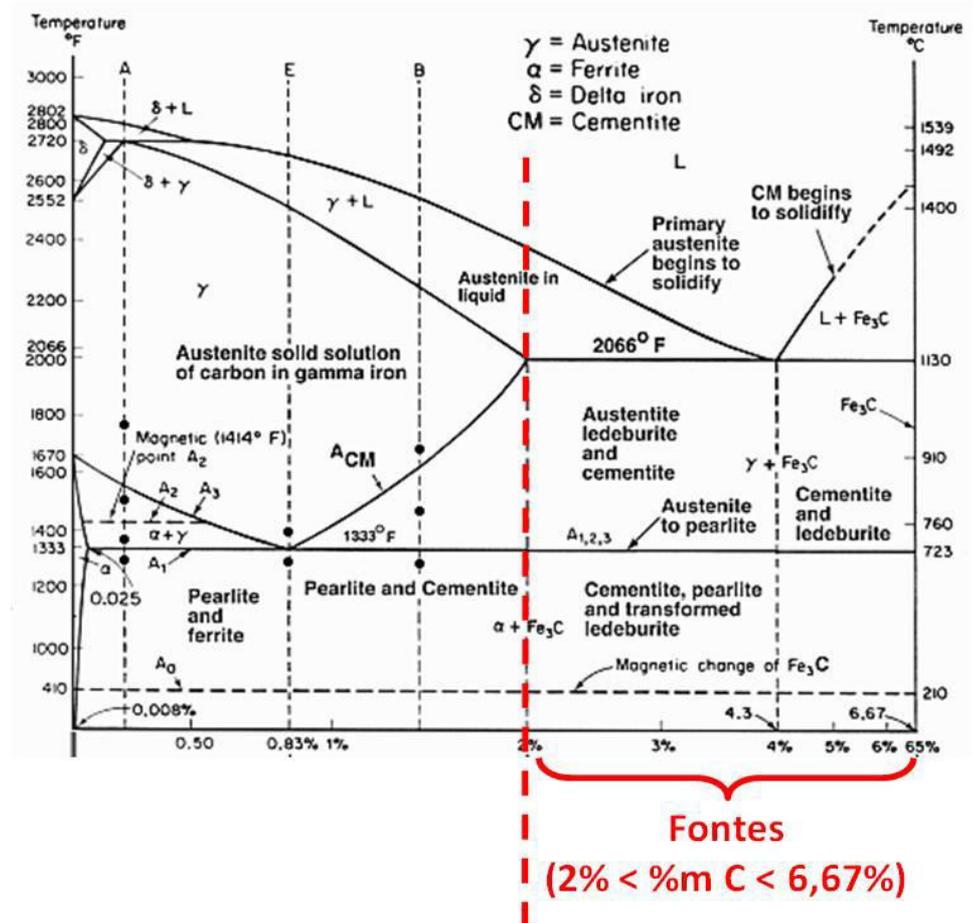
Fontes blanches :

carbone se retrouve toujours sous forme de cémentite

Fontes grises :

carbone se retrouve sous forme de graphite libre (carbone pur) et de cémentite

Diagramme Fer-Carbone : Fontes



➤ Lors du refroidissement :

passage du palier eutectique (1153°C)

solidification de l'eutectique (4,25 % C)

mélange biphasé

52 % de γ + 48 % de Fe₃C mélange dit « lédéburite » (diagramme métastable fer-cémentite)

98 % de γ + 2 % de carbone pur sous forme de graphite (diagramme stable fer-graphite)

Introduction : les fontes

- La dénomination de fontes concerne un grand nombre d'alliages de fer dont les microstructures et les propriétés physiques sont très diverses.
- La teneur en carbone est supérieure à 2%
- Lors du refroidissement :

passage du palier eutectique (1153°C)

solidification de l'eutectique (4,25 % C)

mélange biphasé

52 % de γ + 48 % de Fe_3C mélange dit « lédéburite » (diagramme métastable fer-cémentite)

98 % de γ + 2 % de carbone pur sous forme de graphite (diagramme stable fer-graphite)

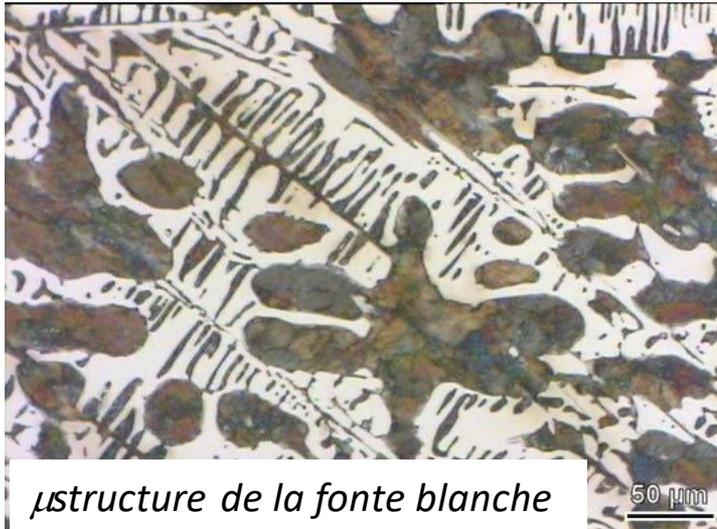
- ⇒ Réglée par v de refroidissement et par la présence d'éléments d'addition
- « graphitisants » (Si)
 - ou « antigrahitisants » (Mn)

Introduction : les fontes

➤ Au passage du palier eutectoïde (0,8 % C, 723°C), toute l'austénite γ tend à se décomposer pour les deux cas en perlite

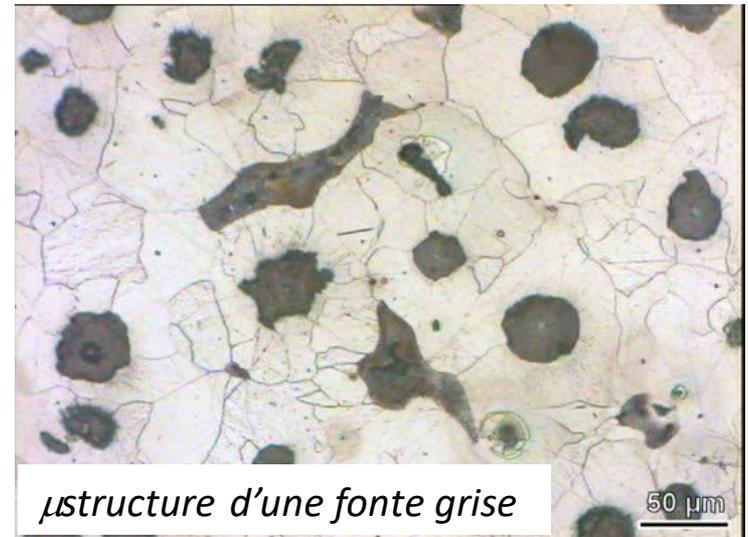
➤ Refroidissement rapidement

La totalité du carbone peut se combiner au fer pour former : la *cémentite* et les *fontes blanches*



➤ Refroidissement lent

La cémentite (composé métastable) se décompose en graphite et ferrite avec une teneur en carbone élevée et des éléments d'addition graphitisants, toutes les conditions sont réunies pour la formation de *fontes grises*



Les différents types de fontes



Les différents types de fontes : fontes blanches

➤ Fontes blanches (à cémentite)

- Pas de graphite
- Souvent un peu de Mn

➤ A gauche de la composition eutectique :



Fonte blanche hypoeutectique



A l'équilibre et à T ambiante :

- Matrice cémentite et
- Blocs de perlite (décomp. phase γ à 723°C)

➤ A droite de la composition eutectique :



Fonte blanche hypereutectique



A T ambiante :

- Plaquettes de cémentite primaire (formées au-dessus de 1153°C)
- Entourées de cémentite secondaire (formée entre 1153 et 723°C) et de perlite

METALLURGIE

La métallurgie est la technologie de fabrication de la fonte et de l'acier. Le processus de fabrication de l'acier passe par les étapes principales suivantes: Ces différentes étapes sont illustrées schématiquement et décrits ci-dessous.

Fabrication de l'acier:

a- Préparation des Matières premières:

Minerai de fer (concassage + broyage) + ferraille + coke + chaux

b- Chargement dans le haut fourneau:

Combinaison de fer et de carbone, production de la fonte

c- Convertisseur à l'oxygène:

Élimination des excès de C, Si, S, P,... Transformation fonte → acier liquide

d- Affinage de l'acier:

Ajustement de la composition chimique

Coulée continue et laminage: Réalisation de produits semi-finis sous forme de plaques et tôles

Processus technologique

1. Matières premières

a) minerai de fer : Sous la forme de minerai, le fer est un des métaux le plus abondant de la croûte terrestre. Cette roche est composée de nombreux éléments dont l'oxyde de fer et divers minéraux appelés gangue. La richesse du minerai tient à sa teneur plus ou moins élevée en fer. Un minerai riche contient jusqu'à 65 % de fer.

b) Ferraille: Elle provient des récupérations de l'industrie sidérurgique elle-même, des industries de transformation et de recyclage des déchets ferreux. La ferraille constitue une matière première qui nécessite moins de transformation dans la mesure où c'est déjà de l'acier. Fondue dans des fours électriques, cette matière première possède une composition particulière due au fait de son utilisation antérieure. La filière ferraille est plus économique en matière d'équipements lourds (chaîne d'agglomération, cokerie, etc.) et en matière d'énergie nécessaire à la fusion. En revanche sa capacité de production est moins élevée que celle d'une aciérie à l'oxygène (minerai).

Au minerai de fer, on rajoute en général du coke et les éléments d'addition :

a) Coke: De façon simplifiée, le coke est du carbone presque pur doté d'une structure poreuse et résistante à l'écrasement. Il est utilisé comme un puissant réducteur après avoir été libéré des composants indésirables de la houille. En brûlant dans le haut-fourneau, le coke apporte la chaleur nécessaire à la fusion du minerai et le carbone nécessaire à sa réduction.

b) Éléments d'addition (Ni, Cr, Mo, Ti, W,...) : ce sont les éléments chimiques (métaux) ajoutés dans la masse de l'acier dans le but d'améliorer certaines propriétés physiques ou chimiques. Par exemple, on ajoute le chrome Cr et le nickel Ni pour rendre l'acier inoxydable, du Titane Ti et du tungstène W pour former des carbures et durcir l'acier,...

2. Equipements et processus

a- Haut fourneau:

Le haut-fourneau est un appareil de grandes dimensions, garni intérieurement d'un revêtement réfractaire, dans lequel le minerai est chauffé à des températures élevées.

Les matières premières préparées sont chargées par le haut (gueulard) dans le haut-fourneau. Le coke apporte la chaleur nécessaire à la fusion du minerai et élimine l'oxygène contenu dans la matière en produisant des oxydes de carbone. Le fer pur libéré se combine au carbone du coke et produit de la fonte en se dégageant des autres constituants qui sont des impuretés (phosphore, soufre, silicium, manganèse, etc.).

b- Convertisseur à l'Oxygène:

La conversion de la fonte en acier liquide est réalisée dans un convertisseur à oxygène. De l'oxygène est insufflé dans le bain de fonte liquide et permet d'éliminer par combustion des éléments indésirables (carbone, silicium, soufre, phosphore, etc.) qui se fixent à la chaux présente dans la fonte pour former des scories. Ces sous-produits de la fabrication de l'acier trouveront divers usages. La combustion provoque une élévation de la température de 1250°C (fonte liquide) à 1600°C et transforme la fonte en acier.

c- Station d'affinage:

La station d'affinage permet de réaliser la "mise à nuance" de l'acier. Ainsi sont définis la composition chimique et les critères attachés à l'utilisation de l'acier.

Cette opération consiste à décarburer, c'est-à-dire à diminuer et à ajuster la teneur en carbone pour en faire de l'acier. A ce stade de la fabrication, des additions éventuelles de produits complémentaires permettront d'améliorer les caractéristiques techniques de l'acier dans la masse. Il sera recherché, selon les besoins, une résistance plus élevée du produit aux efforts mécaniques, à la corrosion, aux effets de température, etc. Dans les filières fonte (minerai) et électrique (ferraille), la composition chimique de l'acier liquide est ajustée par addition d'éléments d'alliage au millième près pour constituer les taux requis (nickel, chrome, tungstène, etc.). Par ailleurs, divers traitements ont lieu pour améliorer la pureté et la qualité du métal (dégazage pour éliminer l'azote ou l'hydrogène, homogénéisation chimique, etc.). Dans le cas de la filière électrique, si l'acier fondu possède déjà une composition particulière du fait qu'il a servi, on peut avoir à rectifier sa composition pour une nouvelle utilisation, différente de la précédente.

d- Coulée continue et laminage à chaud:

L'acier liquide, mis à nuance et débarrassé de la scorie, est transféré à travers des lingotières vers la machine de coulée continue. Celle-ci est une sorte de d'échangeur thermique permettant de solidifier l'acier liquide sous forme de brames. Ces ébauches d'aciers sont ensuite transformées après réchauffage en bande de plaques ou tôles par laminage à chaud. Ces produits semi-finis peuvent subir d'autres opérations de mise en forme pour obtenir des produits finis.

b) Les métaux non ferreux

b-1) L'aluminium et ses alliages

L'aluminium et ses alliages corroyés sont des produits laminés, forgés ou filés.

L'aluminium et ses alliages de fonderie, présenté sous forme de lingot pour refusion est destiné à des applications générales.

b-2) Le cuivre et ses alliages

La désignation des alliages de cuivre comporte le symbole du cuivre suivi des éléments d'addition avec leur teneur, placés dans l'ordre décroissant.

Les bronzes sont des alliages de cuivre et d'étain. En raison de leur excellente aptitude au moulage, les bronzes sont beaucoup utilisés comme alliages de fonderie. Ils possèdent en outre une excellente résistance à la corrosion et un faible facteur de frottement, leur assurant une grande résistance à l'usure et des caractéristiques mécaniques élevées.

Les laitons sont des alliages de cuivre et de zinc. Ils possèdent une bonne aptitude à l'usinage.

Les cupro-aluminiums (ou bronze d'aluminium) sont des alliages de cuivre et d'aluminium. Leurs caractéristiques mécaniques sont supérieures à celles du laiton alliées à une bonne résistance aux différentes formes de corrosion chimique et en particulier à la corrosion marine.

Les cupro-nickels sont des alliages de cuivre et de nickel. Ils sont très malléables. Le nickel améliore les propriétés mécaniques, la résistance à la corrosion et la résistance électrique.

Les maillechorts sont des alliages de cuivre, de zinc et de nickel. Leurs propriétés générales sont intermédiaires entre celles des laitons et celles des cupro-nickels. De plus, ils sont très inaltérables et ont une bonne tenue dimensionnelle.

b-3)Le titane et ses alliages

Ils sont obtenus à partir des minerais contenant des oxydes. Les deux principaux minerais sont le rutile et l'ilménite.

Le titane pur est un métal blanc et brillant à structure cristalline hexagonale. Il possède une tenue à la corrosion exceptionnelle dans de nombreux milieux tels que l'eau de mer ou l'organisme humain.

L'Aluminium

➤ Points fort de l'Aluminium

- Seconde famille en tonnage (production mondiale d'aluminium primaire)
- L'aluminium et ses alliages ont plusieurs atouts dont les deux plus importants sont :
 - leur légèreté (densité 2,7)
 - leur résistance à la corrosion, (due à la passivation sous très faible épaisseur, quelques nanomètres, de l'alumine (Al_2O_3))

Légèreté

Comparaison propriétés mécaniques avec les aciers (en raisonnant à densité r équivalente)

:

- Module d'élasticité relatif $E/r = 26$ pour l'aluminium et l'acier
- Limite élastique relative $Re / r = 25$ à 600 pour l'aluminium et 200 à 1600 pour les aciers

Le module d'élasticité de l'aluminium est $E =$ environ 70 GPa

Résistance à la corrosion

- Très faible corrosion \Rightarrow recyclage du métal usagé à très faible coût
- Récupération et Recyclage \Rightarrow en France 70% du gisement potentiel
- Non toxique \Rightarrow utilisé comme emballage alimentaire
- Coût de l'aluminium \sim des aciers inox (dû à son élaboration)
 - consiste à réduire l'oxyde Al_2O_3 issu du minerai de bauxite (très stable)
 - \Rightarrow forte dépense énergétique (13 kWh pour 1 kg)

L'Aluminium

➤ Points fort de l'Aluminium

Résistivité électrique

- Excellente (environ $3 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}$)

⇒ câble d'Al (renforcé ou non par de l'acier) a détrôné le Cu pour le transport d'énergie

Conductivité thermique ($210 \text{ W/m} \cdot \text{K}$)

- 4 fois plus élevée que celle de l'acier laminé, et égale à 60 % de celle du Cu

- 3 fois plus dense ⇒ sa place dans les échangeurs thermiques

Pouvoir réflecteur

- Elevé à la lumière (96 % pour Al pur et poli, 75 % pour une tôle courante)

- Peut être coloré en cours d'anodisation

⇒ avantage dans le bâtiment et les grandes structures

Alliages d' Aluminium

Aluminium et alliages à durcissement par écrouissage et solution solide

Groupe 1 (aluminium non allié).

Propriétés mécaniques faibles à l'état recuit; très bonne résistance à la corrosion; très bonne conductibilité thermique et électrique; soudables; très bonne tenue à basse température.

Groupe 3 (Al-Mn). Propriétés mécaniques améliorées grâce à des précipités de phase Al₆Mn; bonne aptitude à la mise en forme; bonne résistance à la corrosion; soudables.

Groupe 5 (Al-Mg). Propriétés mécaniques améliorées grâce à la mise en solution solide du magnésium; bonne aptitude à la mise en forme; excellente soudabilité; bonne résistance à la corrosion et aptitude à l'anodisation.

Alliages d'aluminium à durcissement structural

Groupe 2 (Al-Cu). Durcissement par précipitation contrôlée de phase

Al₂Cu; bonne résistance mécanique; bonne usinabilité; résistance à la corrosion médiocre; difficilement soudables.

Groupe 6 (Al-Mg, Si). Durcissement par précipitation contrôlée de

phase Mg₂Si; bonne aptitude à la mise en forme à chaud et à froid; bonne résistance à la corrosion; soudables.

Groupe 7 (Al-Zn). Avec addition de Mg, durcissement par précipitation

contrôlée de phase MgZn₂; très bonnes propriétés mécaniques; résistance à la corrosion et soudabilité moyennes.

Autres alliages d'aluminium

Groupe 4 (Al-Si). Essentiellement alliages de fonderie, voisins de la composition eutectique à 12,7 %Si, affinés par addition de sodium; propriétés mécaniques médiocres et faible ductilité, mais excellente coulabilité; bonne résistance à la corrosion.

Groupe 8. On y trouve notamment des alliages Al-Fe destinés à l'emballage ménager, des alliages Al-Sn à faible coefficient de frottement, des alliages Al-Li à masse volumique plus faible et module de Young plus élevé que les alliages classiques.

Les alliages d'aluminium

- ▷ Faible densité ;
- ▷ Bas point de fusion ;
- ▷ Très grande ductilité ;
- ▷ Résiste bien à la corrosion par passivation ;
- ▷ Tenue mécanique délicate au-delà de 150°C.





Nouveaux alliages d'aluminium

Plusieurs grands axes de recherche prédominent actuellement dans la mise au point de nouveaux alliages, le but étant :

- d'assurer le développement de l'aluminium
- de répondre aux exigences du marché des produits de haute technologie (domaine aérospatial en particulier)
- de supplanter les nouveaux matériaux concurrents

- Alliages aluminium-lithium
- Alliages d'aluminium obtenus par métallurgie des poudres et solidification rapide
- Matériaux composites à matrice Aluminium
- Alliages d'aluminium amorphes. Verres d'aluminium

Alliages de Cuivres

Cuivre électrolytique (ETP, Electrolytic Tough Pitch). Contient

de l'oxygène résiduel, haute conductivité thermique et électrique, fragile à chaud en présence d'hydrogène.

Cuivre désoxydé au phosphore. Contient des résidus de phosphore;

filable, emboutissable, soudable, mais moins bonne conductivité électrique.

Cuivre exempt d'oxygène (OFHC, Oxygen Free High Conductivity).

Désoxydé par refusion sous atmosphère réductrice, possède à la fois de bonnes propriétés mécaniques et électriques.

Cuivre à l'argent (0,08 %). T de recristallisation plus élevée, tenue au fluage améliorée.

Cuivre au cadmium (0,7 à 1 %). Propriétés mécaniques très augmentées

par rapport au Cu pur. Applications : fils et ressorts conducteurs

(Exemples : « bronzes téléphoniques » pour les lignes électriques : Cu – Cd 1 Sn 0,15 ou Cu – Cd 0,9 Sn 0,4).

Cuivre au tellure (0,3 à 0,7 %). Meilleures propriétés mécaniques,

et usinabilité améliorée; idem pour les cuivres au soufre, au sélénium, au plomb.

Cuivre au chrome (0,5 à 0,9 %). Alliage à durcissement structural,

conservant ses propriétés mécaniques jusqu'à 450 °C. Applications :

pièces électriques et mécaniques utilisées à chaud (électrodes de soudage, pièces de freinage, contacteurs de puissance).

Cuivre au beryllium (2 %). Alliage à durcissement structural, à

propriétés mécaniques très élevées conservées jusqu'à 300 °C. Nombreuses applications en électromécanique (variante Cu – Co 2,5 Be 0,5, à résistance mécanique plus faible, mais conductivité plus élevée).

Les alliages de cuivre



- ▷ Conductibilité électrique & thermique ;
- ▷ Malléabilité ;
- ▷ Qualités chimique & alimentaire ;
- ▷ Résistance à l'usure ;
- ▷ Sensibilité à la corrosion mais passivation ;
- ▷ Cher.



Alliages

Coussinets, roues dentées, ressorts...

Bronzes

Robinetterie, moulage, visserie

Laitons

Orfèvrerie, résistances électriques

Maillechorts

Cupro-aluminiums

Pièces de frottement



Alliages de magnésium

- Faible masse volumique, d'où résistance spécifique (Rm / ρ) élevée.
- Bonne conductibilité thermique.
- Capacité d'amortissement élevée.
- La meilleure usinabilité de tous les matériaux métalliques.
- Grande stabilité dimensionnelle.
- Très électro-négatifs, donc utilisables pour la protection cathodique, mais plus sensibles que les alliages d'aluminium (Al) à la corrosion en atmosphère humide ou marine.
- Sensibles au feu (inflammable à haute température).
- Principales applications : industries automobiles, aéronautiques et spatiales, équipements de manutention, pièces mécaniques à mouvement rapide (textile et imprimerie).

Alliages magnésium – aluminium (G-A3Z1, G-A6Z1, G-A8Z).

L'aluminium améliore la coulabilité, le zinc la ductilité; alliages de fonderie ou corroyables à chaud.

Alliages magnésium – zirconium. Le zirconium limite la taille de

grains (G-Z5Zr); d'autres éléments peuvent être ajoutés pour permettre un traitement de durcissement structural.

Alliages magnésium – manganèse (G-M2). Applications électrochimiques, comme la protection cathodique des aciers.

Principaux alliages de zinc

Ils doivent être élaborés avec du Zn très pur, car les impuretés (Pb, Cd, Sn, Fe) ont une influence désastreuse sur la ténacité et la résistance à la corrosion.

L'aluminium améliore leur coulabilité; le cuivre et le magnésium en faible teneur ont un rôle durcissant.

Ce sont souvent des alliages de fonderie à faible température de fusion et bonne coulabilité, permettant le moulage en coquilles métalliques.

Z-A4G (Zamak 3), Z-A4U1G (Zamak 5), Z-A8, Z-A27. Alliages de moulage en coquille.
Applications : corps de carburateurs, petites pièces mécaniques).

Z-A4U3 (Kayem). Bonne coulabilité, dureté et résistance à l'usure plus élevée que les Zamaks. Applications : matrices, poinçons et moules de plasturgie.

Z-A12U1G (ILZRO 12). Bonne coulabilité et taille de grains insensible à la vitesse de refroidissement, donc apte au moulage en sable. Applications : pièces prototypes ou petites séries.

Zn-A35U2,5 à 5 (Alzen 305, Main Metal). Utilisés dans les pièces de frottement.

Principaux alliages de nickel

- Pratiquement tous monophasés CFC, donc ductiles.
- Principales applications liées à leur résistance à la corrosion et à leur bonne tenue au fluage.

Ni-Cu35 (Monel), Ni-Cu35AlTi. Tubes de vapeur, échangeurs eau douce-eau de mer.

Ni-Cr20 (Nichrome). Bonne résistance mécanique à chaud et bonne tenue à l'oxydation, résistivité élevée (applications : résistances électriques).

Ni-Cr14Fe6 (Inconel 600), Ni-Cr19Co10Mo10 (René 41).

Alliages réfractaires ou « superalliages »; l'addition de fer ou molybdène augmente la tenue au fluage, bonne résistance à la corrosion (applications : aubes de turbines à gaz). À rapprocher des superalliages réfractaires à base

Fe : Z10NC32-21 (Incoloy 800), Z05NCD40-21-3 (Incoloy 825).

Ni-Mo28 (Hastelloy B), Ni-Mo16Cr15 (Hastelloy C).

Superalliages réfractaires à meilleure résistance à la corrosion en milieux sulfuriques ou chlorhydriques.

Alliages Fe-Ni, Fe-Ni36 (Invar). Propriétés particulières de dilatation thermique.

Ni-Cr14Ti6Fe4 (Nimocast +13). Alliage de moulage.

Nitinol, Ni50-Ti50. Alliages à mémoire de forme.

Mumétal Ni-Fe18Cu5Cr2. Alliage magnétique doux employé dans les circuits magnétiques.

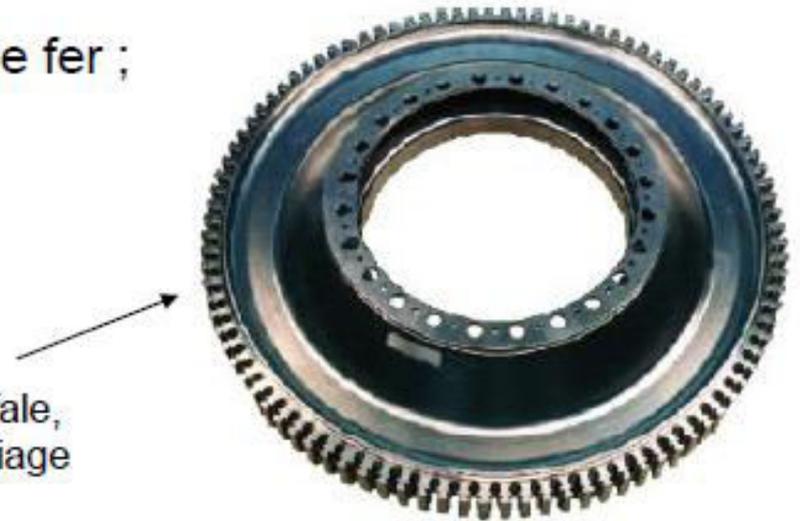
Les alliages réfractaires

Alliages employés à des températures de 700°C à 1000°C

- ▷ Alliages à base de nickel et de fer ;
- ▷ Alliages à base de nickel ;
- ▷ Alliages à base de cobalts.



Disque du moteur M88-2 de l'avion Rafale,
fabriqué à partir de poudres de superalliage
à base de Nickel



- ◆ résistances électriques chauffantes,
- ◆ soupapes d'échappement des moteurs à combustion interne,
- ◆ fours industriels et équipements de traitements thermiques, ...

COMPORTEMENT DES MATERIAUX

Il est très important de faire un bilan de santé du matériau
Depuis sa naissance, jusqu'à son extinction et même au delà

Univers	Famille	Classe	Sous-Classe	Membre	Caractéristiques
Matériau	Céramiques Verres Métaux Polymères Élastomères Composites	Aciers Alliages Cu Alliages Al Alliages Ti Alliages Ni Alliages Zn	1000	5005-0 5005-H4 5005-H6 5083-H2 5083-H4 5154-0 5154-H2	Densité Module Résistance Ténacité Conductivité Th. Dilatation Thermique Résistivité Coût Corrosion Oxydation
			2000 3000 4000 5000 6000 7000 8000		

Classification des matériaux et leur attributs (> 80 000 matériaux)

Les superalliages

Ce sont des alliages résistant mécaniquement et chimiquement à haute température. Ils sont à la base du développement des turboréacteurs utilisés en aéronautique.

Ils sont constitués par :

Principalement une matrice austénitique gamma dans laquelle Ni peut être substitué par Co, Cr, Mo, W, ainsi que par Nb, Al, Ti, Ta.

Des précipités intermétalliques ordonnés gamma : $\text{Ni}_3(\text{Ti,Al})$ ou gamma » : Ni_3Nb qui occupent de 30 à 70 % du volume et dont les dimensions varient entre 10 nm et quelques micromètres.

Des carbures primaires (de type MC) et secondaires (de type M_{23}C_6), précipités préférentiellement aux joints de grains.

Les superalliages

Ce sont des alliages résistant mécaniquement et chimiquement à haute température. Ils sont à la base du développement des turboréacteurs utilisés en aéronautique.

Composition Générale

Ni-BASED SUPERALLOYS :

Composition : 38-76% Ni, up to 27% Cr, up to 20% Co.

Example : Nimonic, Inconel, Waspalloy.

Inconel : 15% Cr % Fe - 2.5% Ti - 0.8% Al % Co

Nimonic: 20% Cr - 18% Co - 2.5% Ti - 1.5% Al % C

Waspalloy: 19.5% Cr % Co - 2% Fe % Mo - 1.3% Al - 3% Ti - 0.1% C

Fe-Ni-BASED SUPERALLOYS:

Composition : 32-67% Fe, 9-38% Ni, 15-22% Cr .

Example : Incoloy series

Co-BASED SUPERALLOYS:

Composition : 30-65% Co, 19-30% Cr, up to 35% Ni

Des métaux stratégiques indispensables à l'économie

Un téléphone portable : 60 éléments

Néodyme – Praséodyme- Terbium – Dysprosium (TR)	Aimant permanent (fer-néodyme-bore)
Indium - Gallium – Sélénium	Photovoltaïque couche mine CIGS (4nm)
Lanthane (TR)- Cérium (TR) – Platine- Palladium	Catalyseur – agent de polissage (cérium)
Titane	Résistance mécanique et thermique, mais coûteux, aéronautique
Cobalt	Résistance à l'usure – Disques durs
Molybdène	Résistance à la corrosion : aciers trains d'atterrissage des avions
Lithium cobalt	Batteries véhicules électriques lithium ion
Lanthane Cérium Praséodyme Néodyme (TR)	Batteries véhicules hybrides –nickel métal-hydrure
Antimoine	Retardant du feu (plastiques –matériaux composites) - Batteries au plomb
Platine, palladium, rhodium	Pots catalytiques
Indium	Ecrans plats
Europium, terbium, yttrium (TR)	Affichage vidéo couleur, ampoules basse consommation
Gadolinium	Médecine (produit de contraste pour l'IRM)
Néodyme, cérium, yttrium (TR)	Laser

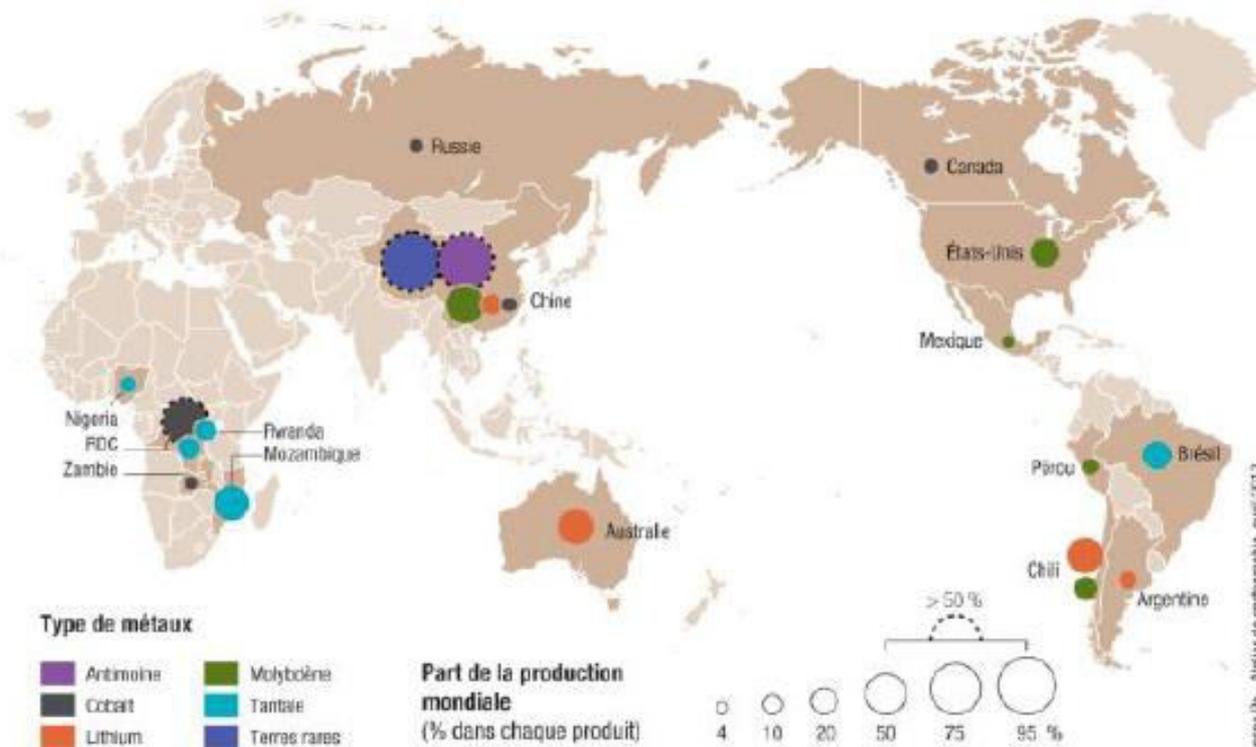
DES METAUX STRATEGIQUES

Une production extrêmement concentrée

(Marquée, dans un certain nombre de cas, par des restrictions à l'exportation)

Élément	Pourcentage production mondiale	Pays Producteur
Terres rares(excepté scandium)	97 %	CHINE
Magnésium	93 %	CHINE
Niobium	92 %	BRESIL
Antimoine	90 %	CHINE
Béryllium	88 %	ETAS-UNIS
Platine	77 %	AFRIQUE DU SUD
Tungstène, Bismuth	plus de 80 %	CHINE
Cobalt	plus de 50 %	Rep Demo CONGO

MÉTAUX CRITIQUES : PRINCIPAUX PRODUCTEURS MONDIAUX ET MONOPOLES, 2011

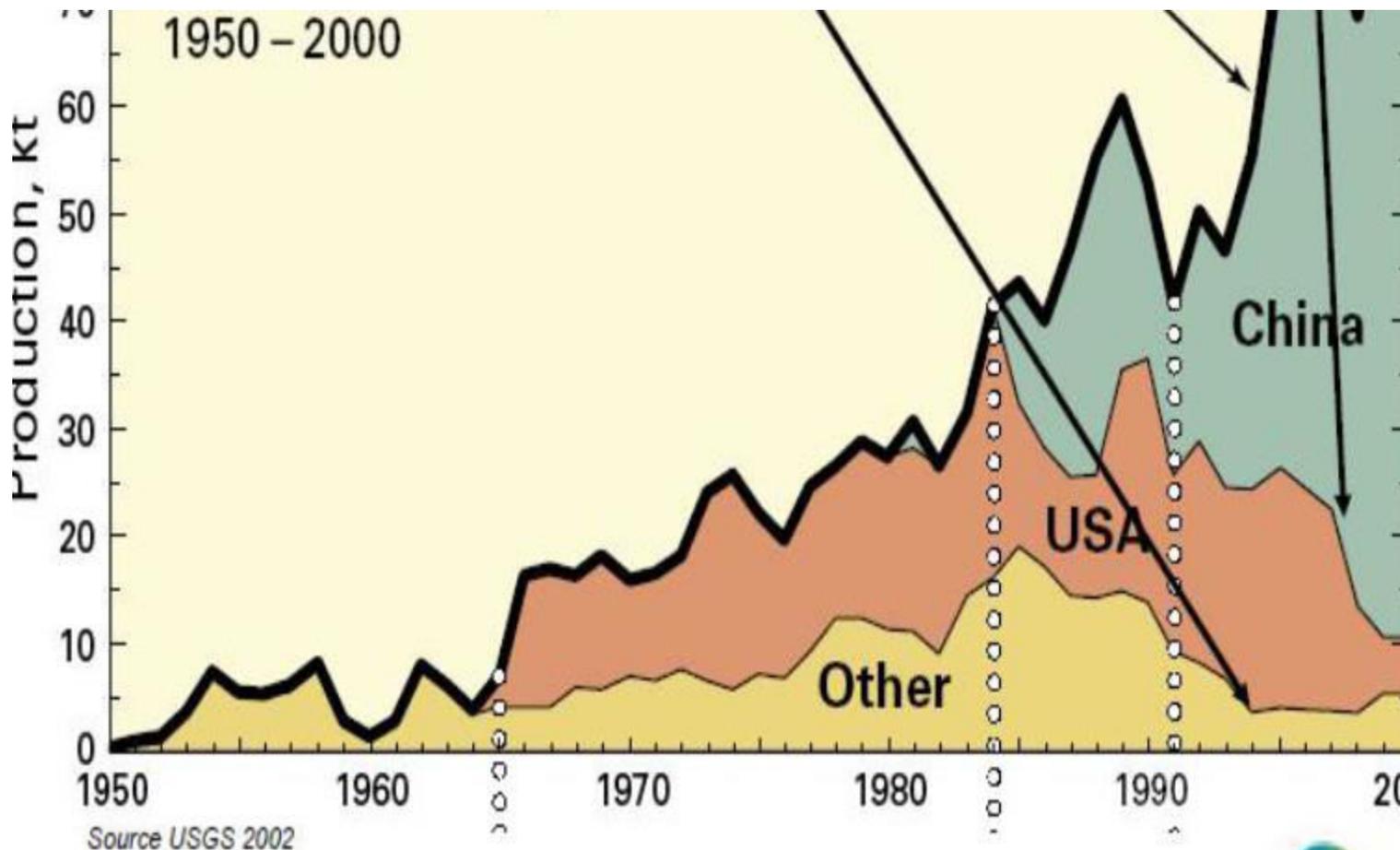


Source : U.S. Geological Survey, *Mineral commodity summaries 2013*, 188 p. <http://www.usgs.gov/pubprod>

© Sciences Po - Atelier de cartographie, avril 2013

CHINE : 96% production mondiale, 35% réserves

[Les terres rares sont à la Chine ce que le pétrole est au Moyen-Orient, Den Xiao Ping (1992)]

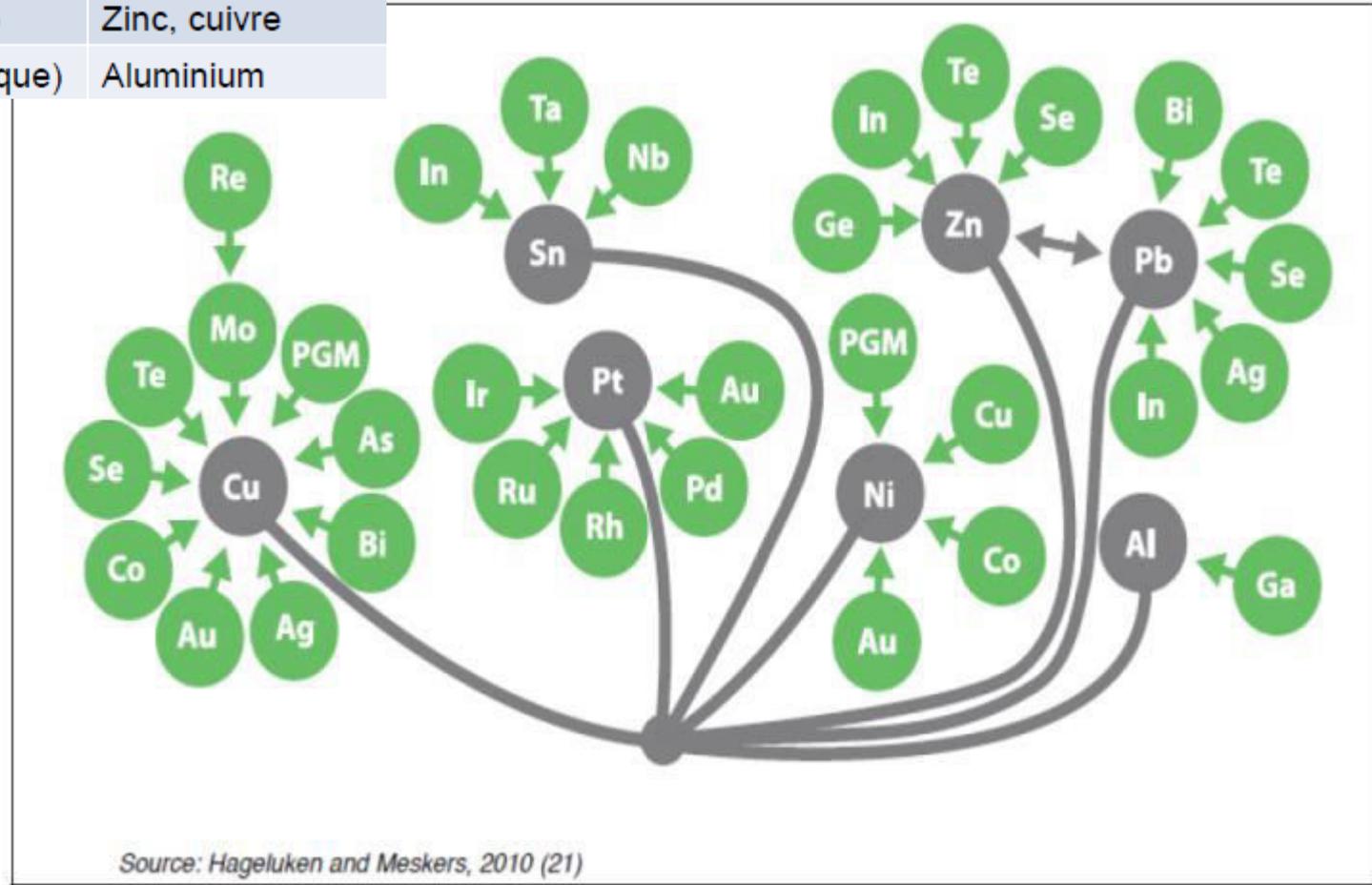


Les sous-produits :

une production variable qui dépend de celle du produit principal

Exemple:

Sous-produit	Produit associé
Indium (Ecrans tactiles)	Zinc, cuivre
Gallium (PV + électronique)	Aluminium



!!!RECYCLAGE!!!

• Les piles et accumulateurs: Pourquoi est-ce dangereux ?

Ce sont des rejets toxiques dans l'environnement
Métaux lourds (Hg, Pb, Cd, Zn, Ni),

-toxiques pour les organismes,
-cancérigènes,

-et source de troubles au niveau des systèmes reproducteur et neurologique.



Exemple 1: le mercure (Hg)

sa nocivité provient de sa volatilité (facilement respiré), de sa solubilité dans l'eau (pollution des eaux) et les graisses (accumulation dans les organismes vivants).

Il suffit d'1 g de mercure pour polluer 400 L d'eau !

-1 litre d'huile usagée peut recouvrir une surface de 1 000 m² d'eau.

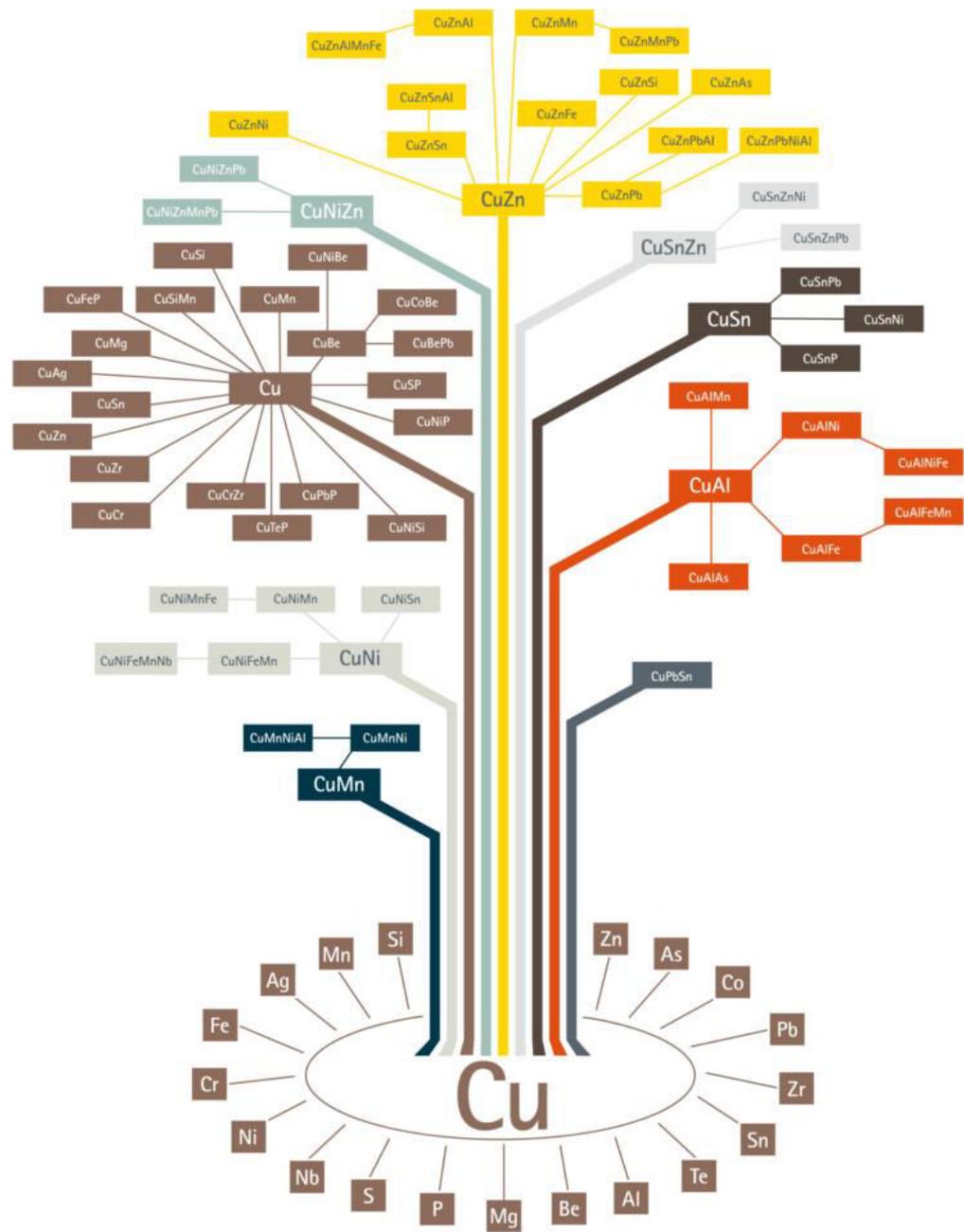
• Les batteries de véhicules:

Exemple 21: le Plomb (Pb)

Le plomb n'est pas éliminé par l'organisme,
Il est stocké dans le système nerveux, le sang, les reins.



FIN



Caractéristiques fondamentales des matériaux

♦ Métaux

Opaques, solides, denses, très bons conducteurs de chaleur et d'électricité. Grande plasticité qui permet de les déformer.



♦ Polymères

Peu denses, isolants thermiques et électriques. Facile à mettre en forme à température ambiante. Faibles propriétés mécaniques. Supportent mal la chaleur.



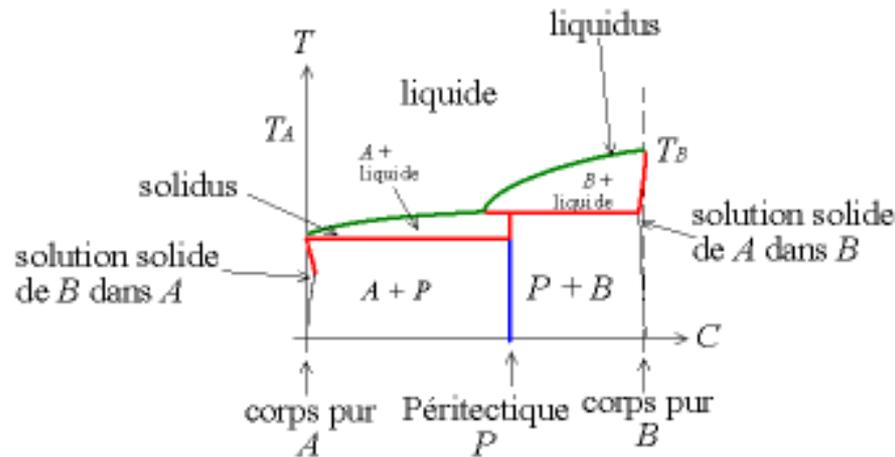
♦ Céramiques

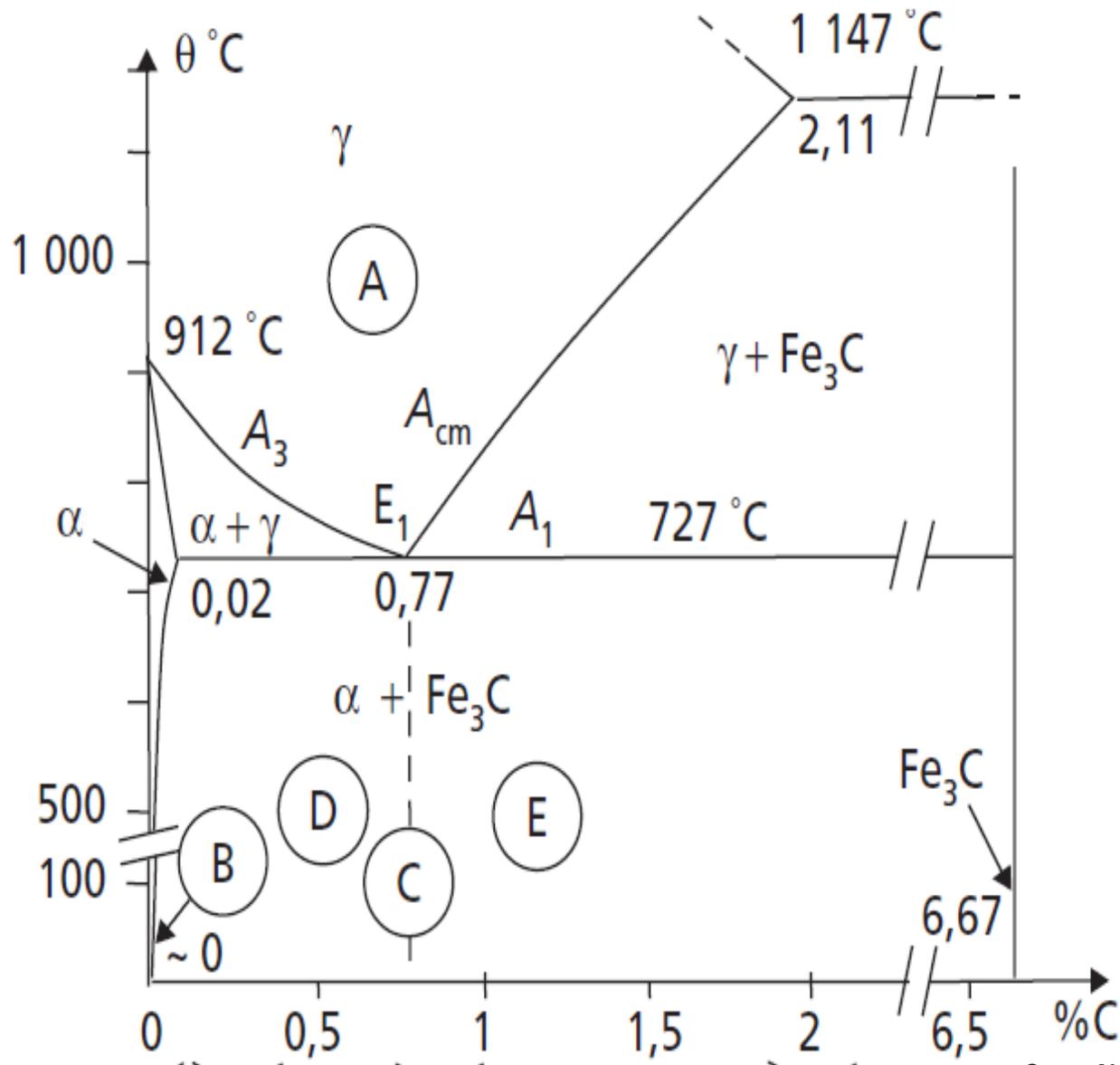
Grande rigidité, résistance thermique élevée et une forte inertie chimique. Isolantes, très dures, mais fragiles et difficiles à former



Lecture d'un diagramme de phase

- Un **eutectique** (qui fond aisément) est un mélange de deux ou plusieurs corps purs qui fond et se solidifie à température constante de manière uniforme, contrairement aux mélanges habituels où le changement de température conduit à une variation de la proportion de solide par rapport à celle de liquide. Il se comporte en fait comme un corps pur du point de vue de la fusion.
- Une transformation **eutectoïde** est une transformation de phase solide en phase solide qui se déroule à température constante.
- Un **péritectique** est un mélange de deux corps purs dans des proportions définies, et qui fond de manière particulière : il se décompose en un liquide et en un solide, le nouveau solide étant d'une phase différente de celle du péritectique: $\text{liquide} + A_{\text{solide}} \rightarrow P_{\text{solide}}$





A	<p>Austénite Solution solide cfc de carbone dans le fer γ. Ductile. Stable uniquement au-dessus de la ligne A_1 dans les aciers non alliés.</p>	
B	<p>Ferrite Solution solide cc de carbone dans le fer α. Ductile et peu dure ($R_p = 300$ MPa, HV = 80, A = 50 %).</p>	
C	<p>Perlite Mélange eutectoïde d'environ 88 % de ferrite et 12 % de cémentite sous forme de fines lamelles alternées ($R_p = 800$ MPa, HV = 200, A = 10 %).</p>	
	<p>Cémentite Composé défini Fe_3C. Carbure de fer à structure cristalline orthorhombique. Très dur et fragile (HV = 700, A = 0 %).</p>	
D	<p>Ferrite + perlite Mélange caractéristique des aciers hypoeutectoïdes. Proportions variables selon la teneur en carbone. Les grains de ferrite germent le long des joints de grains de l'austénite au refroidissement à la traversée du domaine $\alpha + \gamma$.</p>	
E	<p>Perlite + cémentite Mélange caractéristique des aciers hypereutectoïdes. Proportions variables selon la teneur en carbone, mais n'excédant jamais 20 % de cémentite dans les aciers. Le réseau de cémentite se forme le long des joints de grains de l'austénite au refroidissement à la traversée du domaine $\gamma + Fe_3C$.</p>	
	<p>Perlite globulaire (coalescée) Mélange eutectoïde ayant subi, après formation à 727 °C, un recuit de globularisation aux environs de 700 °C : grâce à la diffusion, les lamelles de cémentite coalescent sous forme sphéroïdale sous l'effet de la tension interfaciale. Légèrement moins dure et plus ductile que la perlite lamellaire.</p>	

Les fontes

- Les fontes contiennent entre 2,11 et 6% de carbone. Ce sont des produits ferreux obtenus par réduction du minerai de fer dans un haut-fourneau.
- En fonction de la température du haut-fourneau et de la vitesse de refroidissement, trois types de fontes peuvent être obtenues :
 - De la fonte grise de première fusion ;
 - De la fonte blanche ;
 - De la fonte truitée (mélange de fonte grise et de fonte blanche).

FONTES:

Les fontes sont des alliages de fer ayant une teneur en carbone $> 2,1 \%$. Ceci les rend fragiles et exempts de toute déformation plastique. On les fabrique par moulage (fonderie). Selon la composition (teneur en carbone et concentration de silice) et la vitesse de refroidissement au cours d'élaboration, la fonte peut présenter différentes structures. On distingue globalement les fontes grises, blanches, à graphite sphéroïdale et les fontes malléables.

a) **Les fontes grises ($2.5\% < \%C < 4\%$ avec $1\% < \%Si < 3\%$):**

Elles sont constituées de graphite sous forme de flocons entourés de ferrite α ou de perlite selon que le refroidissement s'effectue de façon modérée ou lente. Elles ont un aspect grisâtre sur la surface de rupture. Leur structure les rend efficace à l'amortissement des vibrations malgré leur faible résistance et ténacité. Elles sont souvent utilisées pour les bâtis des machines ou équipements soumis aux vibrations. Leur fluidité à l'état liquide permet d'obtenir des pièces de forme complexe.

Les fontes blanches sont des fontes dont la teneur de silice est inférieure à 1% et refroidies rapidement. Elles présentent une structure sous forme de cémentite d'aspect blanchâtre. Elles sont très dures et fragiles, utilisables comme matériaux résistant à l'usure sans grande ductilité (rouleaux des laminoirs).

b) **Les fontes malléables:**

Les fontes blanches peuvent être rendues malléables en procédant à un maintien de réchauffement à une température autour de $800-900^\circ\text{C}$ dans une atmosphère neutre (sans oxydation). Selon que le refroidissement est rapide ou lent, on obtient une structure malléable du type perlitique ou ferritique. Ces fontes malléables sont utilisées pour fabriquer des bielles, des engrenages de transmission, des raccords de tuyauterie.

Caractéristiques fondamentales des matériaux

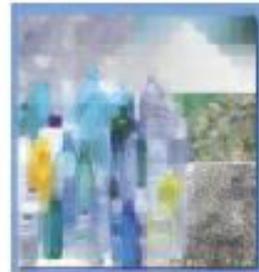
♦ Métaux

Opaques, solides, denses, très bons conducteurs de chaleur et d'électricité. Grande plasticité qui permet de les déformer.



♦ Polymères

Peu denses, isolants thermiques et électriques. Facile à mettre en forme à température ambiante. Faibles propriétés mécaniques. Supportent mal la chaleur.



♦ Céramiques

Grande rigidité, résistance thermique élevée et une forte inertie chimique. Isolantes, très dures, mais fragiles et difficiles à former

