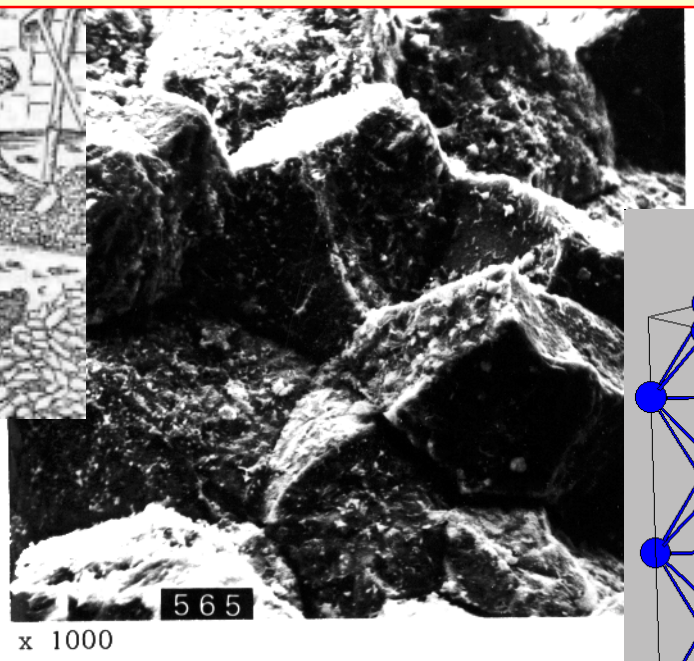
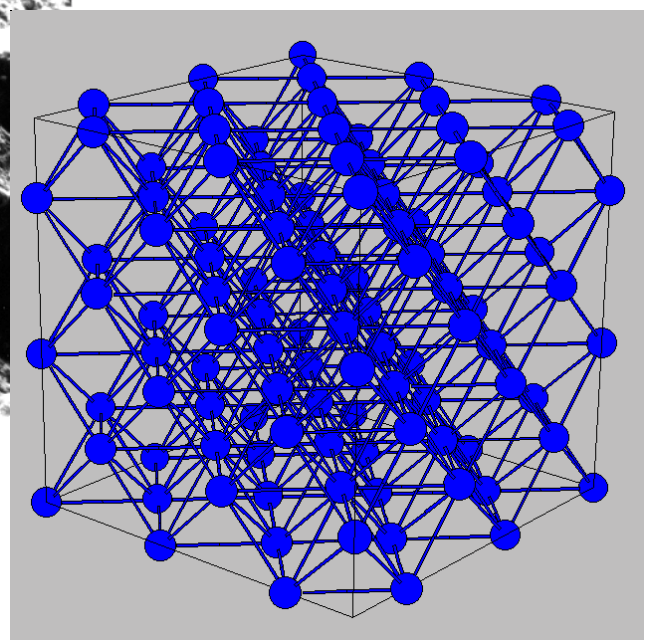
Université de Marne la Vallée
Maîtrise de Physique et Applications
Option Matériaux

Les Matériaux métalliques





J Ruste
EDF R & D
Les Renardières

Les matériaux métalliques

Introduction : qu'est-ce qu'un métal ?
I – Quelques rappels sur les métaux
- **Propriétés des métaux**
- **Structures**
  - **électroniques**
  - **cristallographiques**
- **Contraintes et déformations**

II – Elaboration des métaux
- **un peu d'histoire (« archéo-métallurgie »)**
- **introduction à la sidérurgie (élaboration des fontes et aciers)**
- **élaboration de l'aluminium**

III – Rappels sur les diagrammes de phases
IV - Le diagramme Fer-Carbone
V – Les alliages ferreux (aciers)
VI - Les aciers inoxydables
VII – Les alliages Fe-Ni
VIII - Les alliages non ferreux
IX – Les traitements thermiques
X – Oxydation et corrosion
XI – Microstructure et comportement mécanique
XII - Techniques de caractérisations mécaniques
Visite d'un laboratoire de métallurgie

BIBLIOGRAPHIE

Physique du solide

☞- C. KITTEL - Physique de l'état solide - Dunod- 5ème édition - 1983
- M. BROUSSEAU - Physique du solide, Propriétés électroniques - Masson -1992
- J. CAZAUX - Initiation à la physique du solide , exercices commentés - Masson 1994

Dislocations

☞- W. T. READ - Les dislocations dans les cristaux - Dunod 1957
- D. HULL - Introduction to dislocations - Pergamon Press - 1968

Matériaux

☞- M.F. ASHBY, D.R.H. JONES - Matériaux - Dunod 1996
tome 1 Propriétés et applications
tome 2 Microstructure et mise en forme

Métallurgie

- G. CHAUSSIN, G. HILLY - Métallurgie - Dunod 1966
Tome 1 alliages métalliques
Tome 2 élaboration des métaux-
- B. CHALMERS - Métallurgie physique - Dunod 1963
☞- J. PHILIBERT, A. VIGNES, Y. BRECHET, P. COMBRADE - Métallurgie du minerai au matériau - Masson 1998
☞- J. BARRALIS, G. MAEDER - Précis de Métallurgie - AFNOR-Nathan - 1993

INTRODUCTION

QU'EST-CE QU'UN METAL ?

C'est un élément qui possède :

- **un éclat particulier (« l'éclat métallique ») ⟶ *structure électronique***
- **une bonne conductibilité thermique et électrique**

le diamant conduit bien la chaleur mais pas l'électricité
le graphite est un bon conducteur électrique mais pas de la chaleur
la pyrite de fer a un éclat métallique…
mais ce ne sont pas des métaux !

- **de bonnes propriétés mécaniques :**
  - **dureté**
  - **ténacité (résistance au déchirement)**
  - **malléabilité**
  - **ductilité (étirable)**

-**éléments électropositifs, formant avec l'oxygène un ou plusieurs oxydes basiques**
(difficulté d'obtenir des métaux purs à l'état naturel)

Les différentes classes de métaux :

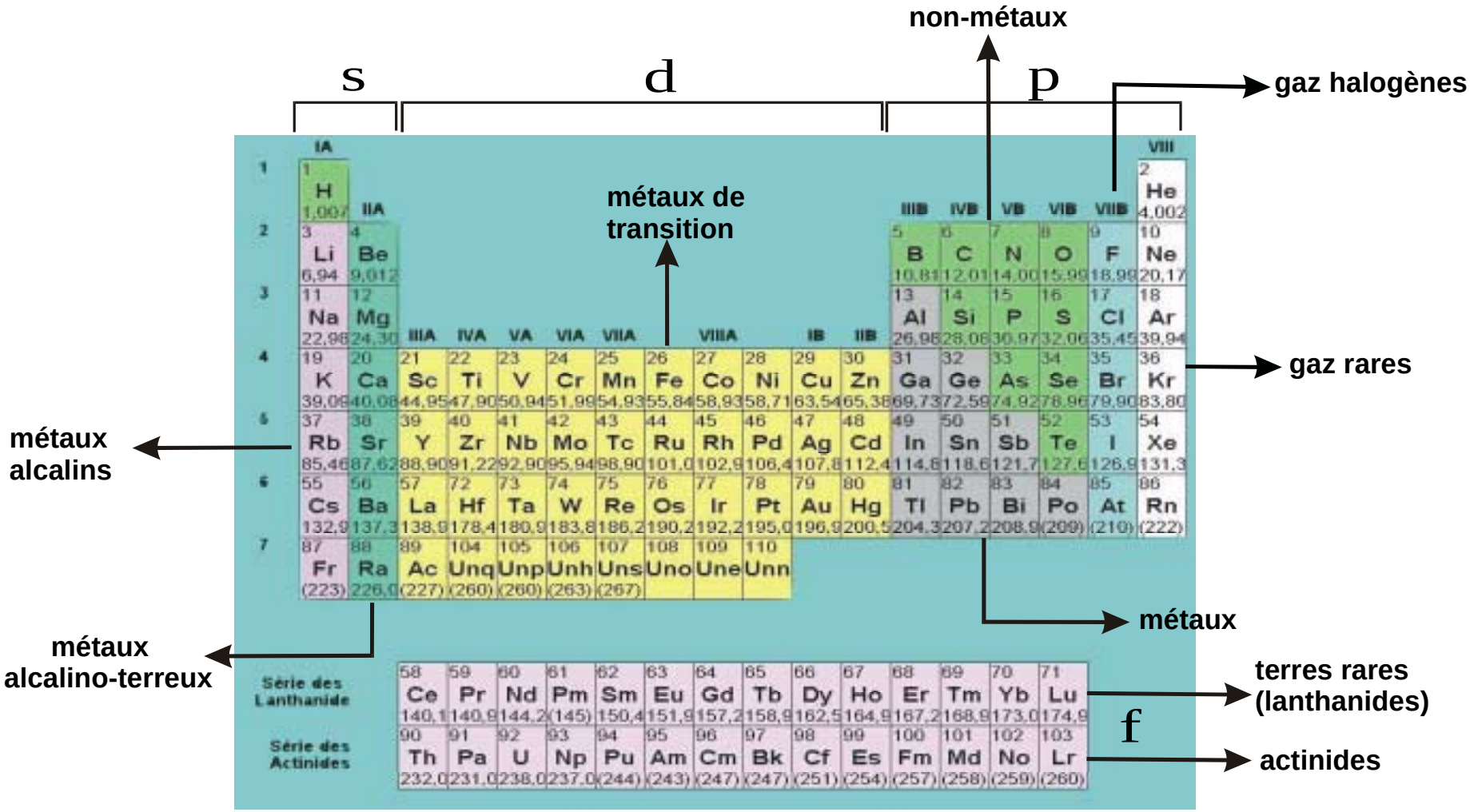
1) **les métaux « nobles » (Au, Ag, Pt)**
   peu réactifs (non-oxydables)
   se rencontrent à l'état « natif » (pur) dans la nature

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

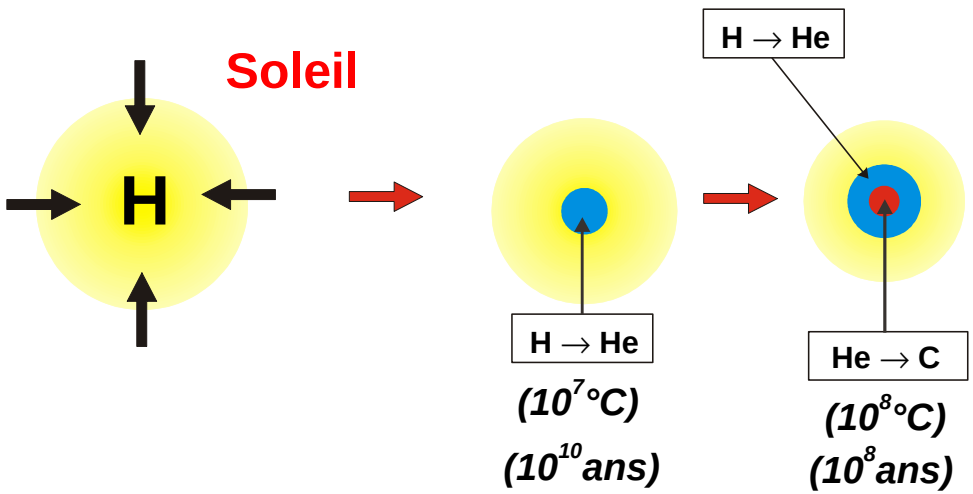
Origine des gisements métalliques terrestres

en 5 étapes…

1ère étape : le « big-bang » : *-13,8 milliards d'années (environ…)*

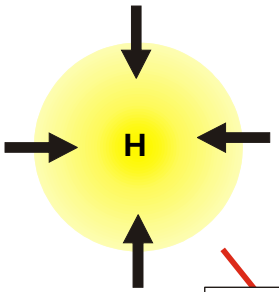
nucléosynthèse primordiale *(1 à 10.000 secondes)* :
formation du H^1, D^2, He^3, He^4 et Li^7

2ème étape : évolution stellaire (*-10 milliards d'années*)



étoiles de taille moyenne (<1,5 Ms)

étoile de grande taille (M>1,5Ms)



étoiles massives *(>1,5 M)*

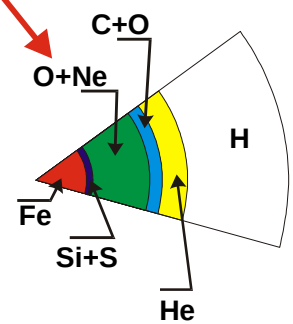
exemple : M=25

H → He — 7 10^6 ans

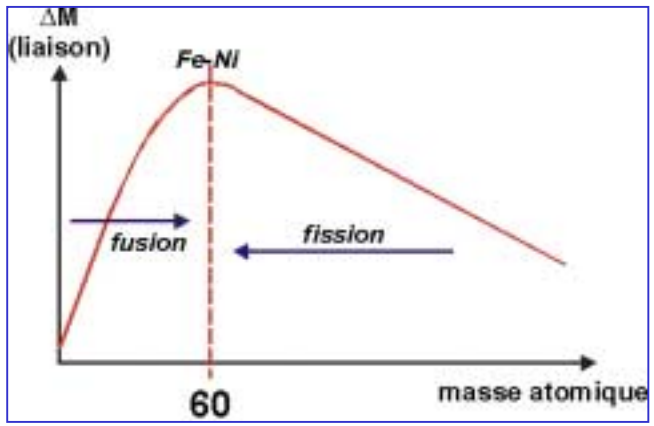
He → C — 500 000 ans

C → Ne, O, Si, Na, Mg, Al, P, S ... — 600 ans

Si → Fe — 1 jour *(5 10^9 °C)*



structure en "pelure d'oignon"



super-novae

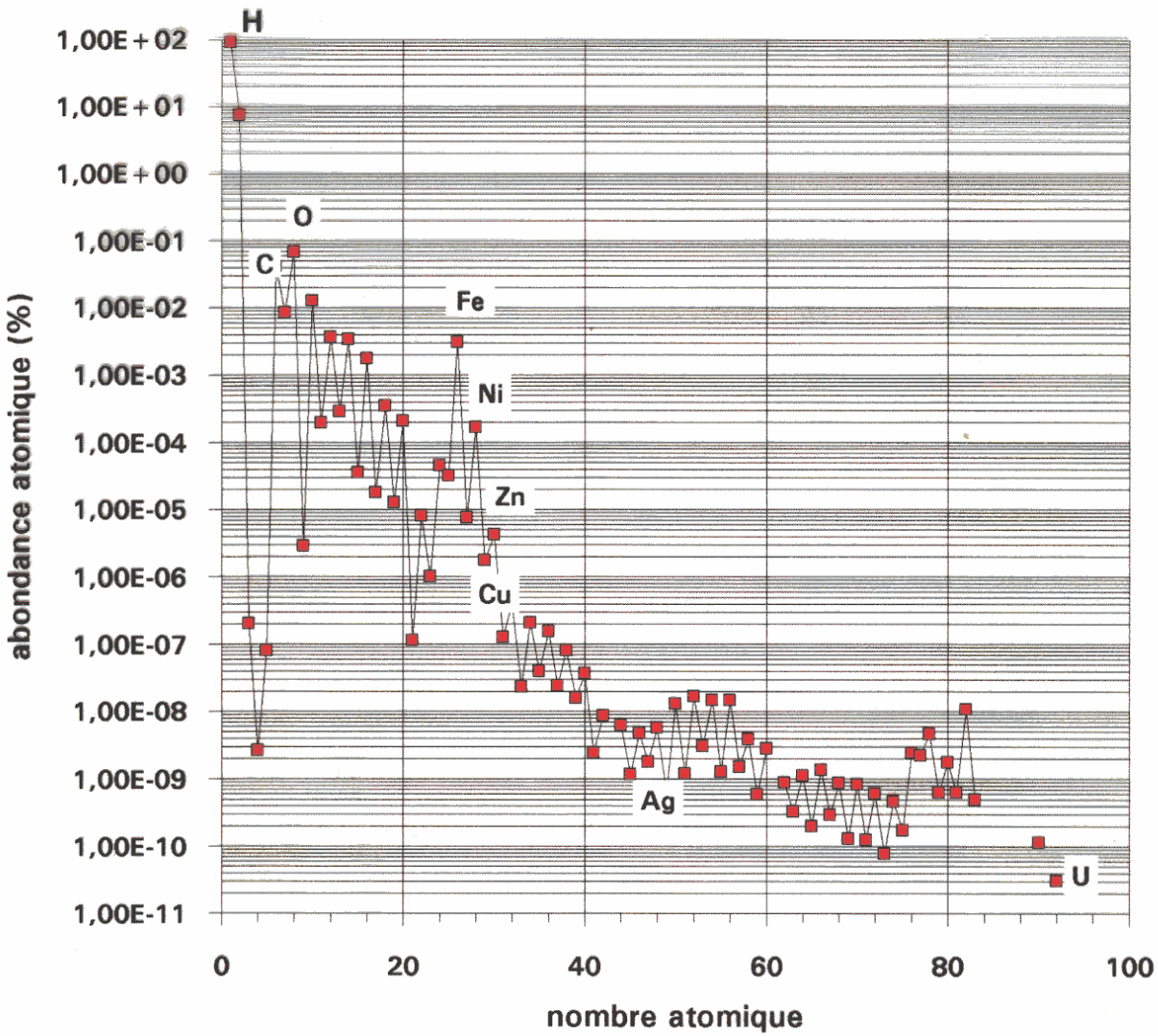
formation des éléments lourds par capture de neutrons → *nuages interstellaire*

→ *systèmes stellaires*

M<6Ms → *naine blanche*

M>8Ms → *étoile à neutrons* / *trou noir*

Abondance cosmique

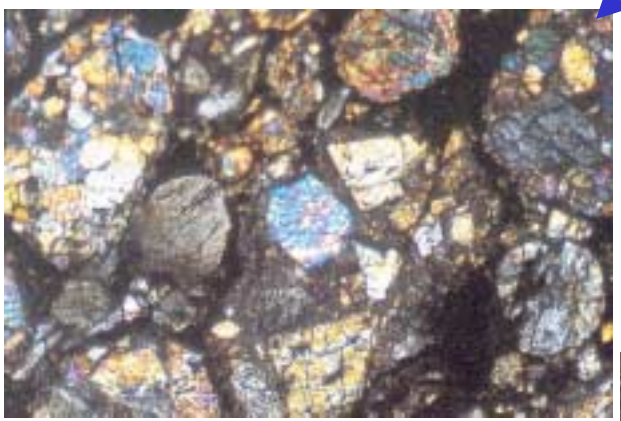


3ème étape : formation de la terre par accrétion (*100 millions d'années*)

poussières (Si, O, Fe…) —*agglomération*→ **chondrites** —*accrétion*→ **astéroïdes** —*accrétion*→ **planètes**

astéroïdes → **démixtion métal-silicate**

planètes → **démixtion métal-silicate**



chondrite

petites billes (chondres) d'olivine et de pyroxènes (silicates de Fe et de Mg) dans une matrice de silicate

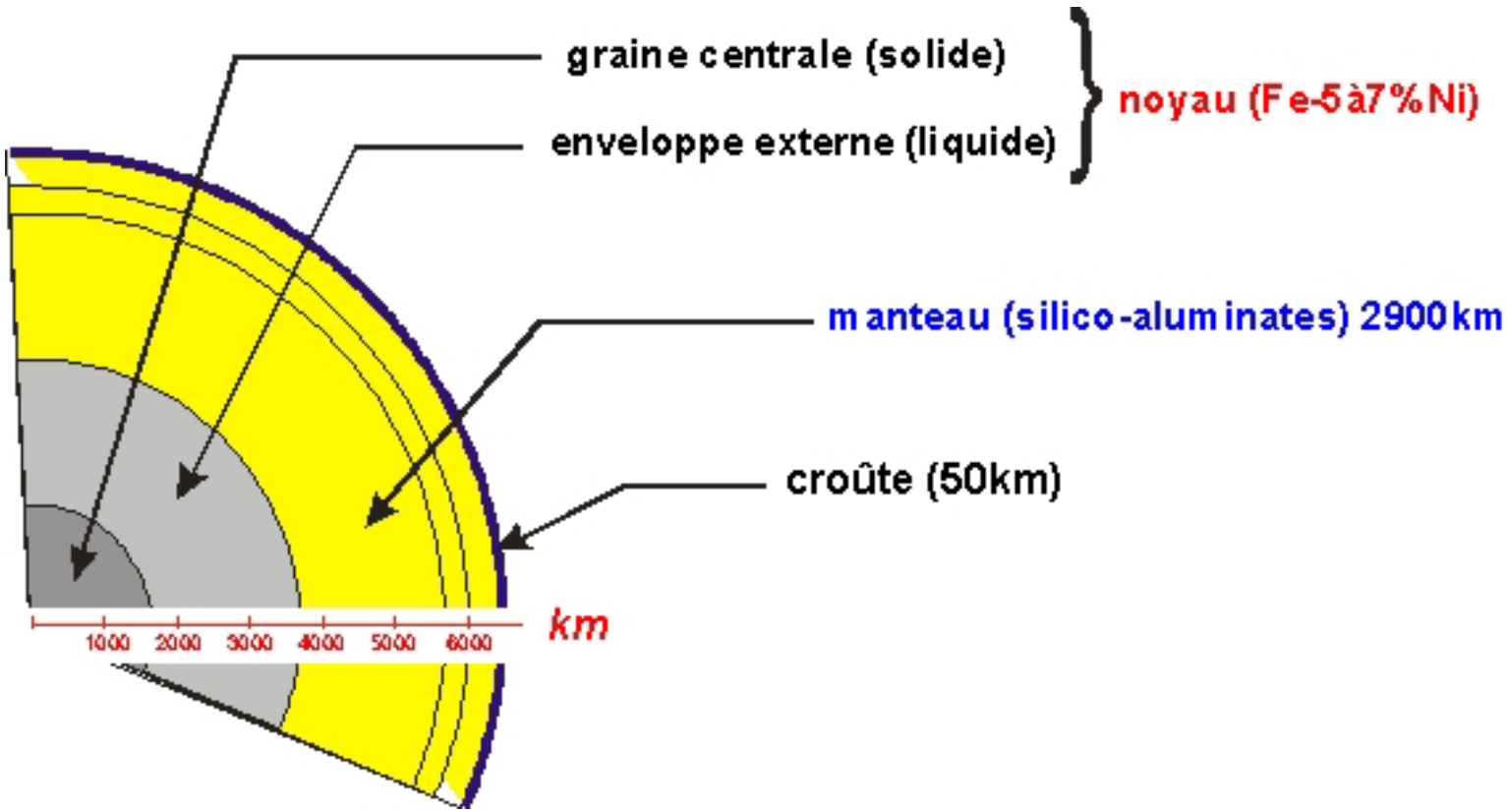
achondrite

fragment du manteau (silicates)

sidérite

fragment du noyau (alliage de Fe-Ni)

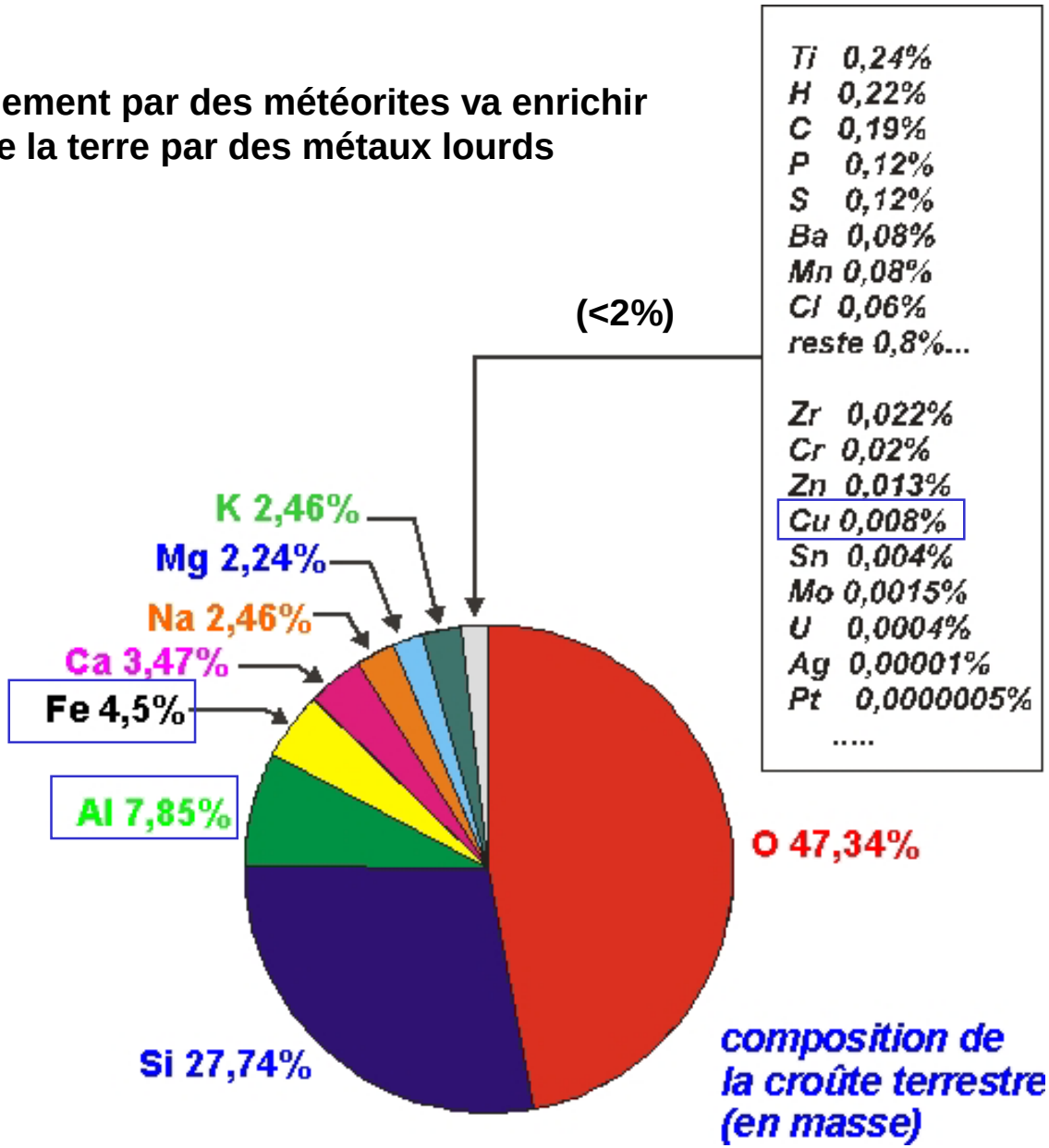
Les métaux lourds se rassemblent au centre, les éléments légers vers la surface…



structure de la Terre

4ème étape : bombardement météoritique (*<1 milliard d'années*)

Le bombardement par des météorites va enrichir la surface de la terre par des métaux lourds



5ème étape : formation de gisements métallifères (*des millions d'années*)

dissolution (eau) ⇨ transport ⇨ précipitation ⇨ filons et gisements métallifères

Ressources métallifères

État natif : Au, Cu(5%) Ag Pt (métaux nobles, peu oxydables)

sidéral (météorites) : Fe, Fe-Ni (rares)

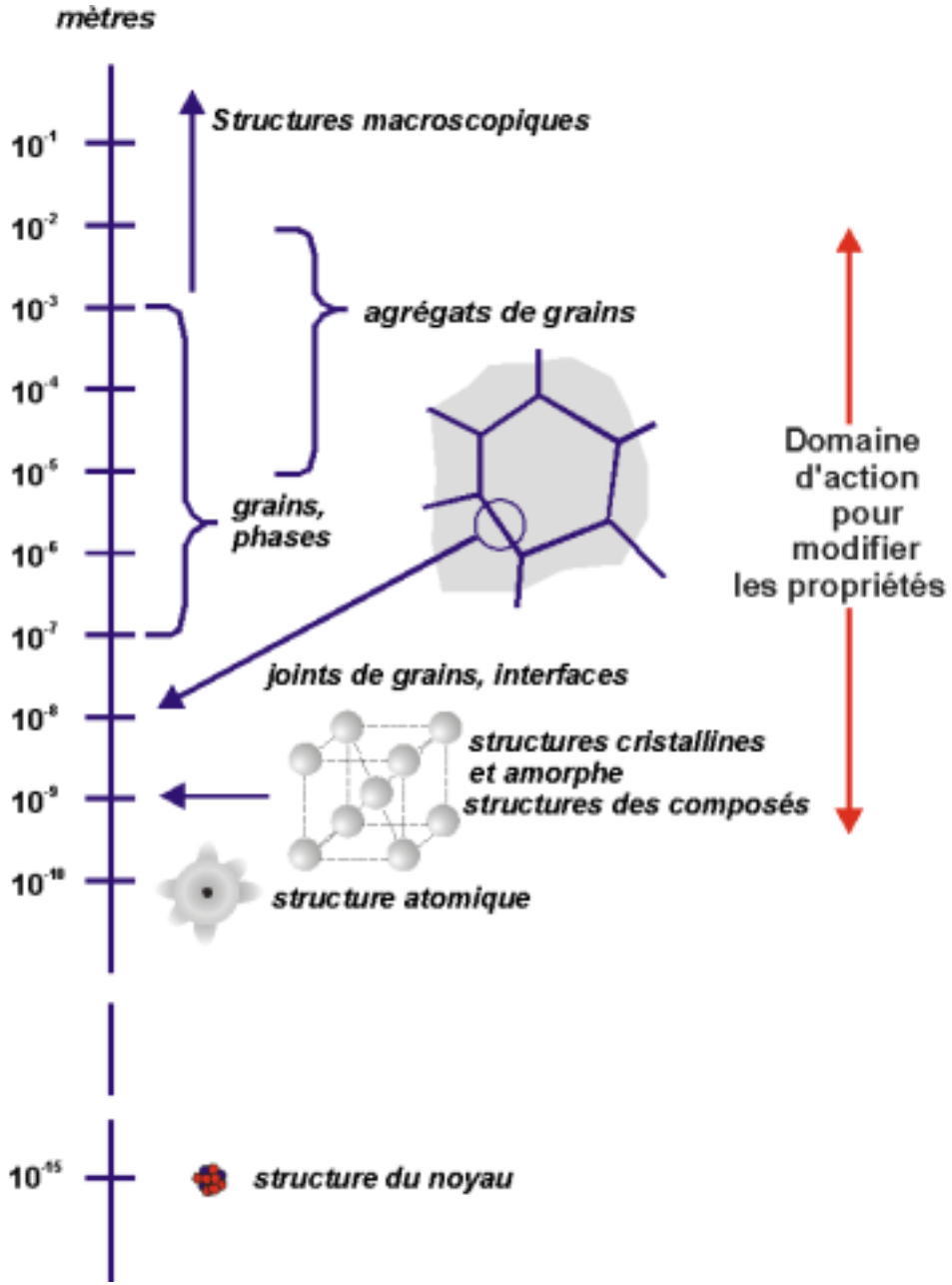
Minerais :

- **Oxydes**
  - **Fe2O3 (hématite) Fe304 (magnétite)**
  - **AlO-OH (bauxite)**
  - **Cu2O (cuprite) CuCO3(OH3) (malachite)(15%)**
  - **FeCr2O4 (chromite) ….**

- **Sulfures**
  - **Cu2S (chalcocite) CuFeS2 (chalcopyrite)(80%)**
  - **ZnS (blende)**
  - **Fe2S (pyrite)**
  - **PbS (galène) HgS (cinabre)…**

I - CARACTERISTIQUES

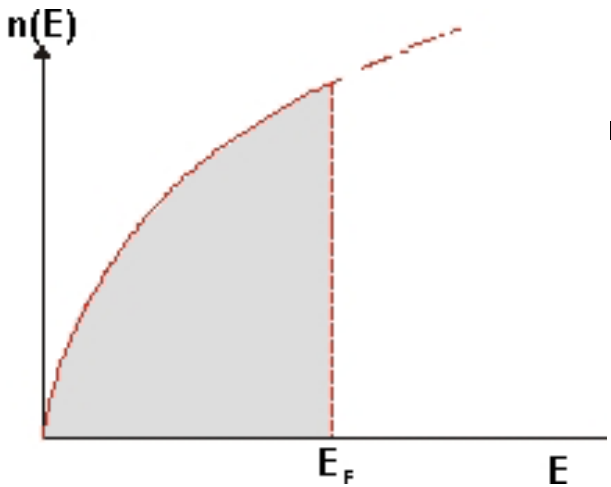
Les échelles

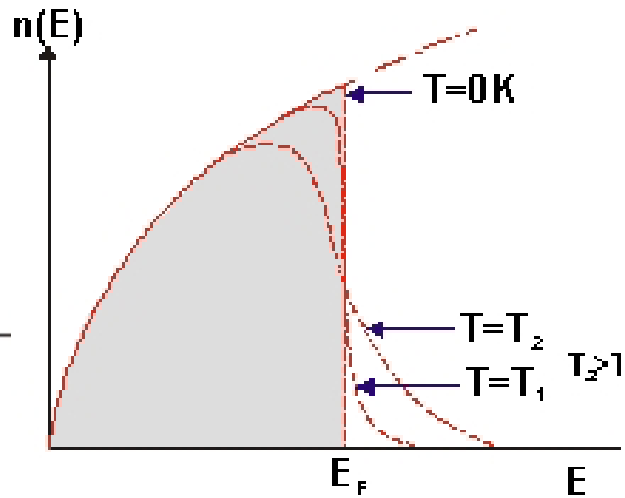


Structure électronique

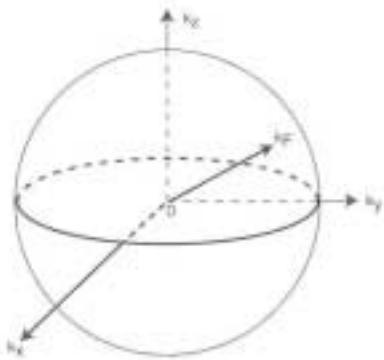
structure de bande métallique :

le niveau de Fermi est à l'intérieur de la bande de conduction





structure de bande dans la théorie de l'électron libre

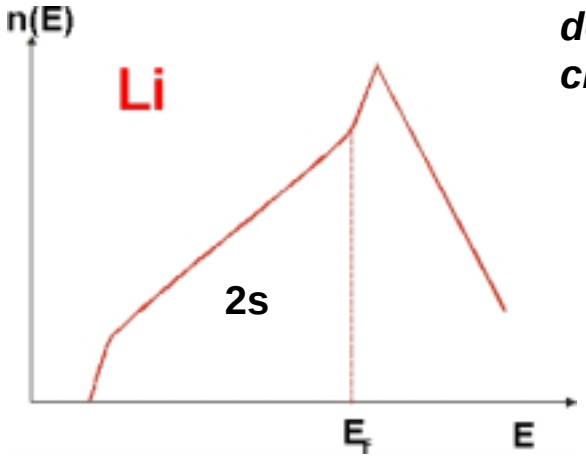


sphère de Fermi

comprise dans la 1ère zone de Brillouin

les électrons de valence sont libres dans un puit de potentiel

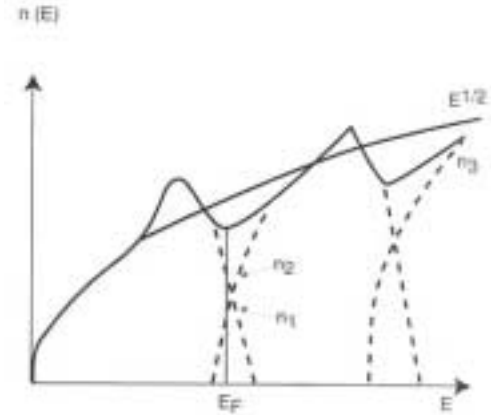
Pas tout à fait exact… car le potentiel est modulé par les ions

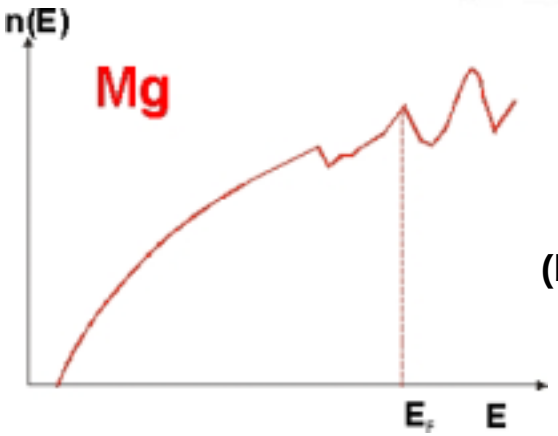


4eV

métaux normaux
(alcalins monovalents)

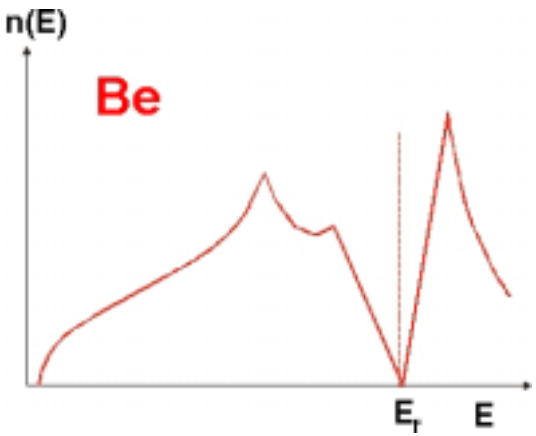
de plus il peut y avoir chevauchement de bandes





8eV

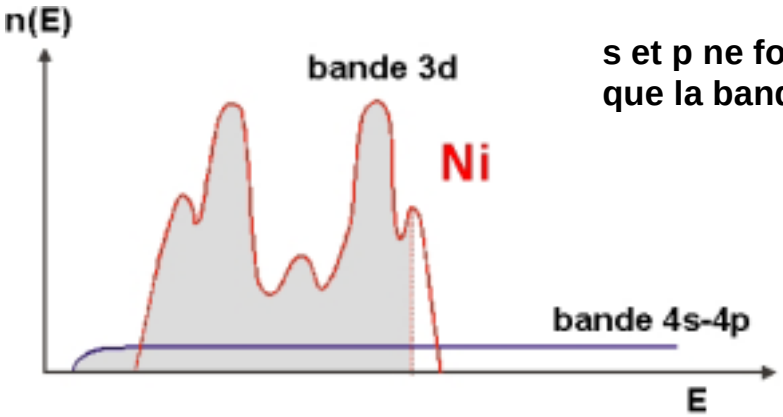
métaux normaux
(bi et trivalents: Mg, Al…)



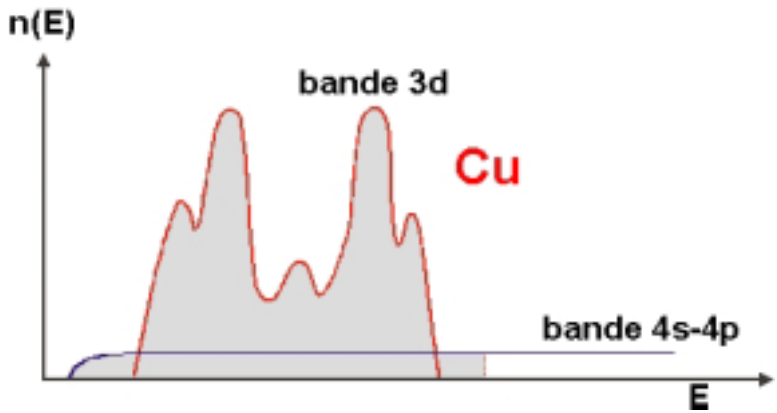
pseudo-métaux
(très faible recouvrement des bandes)

métaux de transition

remplissage de la sous couche d et chevauchement avec la sous couche sp



s et p ne forment qu'une seule bande très large (>20eV) alors que la bande d est plus étroite (5eV)



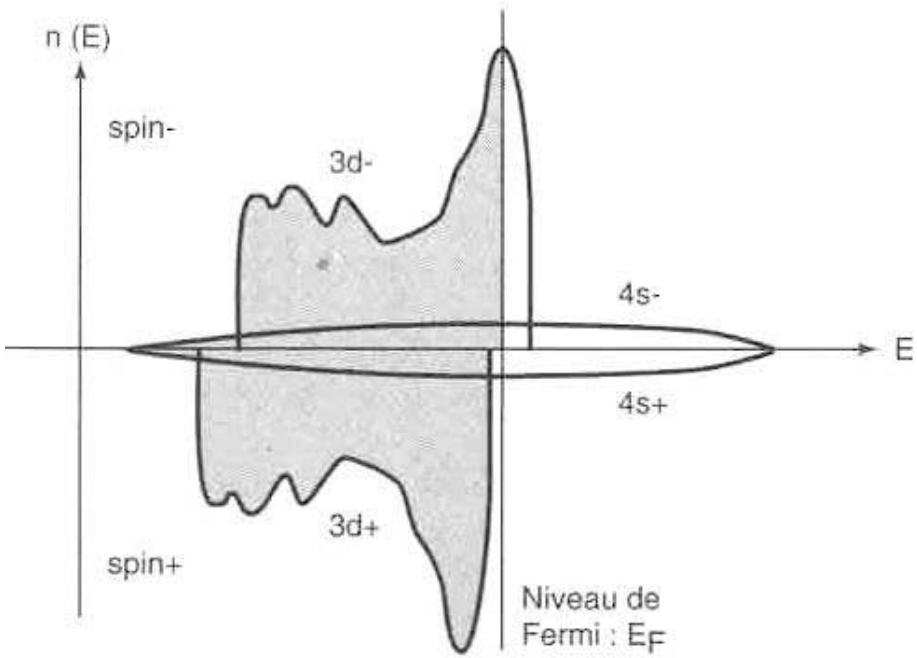
répartition des électrons entre les sous couches

Fe : 0,9 électron 4s et 7,1 électrons 3d
Cu : 1 électron 4s et 10 électrons 3d

le niveau de Fermi peut être à l'intérieur de 3d (métaux de transition :Cr, Fe, Ni) ou à l'extérieur (Cu)

Conséquences :

le ferromagnétisme



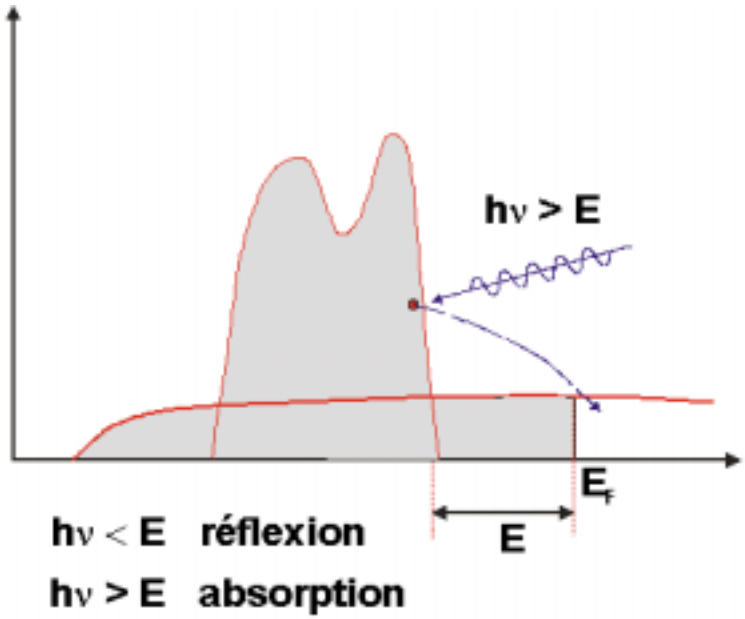
Fe

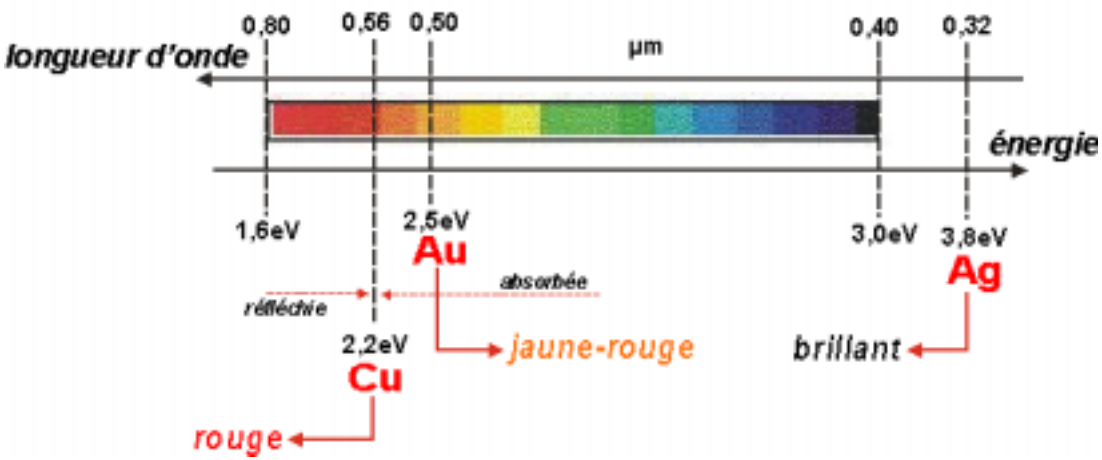
4s+	4s-	3d+	3d-
0,45	0,45	4,7	2,4

dans certains métaux (Fe, Ni) les bandes d correspondant aux 2 orientations de spin sont décalées, d'où une différence dans le nombre d'électrons avec un excès de spin dans une direction, d'où un magnétisme résultant (métaux ferromagnétiques)

La couleur de certains métaux

la plupart des métaux sont brillant (réflexion totale de la lumière) d'autres (Cu, Au) présente une couleur résultant d'une absorption de certaines longueurs d'onde) Cette absorption est due aux électrons 3d proches du niveau de Fermi qui peuvent passer dans 4s

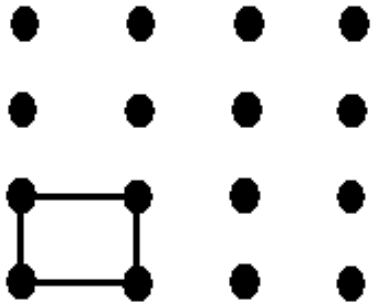




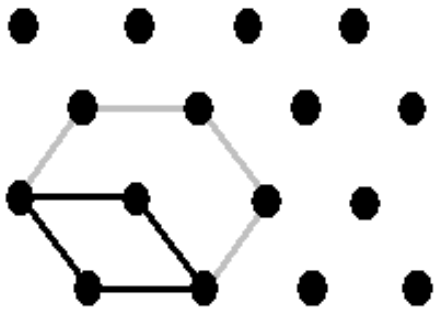
Notions de cristallographie

cristal : structure périodique d'atomes ou de molécules à 3 dimensions

réseau :
ensemble périodique de nœuds



cubique 2D

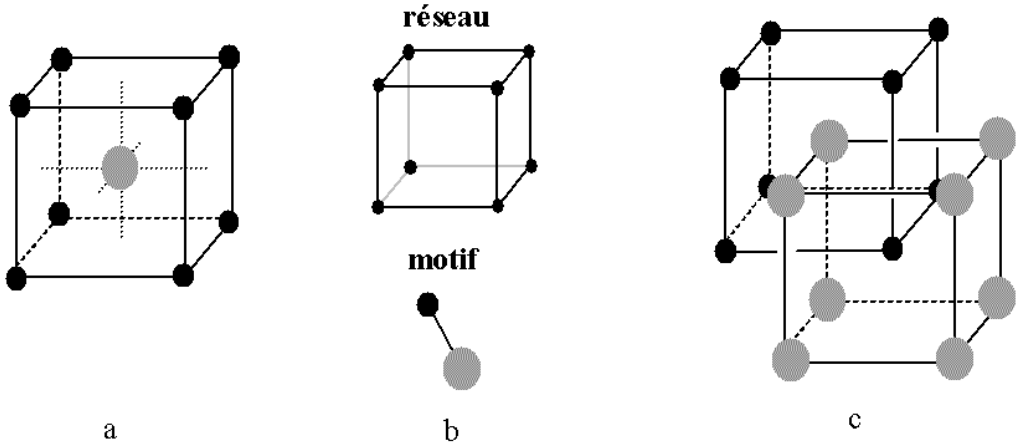


hexagonal 2D

maille : plus petite partie du réseau ayant la même symétrie

motif : groupe minimum d'atomes placé en chaque nœud et qui par duplication représente le cristal

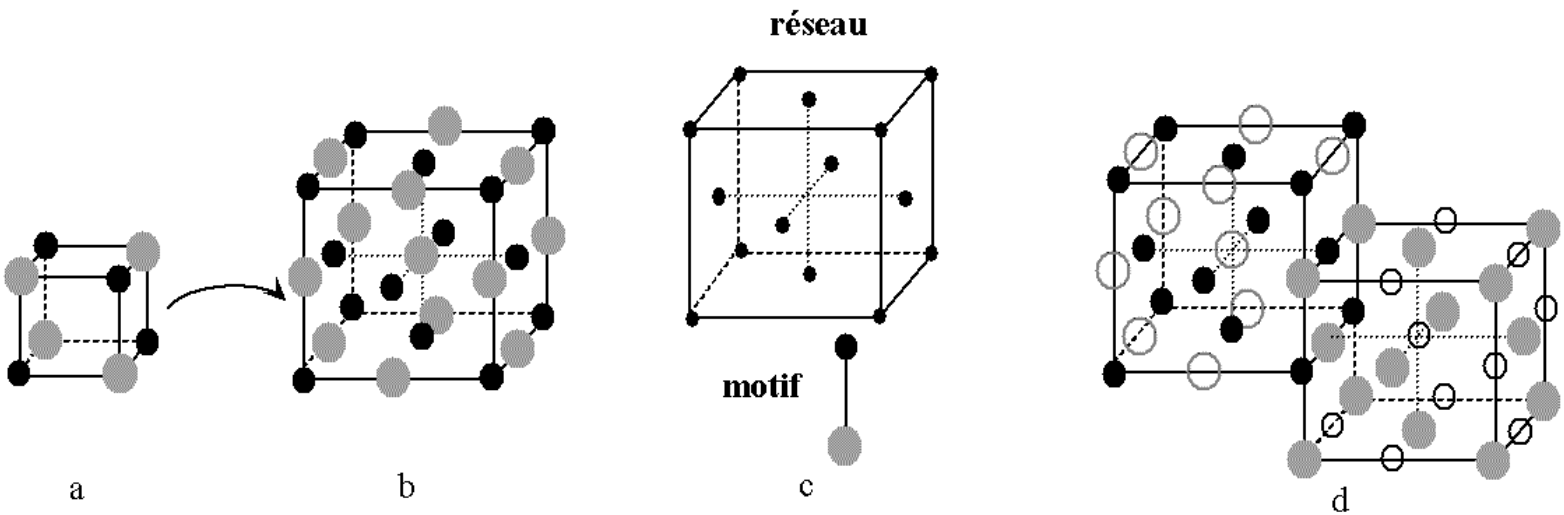
Fer : atome de fer…
glace : molécule d'eau…



structure B2
(CsCl, FeAl, NiAl…)

réseau cubique

motif : 2 atomes A-B



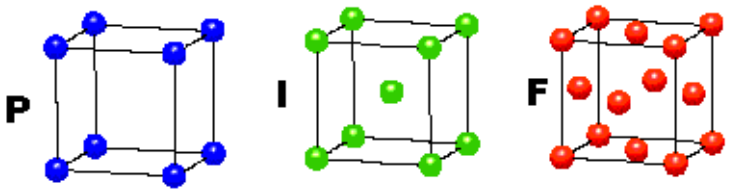
structure B1
(NaCl, PbS…)

réseau cubique centré

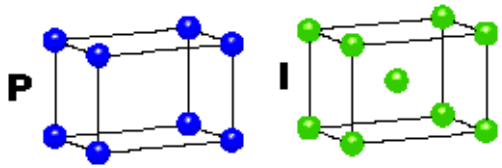
motif : 2 atomes A-B

Structures cristallographiques

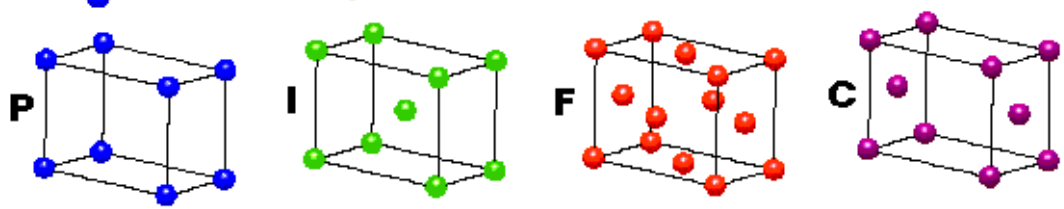
Cubique
$a = b = c$
$\alpha = \beta = \gamma = 90°$



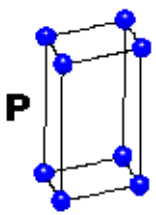
Quadratique
$a = b \neq c$
$\alpha = \beta = \gamma = 90°$



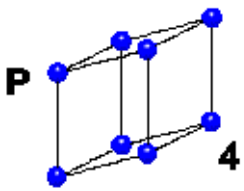
Orthorhombique
$a \neq b \neq c$
$\alpha = \beta = \gamma = 90°$



Hexagonal
$a = b \neq c$
$\alpha = \beta = 90°$
$\gamma = 120°$

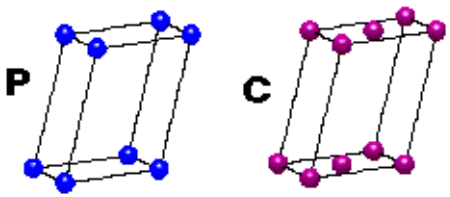


Trigonal
$a = b = c$
$\alpha = \beta = \gamma \neq 90°$

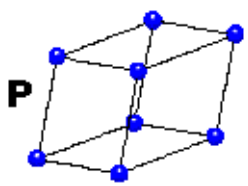


4 types de réseau

Monoclinique
$a \neq b \neq c$
$\alpha = \gamma = 90°$
$\beta \neq 120°$



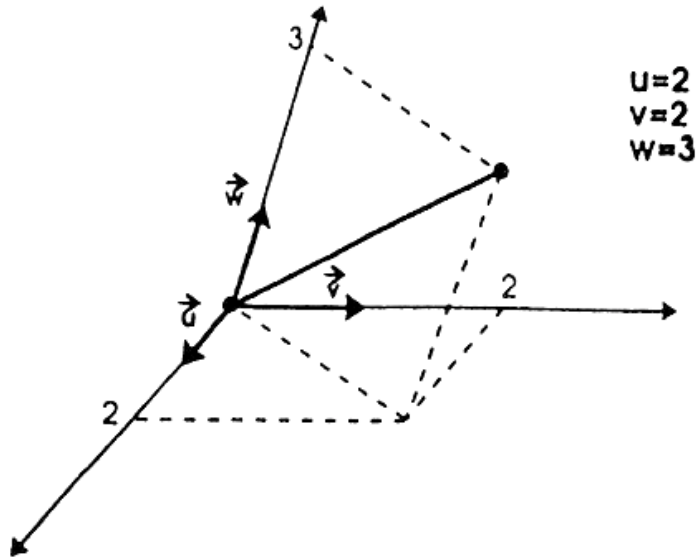
Triclinique
$a \neq b \neq c$
$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90°$



4 types de réseau
- P Primitif
- I centré
- F toutes faces centrées
- C 1 face centrée

+ 7 systèmes cristallins
= 14 réseaux de BRAVAIS

directions cristallographiques



u=2
v=2
w=3 → (223)

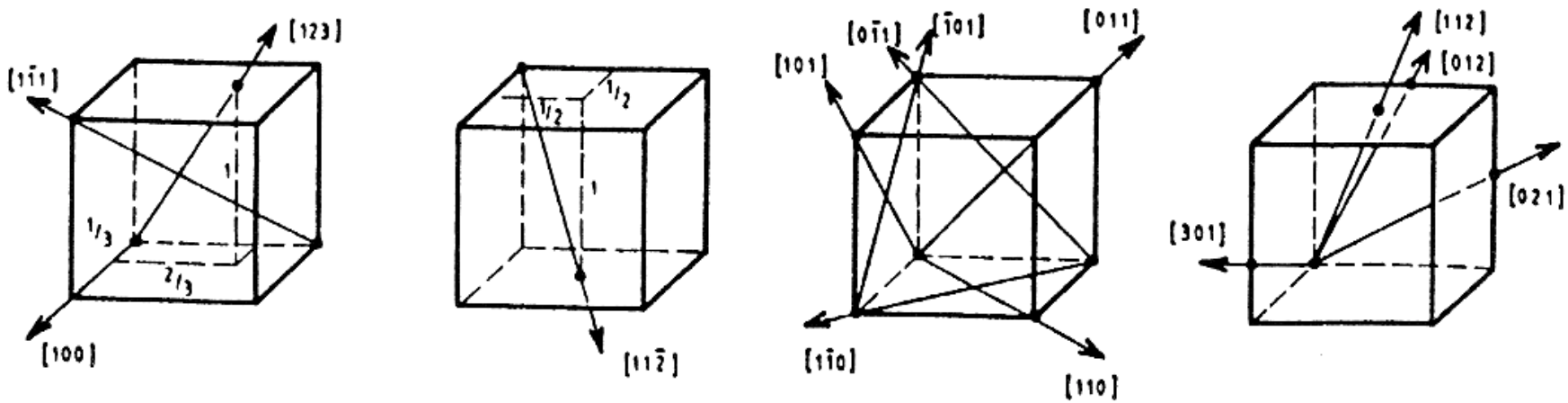
si u=-2 → $(\bar{2}23)$

[uvw] direction cristallographique
<uvw> famille de direction

<100>

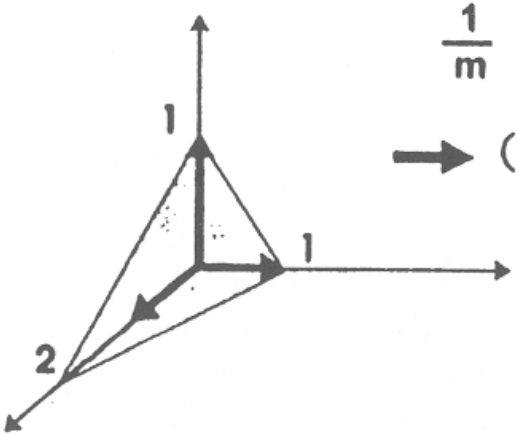
[100] [010] [001]

Exemples de directions cristallographiques (système cubique)



plans cristallographiques

(hkl) : indices de Miller du plan



$$\frac{1}{m} \quad \frac{1}{n} \quad \frac{1}{p}$$

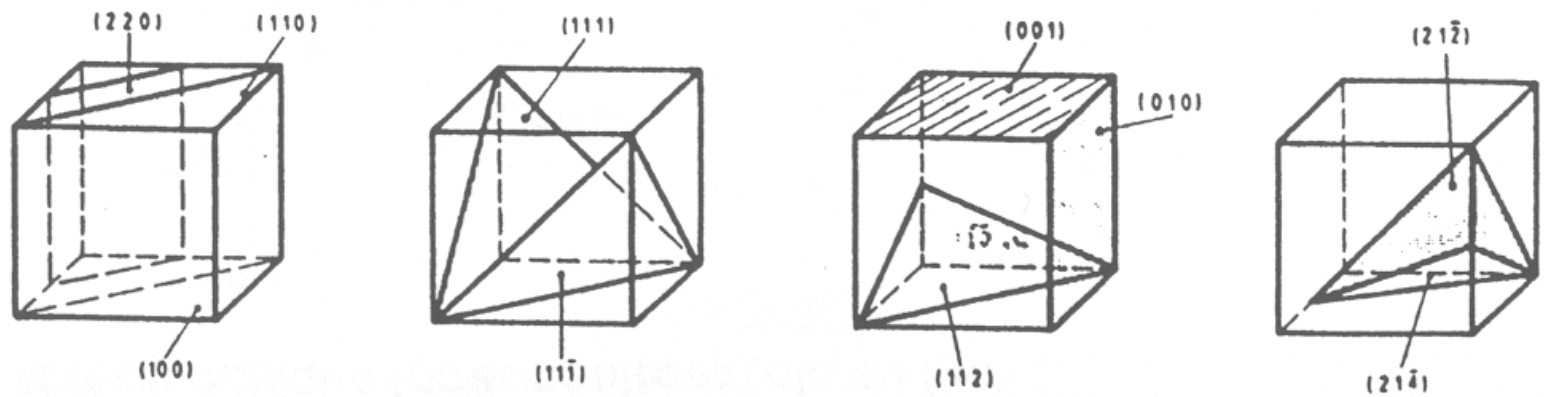
→ (122)

distance interréticulaire : d

pour une maille cubique de paramètre a

$$d = \frac{a}{\sqrt{h^2+k^2+l^2}}$$

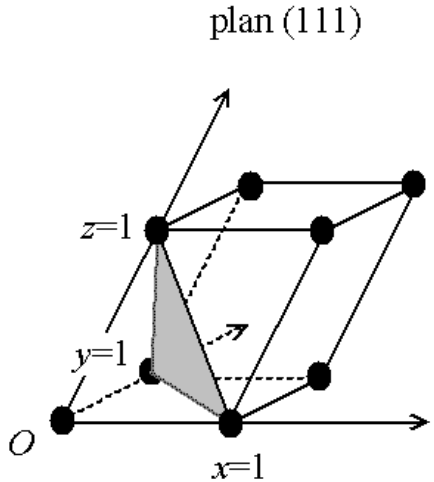
Exemples de plans cristallographiques (système cubique)

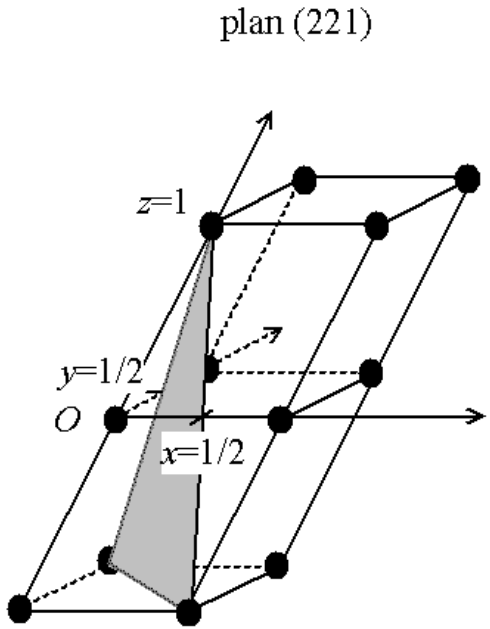


angle entre les plans (hkl) et (h'k'l') :

$$\cos\theta = \frac{hh'+kk'+ll'}{\sqrt{h^2+k^2+l^2}\sqrt{h'^2+k'^2+l'^2}}$$

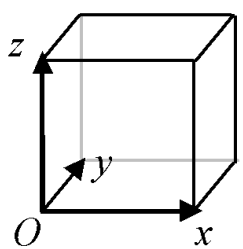
exemple d'indices de Miller

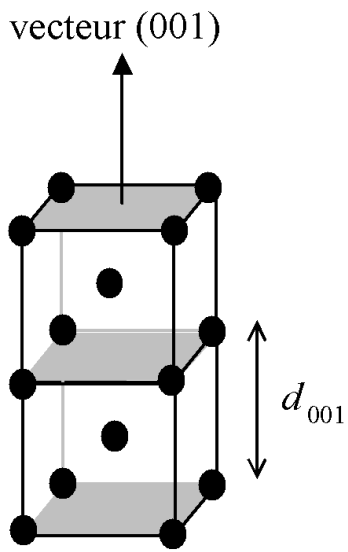




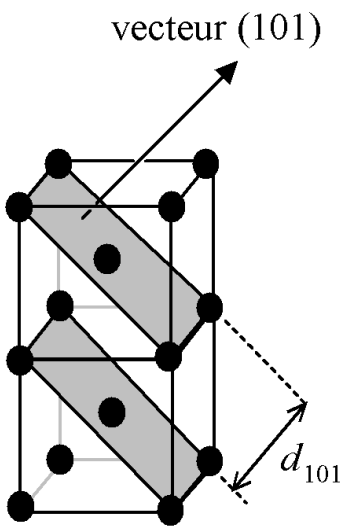
triclinique

cubique

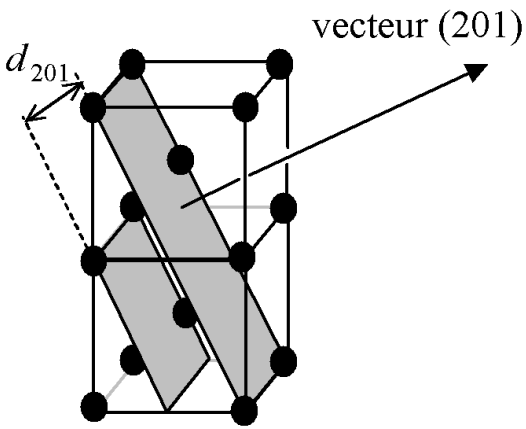




plans (001)
famille {100}



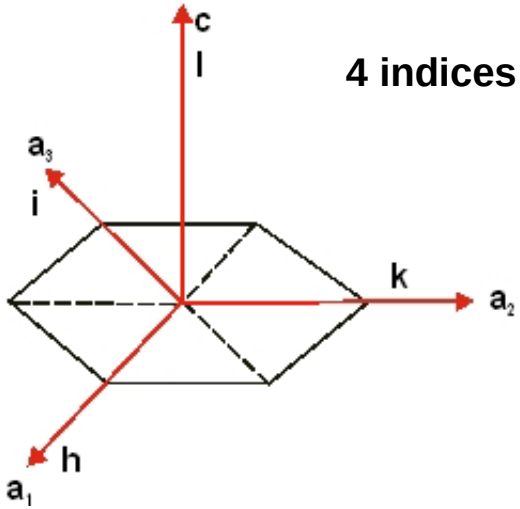
plans (101)
famille {110}

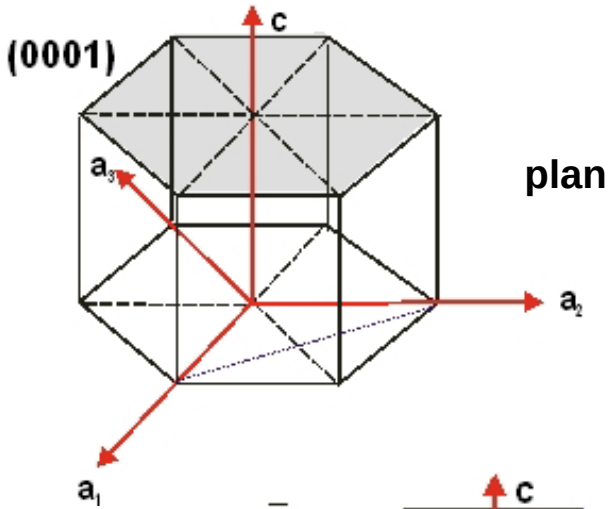


plans (201)
famille {210}

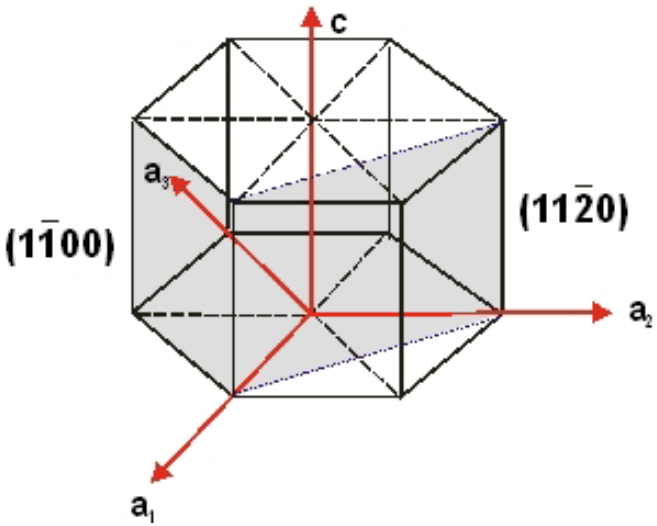
Cas de la structure hexagonale

4 indices de Miller : h, k, i et l avec i=-(h+k)

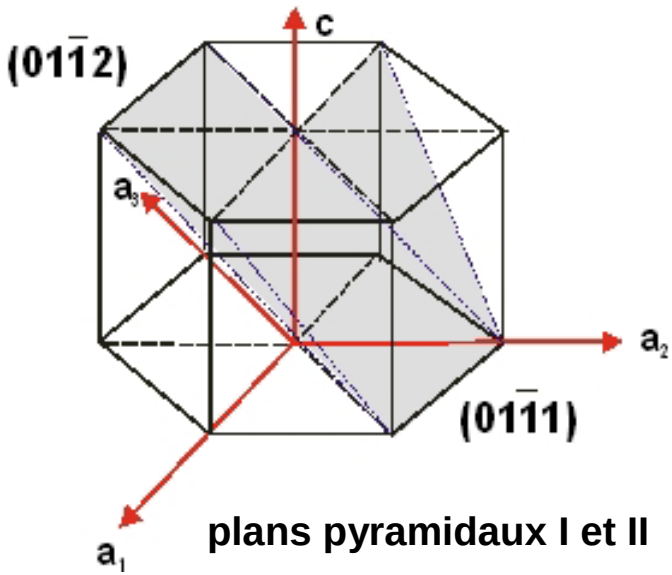




plan basal

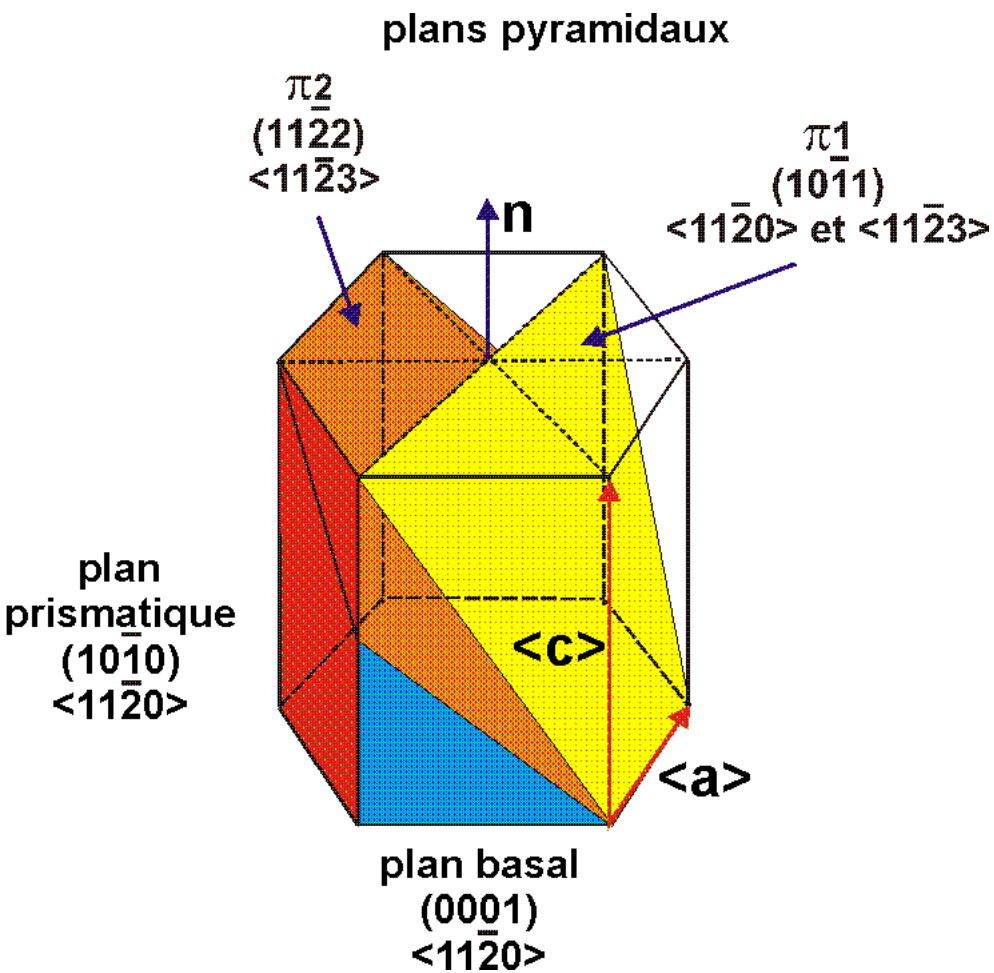


plans prismatiques I et II

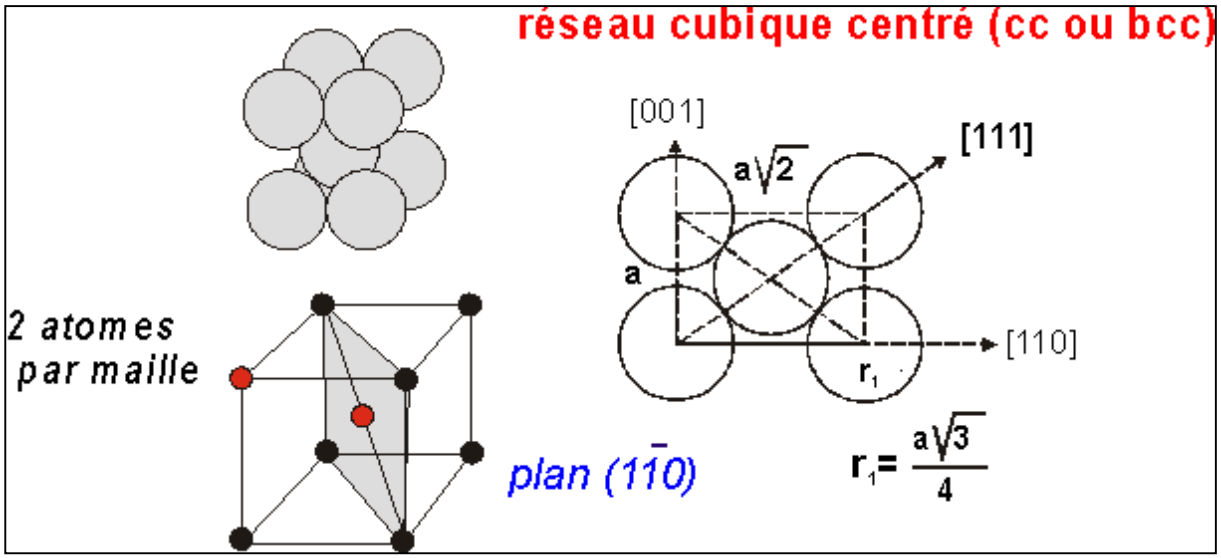


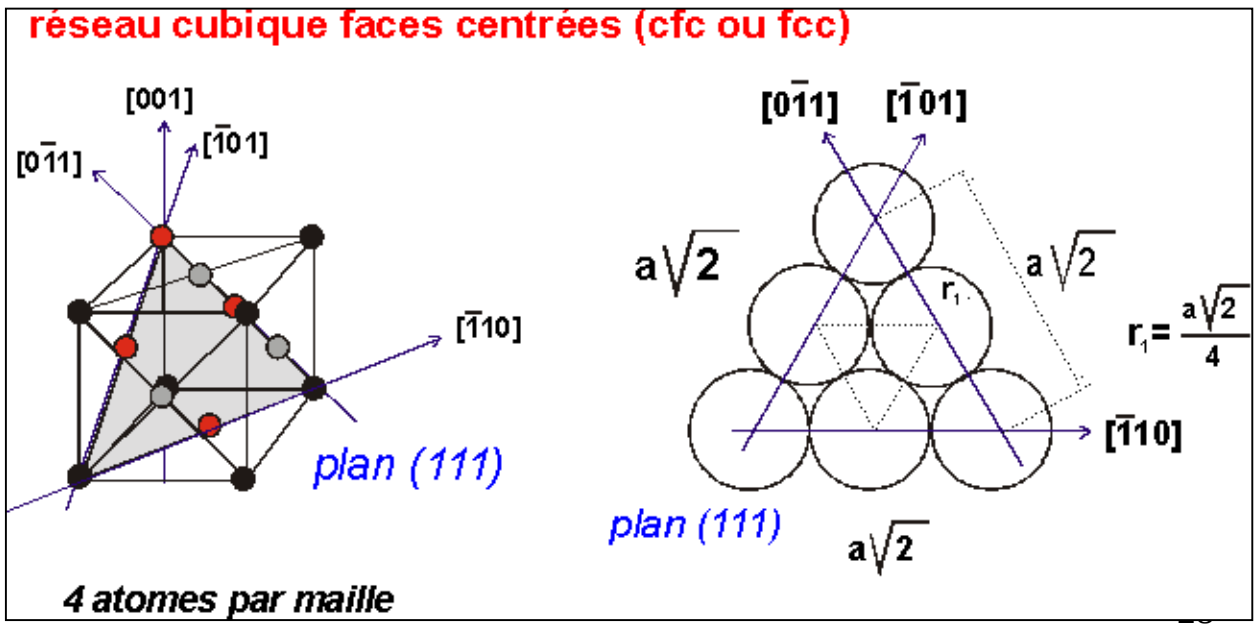
plans pyramidaux I et II

Structure hexagonale :
définition des différentes familles de plans cristallographiques et des systèmes de glissement

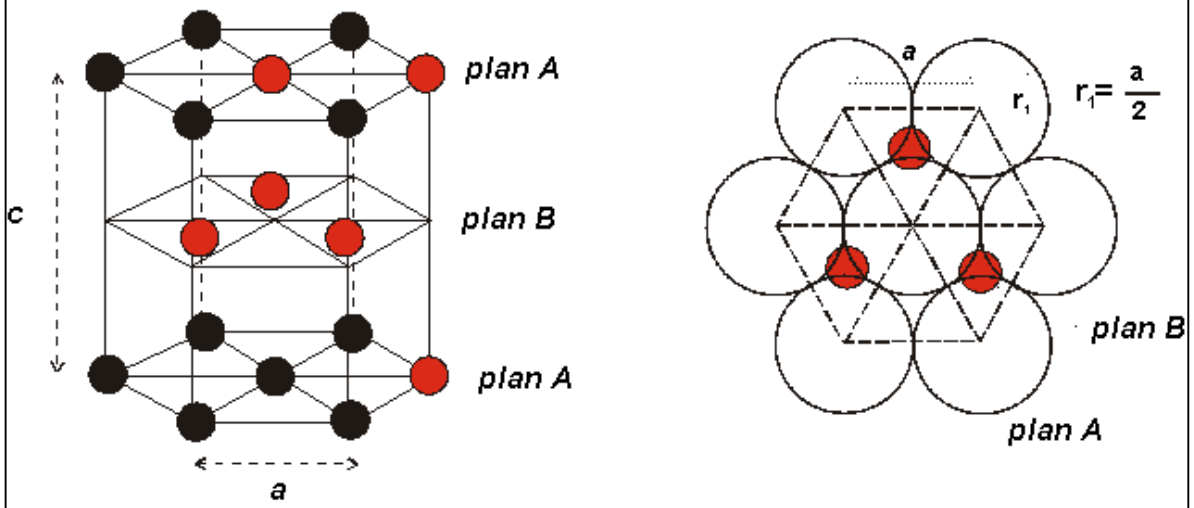


La plupart des métaux cristallisent dans un réseau cubique





structure héxagonale compacte (hc)



6 atomes par maille

Pour un métal donné il peut exister plusieurs formes cristallographiques différentes (formes allotropiques)

Feα bcc

↓ **912°C**

Feγ fcc

↓ **1394°C**

Feδ bcc

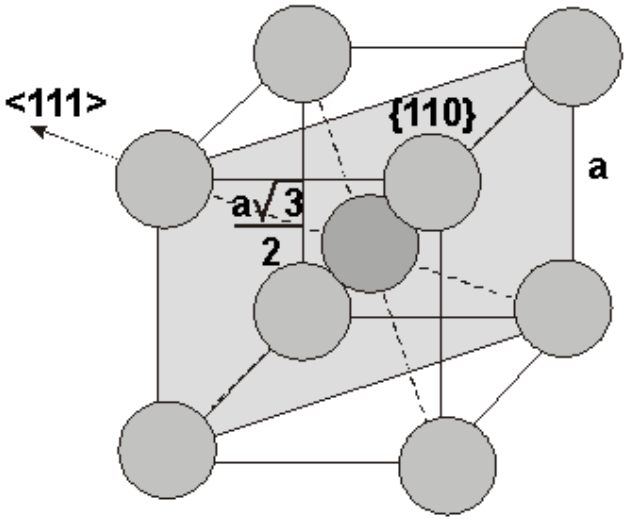
↓ **1538°C**

fusion

Li CC	Be HC												
Na CC	Mg HC	Al CFC											
K CC	Ca CFC CC	Sc CFC HC	Ti HC CC	V CC	Cr CC	Mn Cubique	Fe CC CFC	Co HC CFC	Ni CFC	Cu CFC	Zn HC	Ga Ortho.	
Rb CC	Sr CFC HC CC	Y HC	Zr HC CC	Nb CC	Mo CC	Te HC	Ru HC	Rh CFC	Pd CFC	Ag CFC	Cd HC	In Quad.	Sn Quad.
Cs CC	Ba CC	La HC CFC	Hf HC CC	Ta CC	W CC	Re HC	Os HC	Ir CFC	Pt CFC	Au CFC	Hg Hex.	Tl HC CC	Pb CFC
Fr	Ra	Ac CFC	Th CFC CC	Pa Quad.	U Ortho. Quad. CC	Np Ortho. Quad.	Pu Ortho. CFC Quad.						

Structure Cubique Centrée (bcc)

Im/3m



2 atomes par maille

Coordinence : 8

plan dense : {110}

rayon atomique : $R = a\frac{\sqrt{3}}{4}$

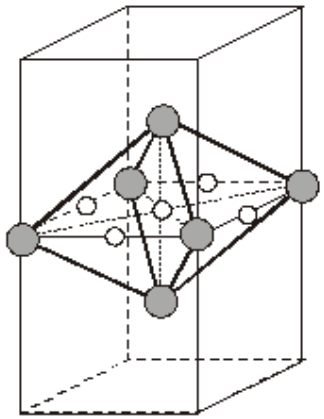
taux de remplissage : 0,68

structure non compacte

8 premiers voisins à : $\frac{a\sqrt{3}}{2}$ (2R)

6 seconds voisins à : a (2,309R)

Sites interstitiels

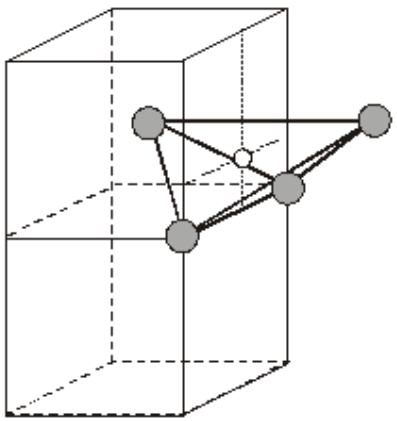


Sites octaédriques

6 par mailles (symétrie tétragonale)

centres des faces (½ ½ ½)
milieux des arêtes (0 0 ½)

R_O =0,067a = 0,15R



Sites tétraédriques

12 par mailles

sur les faces, à mi-distance des sites octaédriques

(1/4, 1/4, 0)

R_T =0,126a = 0,288R > R_O

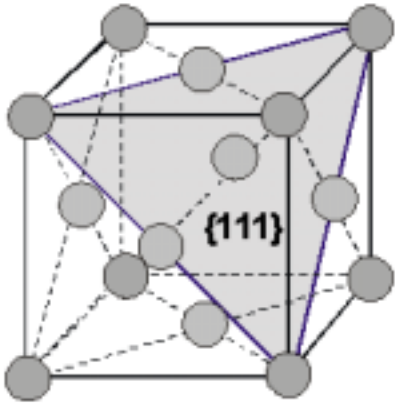
métaux alcalins et de transition :

V, Cr, Nb, Mo, W, Ta

Feα, Tiβ, Zrβ

Structure Cubique Faces Centrées (fcc)

Fm3m



4 atomes par maille

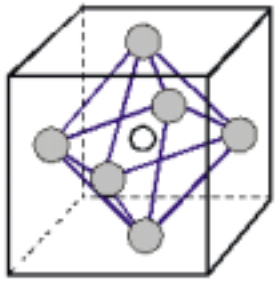
Coordinence : 12

plans denses (4) : {111}
directions denses (3) : <111>
soit 12 types de directions denses

rayon atomique : $R = \frac{a}{2\sqrt{2}}$

taux de remplissage : 0,74
structure compacte

Sites interstitiels

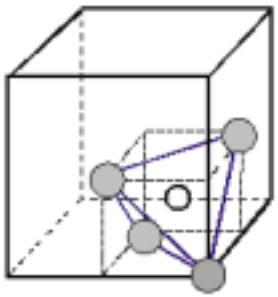


Sites octaédriques

4 par mailles (au cnetre d'un octaédre)

centres du cube (0 0 0)
milieux des arêtes (0 0 ½)

$R_O = 0{,}147a = 0{,}414R$



Sites tétraédriques

8 par mailles

au centre d'un tétraédre régulier

(1/8, 1/8, 1/8)

$R_T = 0{,}08a = 0{,}225R$

empilement de plans compacts décalés de (a/6)<112>
(3 types de plans)

ABCABCABCAB.....

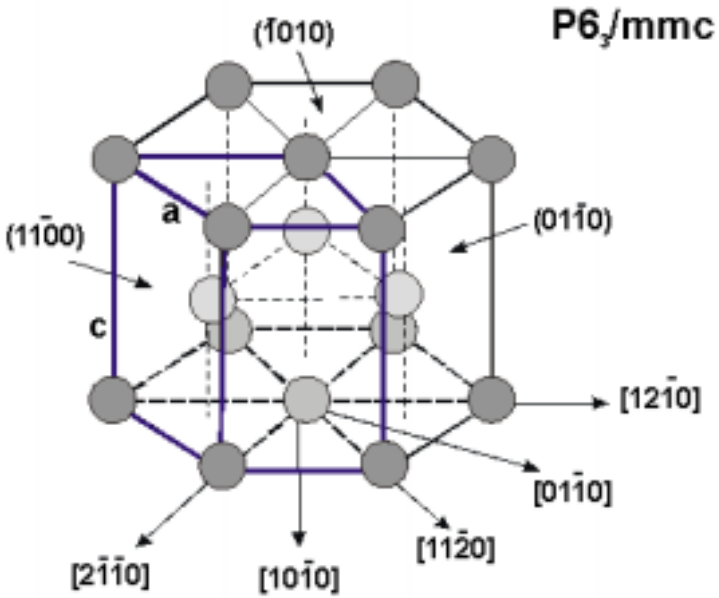
12 premiers voisins à : $\frac{a}{\sqrt{2}}$

6 seconds voisins à : a

24 seconds voisins à : $a\sqrt{3/2}$

métaux nobles : Cu, Ag, Au,
de fortes valence : Al, Pb
de transition du groupe VII : Co, Ni, Rh, Pd, Ir, Pt
Feγ

Structure Héxagonale compacte (hc ou hcp)



2 atomes par maille (0,0,0) et (2/3,1/3,1/2)
prisme droit à base losange :
côté a, hauteur c, angles 60 et 120°

rayon atomique : $R = \frac{a}{2}$

taux de remplissage : 0,74

structure compacte

6 premiers voisins dans le plan de base à : a

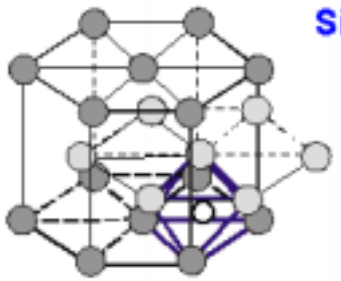
6 seconds voisins à : d

$$d^2 = \left[\frac{c}{2}\right]^2 + \left[\frac{2}{3}\,\frac{a\sqrt{3}}{2}\right]^2$$

c/a idéal (compact) si d=a soit c/a=1,633

Sites interstitiels

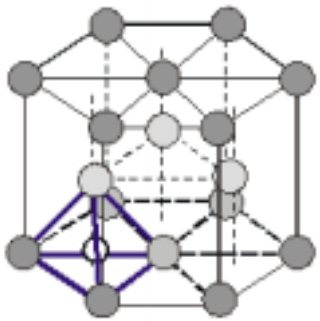
identiques à ceux de la structure cfc



Sites octaédriques

½ ½ ½ ¼

$R_O = 0{,}207a = 0{,}414R$



Sites tétraédriques

au centre d'un tétraédre régulier

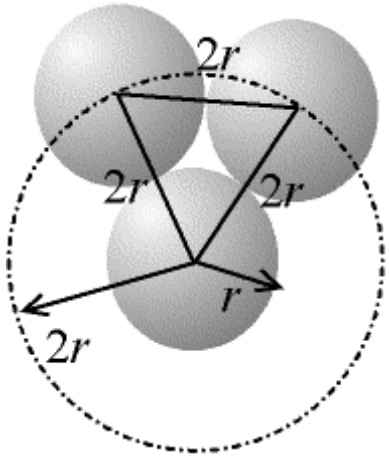
à $\frac{a\sqrt{3}}{2\sqrt{2}}$ de ses 4 voisins

$R_T = 0{,}112a = 0{,}225R$

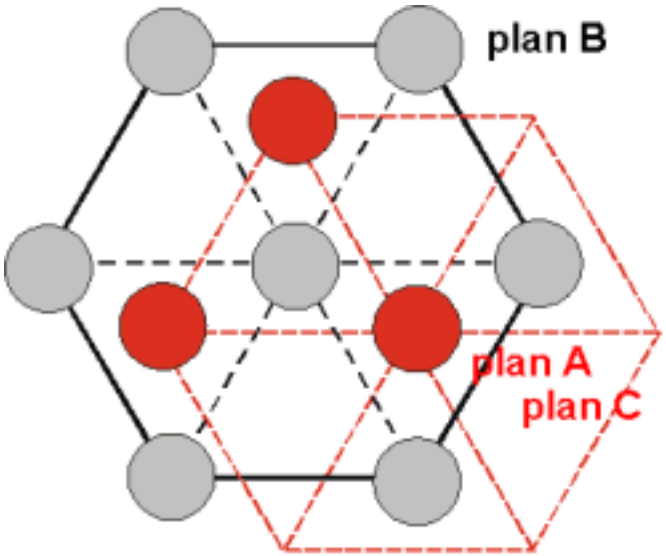
empilement de plans compacts parallèles à (0001)
(2 types de plans) ABABABAB.....

c/a presqu'idéal (1,623) Mg, Co
c/a >1,633 : Cd, Zn
c/a <1,633 : Tiα, Zrα, Be

Le taux de remplissage de l'espace de la structure bcc est de 68%
Celui des structures fcc et hc est de 74% (taux maximum) :
ce sont des structures compactes

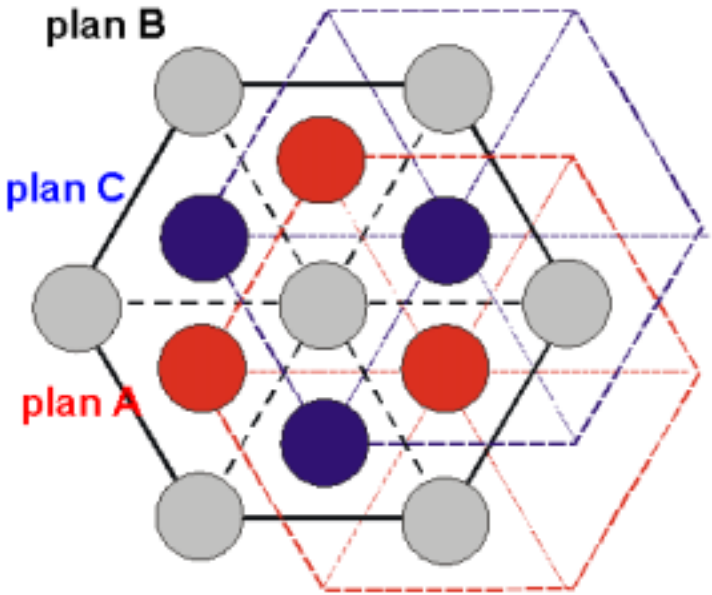


Elles ne diffèrent que par la succession des plans cristallographiques



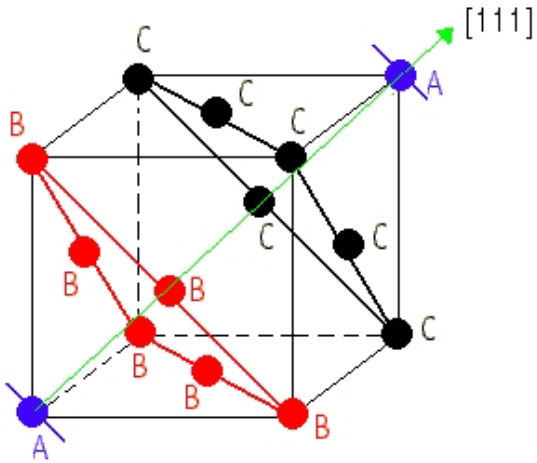
Structure héxagonale compacte

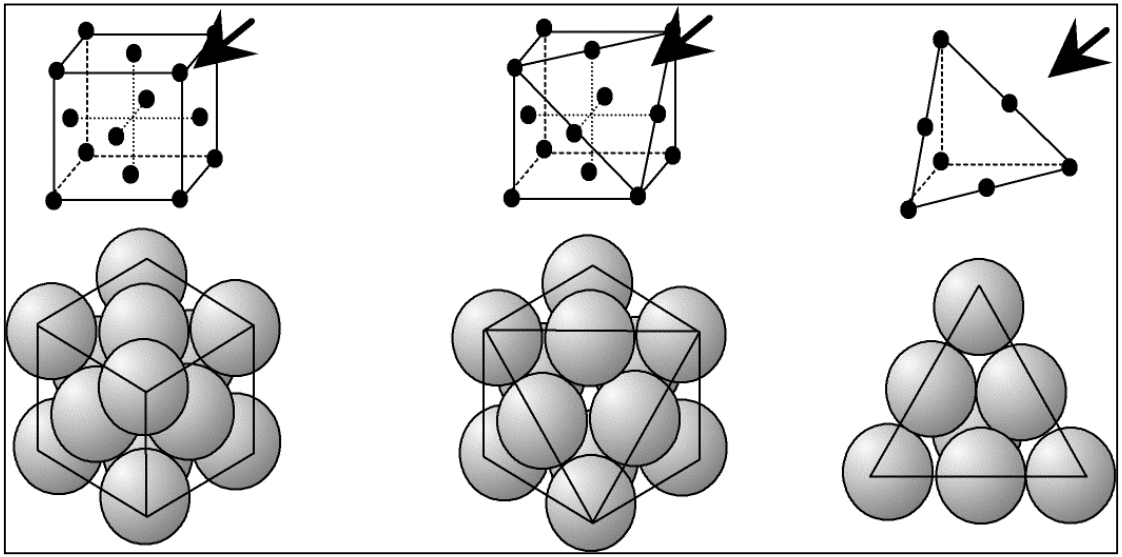
ABABAB....



Structure cubique faces centrées

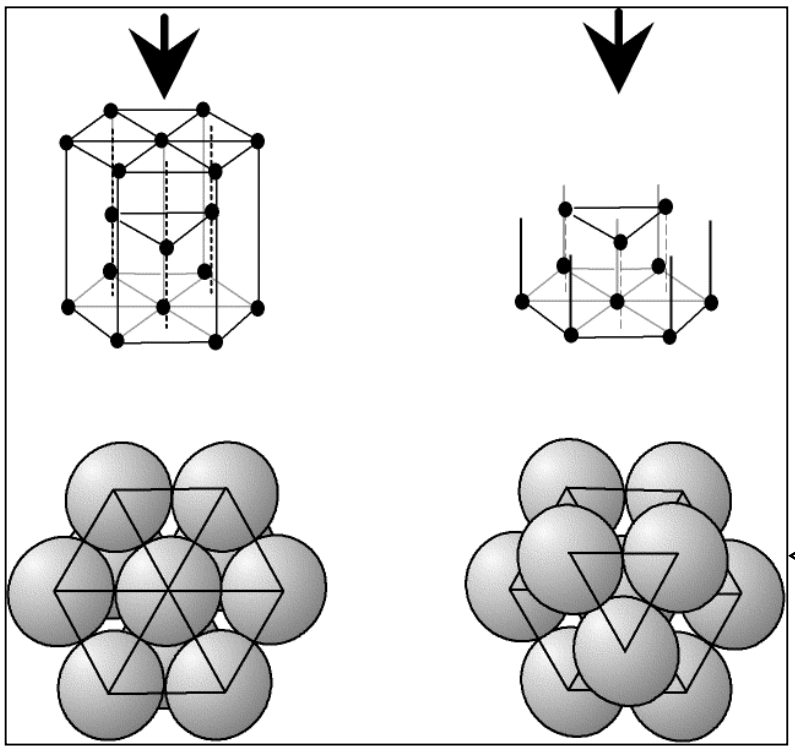
ABCABCABC...





structure cfc

ABCABCABC…



observation des différentes familles de plans cristallographiques par « abrasion » successives selon la direction [111] (cfc) et [001] (hc)

structure hc

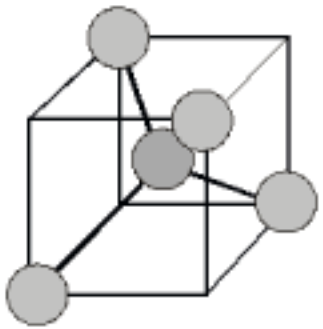
ABABAB…

Autres structures...

Structure diamant

Fd3m

réseau cfc



motif : 2 atomes (0,0,0) et 1/4,1/4,1/4)

8 atomes par maille
coordinence : 4 ($a\sqrt{3/4}$)
(tétraédre régulier)

taux de remplissage : 0,34
empilement de plans {111}
distants de $a/4\sqrt{3}$ et $a/\sqrt{3}$

$A\alpha B\beta C\gamma A\alpha$....

C, Si, Ge, Snα (étain gris)

Indium : structure tétragonale à faces centrées (cfc distordue)

Mercure : structure rhomboédrique

Etain blanc (Snα) structure cubique diamant distordue

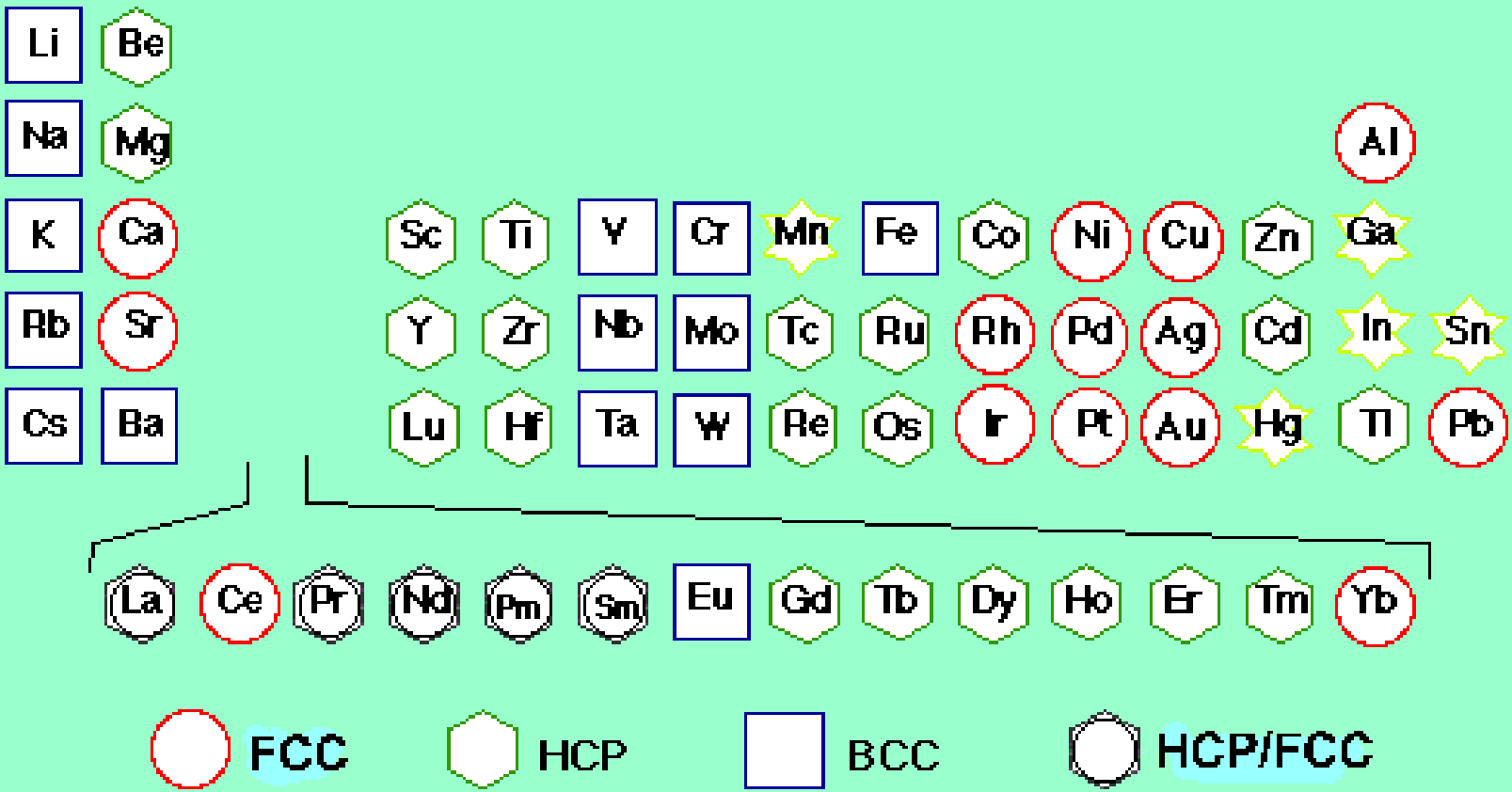
Manganèse : 4 structures
Mnα (<742°C) cubique à 29 atomes par maille

Uranium :
Uγ (>770°C) cubique
Uβ : tétragonale à 30 atomes par maille
Uα (<663°C) orthorhombique

Plutonium :
6 variétés allotropiques.

la variétés des structure allotropiques de l'U et du Pu pose des problèmes pour la fabrication du combustible nucléaire, d'où l'uitilation généralement d'oxyde de structure cfc

Structure Cristallographique des métaux



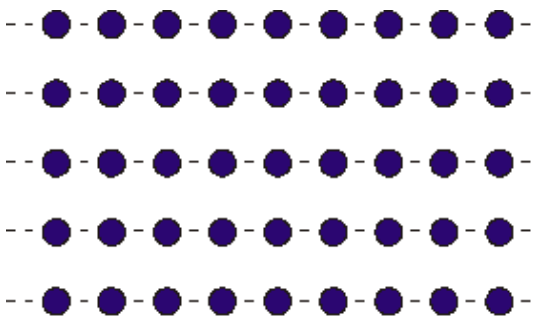
diverses formes allotropiques…

Quelques rappels sur les défauts cristallographiques

défaut :
- échelle macroscopique : défaut d'homogénéité
- échelle atomique : dû à l'absence ou au déplacements d'atomes

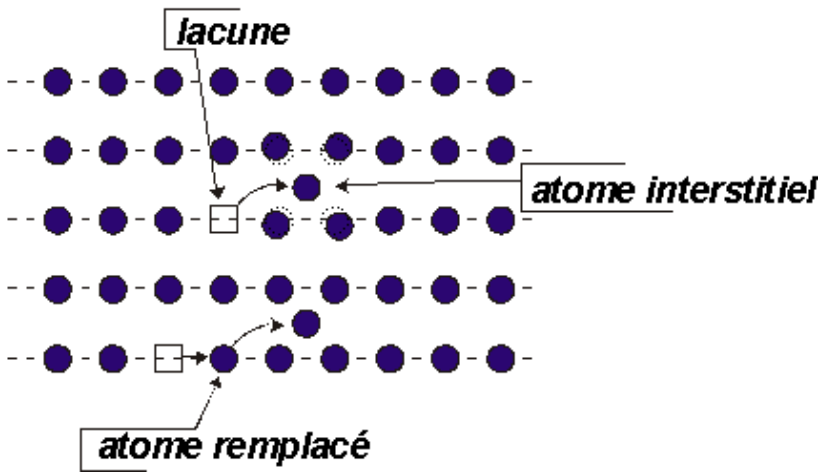
ordre 0 (0D) : défaut ponctuel (lacune et interstitiel)
ordre 1 (1D) : défaut linéaire (dislocations)
ordre 2 (2D) : surface libre, défaut plan…
ordre 3 (3D) : ségrégations, cavités, fissures, inclusions …

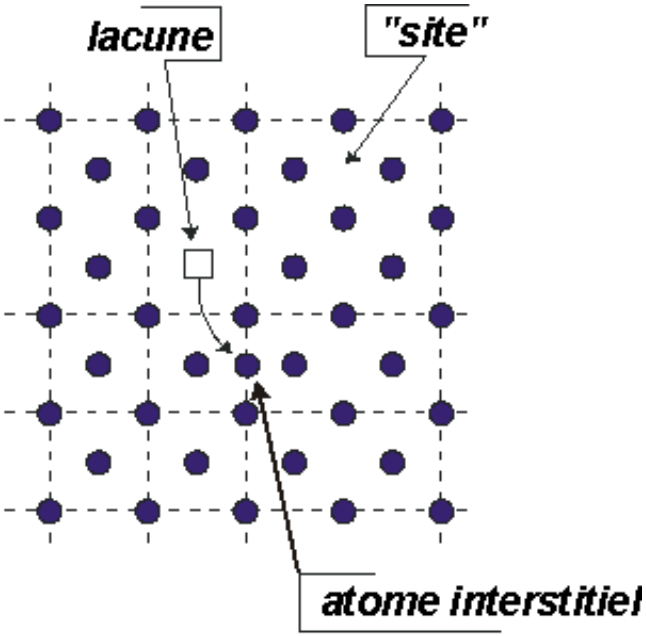
Les défauts ponctuels

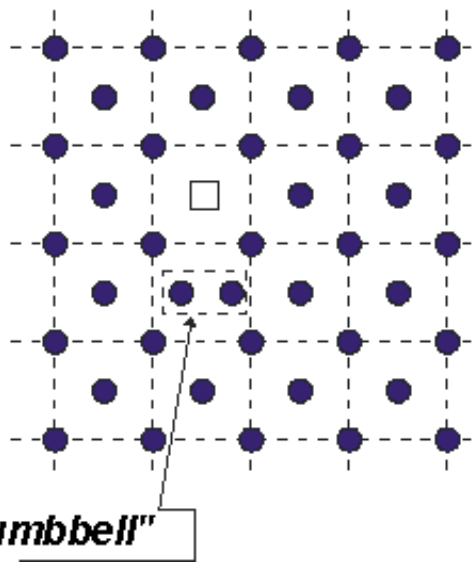


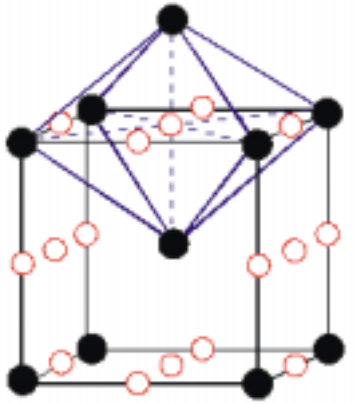
réseau parfait

lacune : site non occupé
interstitiel : atome hors d'un site
remplacé : atome occupant un autre site que son site originel

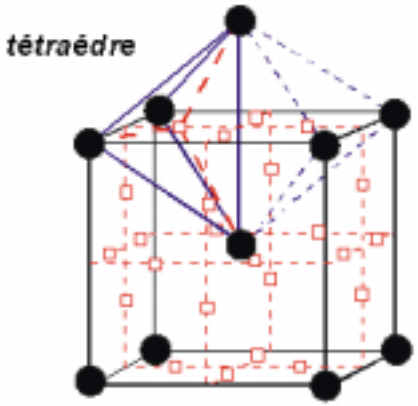






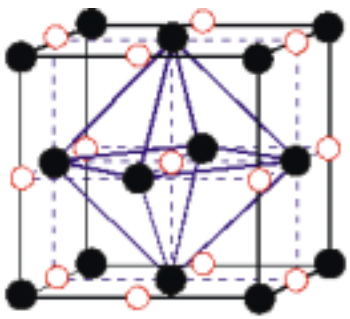


sites octaèdriques possibles

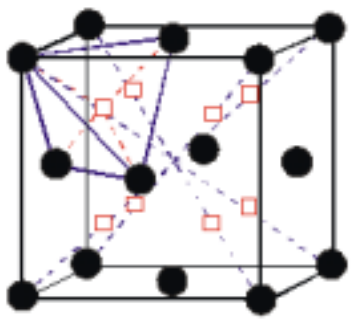


sites tétraèdriques possibles

Structure cubique centrée (cc ou bcc)

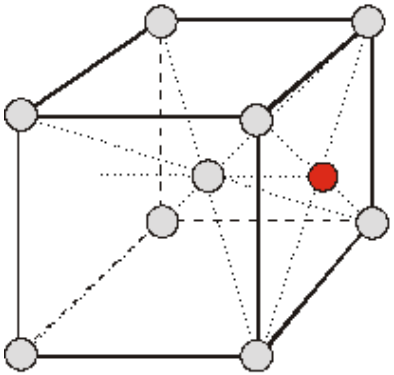


sites octaèdriques possibles

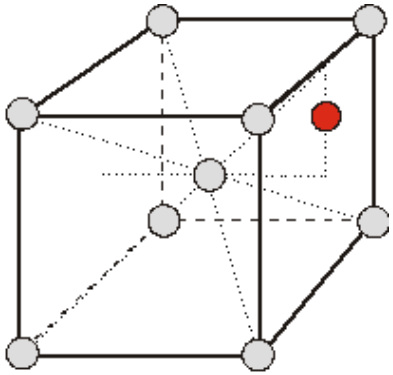


sites tétraèdriques possibles

Structure cubique faces centrées (cfc ou fcc)

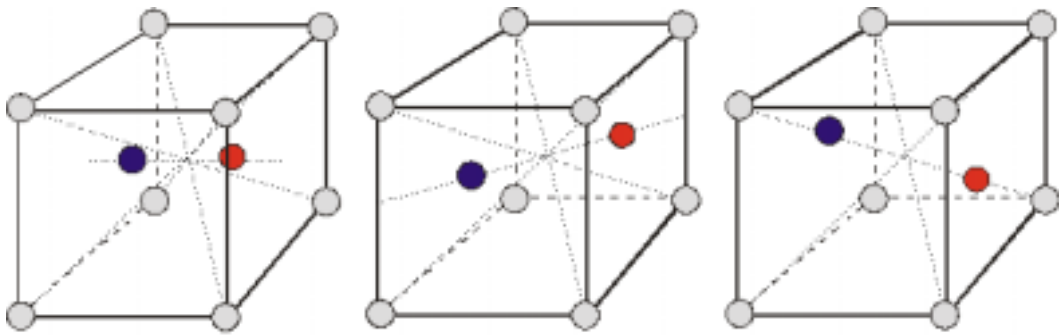


site octaédrique



site tétraédrique

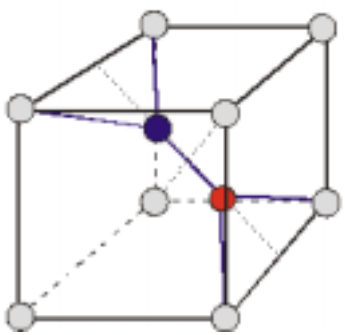
atome interstitiel de petite taille



dumbbells possibles

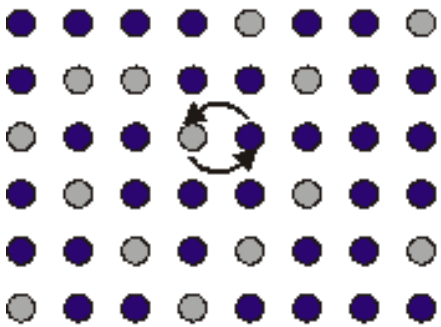
Lorsque l'atome interstitiel est de grande taille il déforme le réseau et forme avec un atome d'un site un « dumbbell » :
les 2 atomes occupent un site cristallin

dumbbell observé

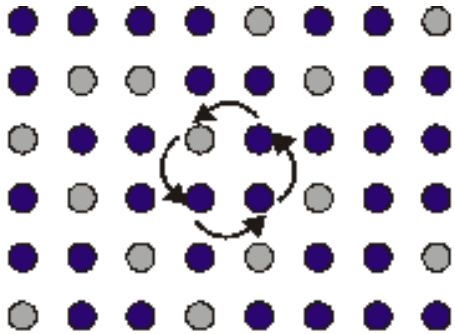


défauts ponctuels : diffusion atomique

les différents mécanismes

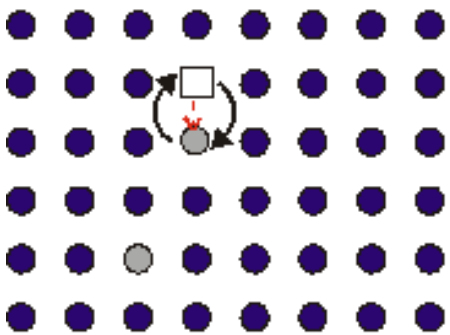


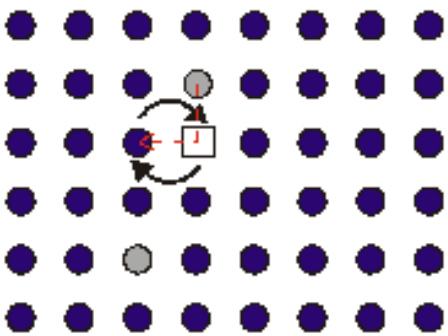
échange directe

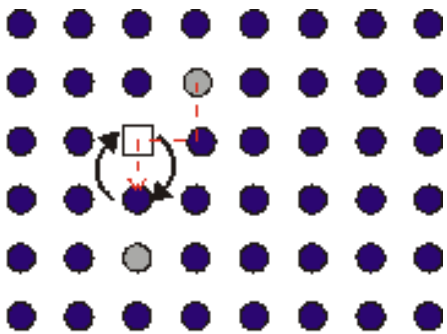


échange cyclique

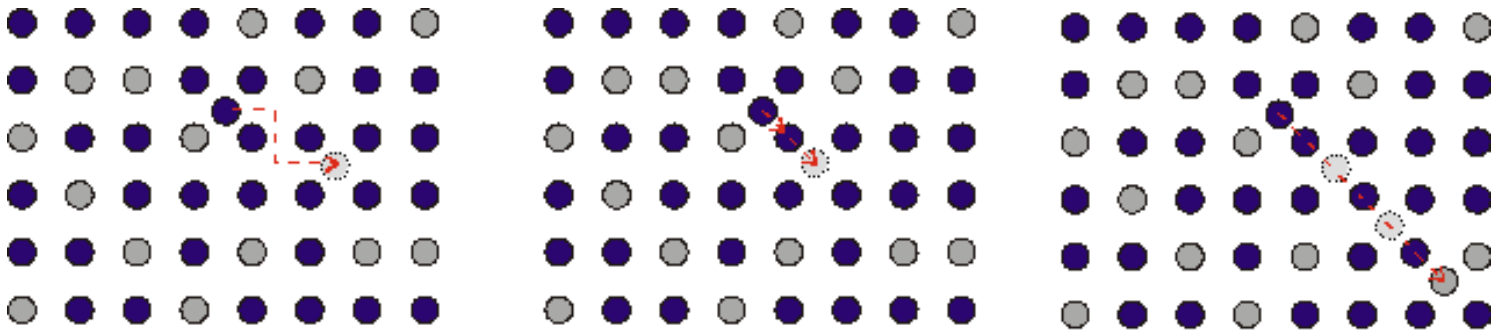
très peu probable







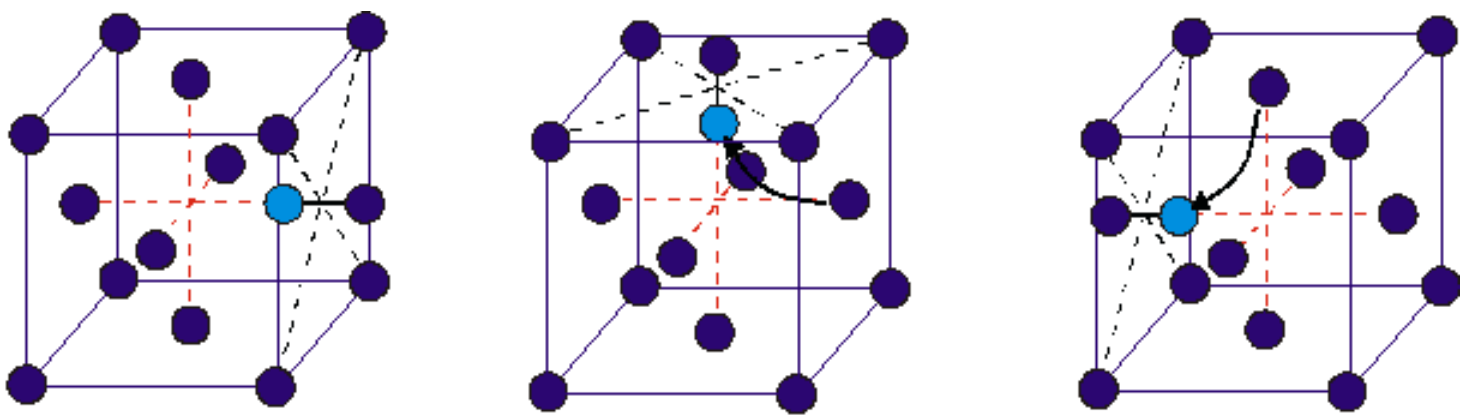
mécanisme lacunaire



mécanisme interstitiel direct

mécanisme interstitiel indirect

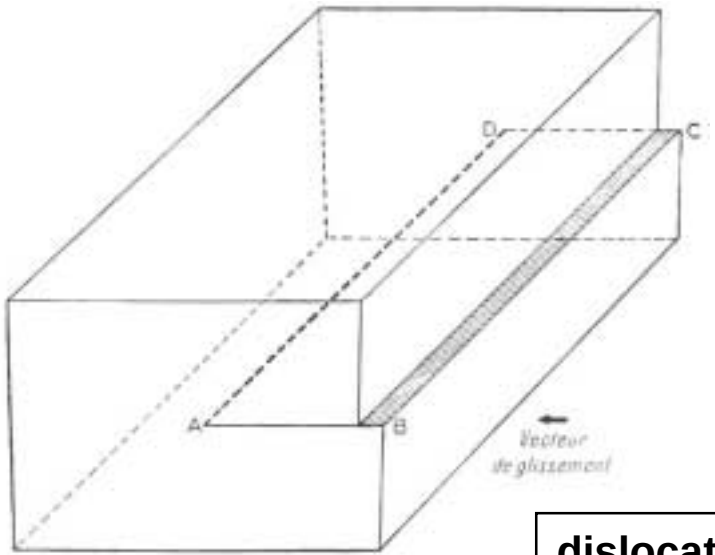
"crowdion"

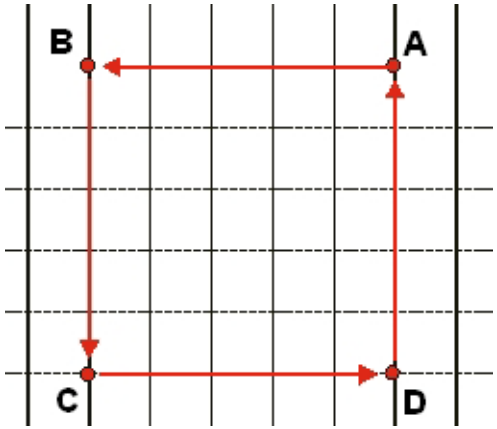


mécanisme interstitiel dissocié dans la structure cfc, le long de [110]

dumbbell ou haltère

Les défauts linéaires : les dislocations

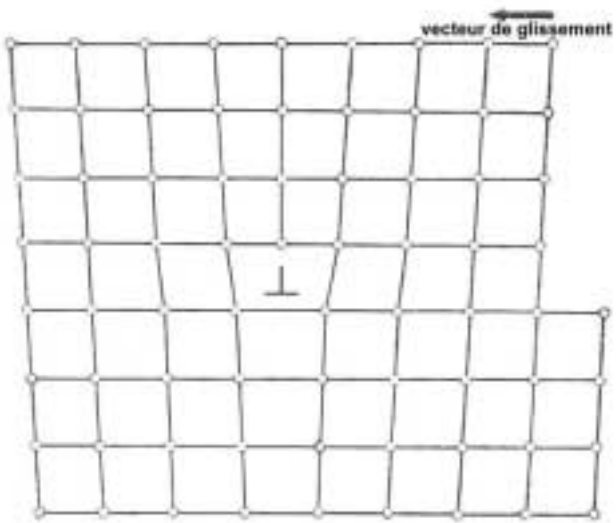


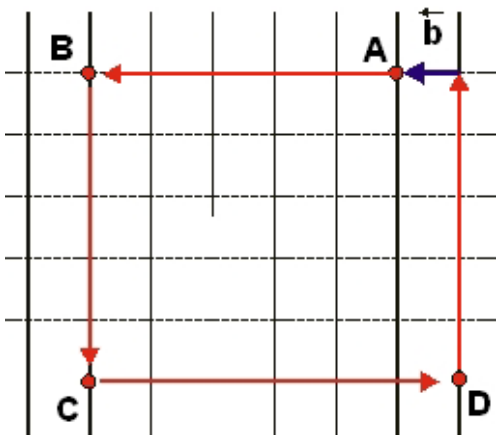


cristal parfait

dislocation coin

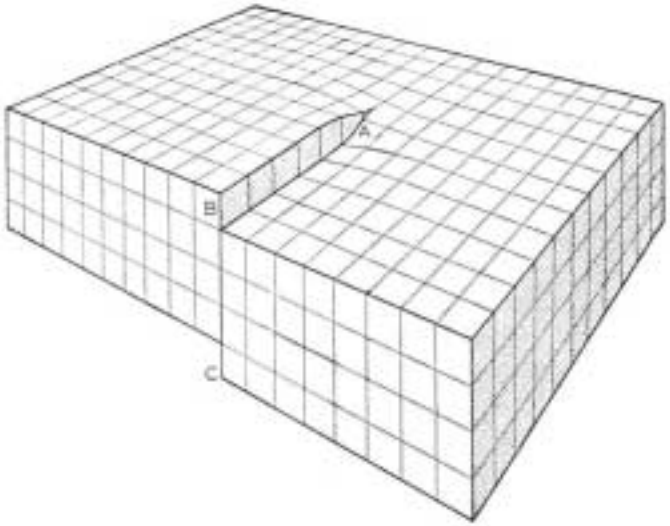
cristal simple

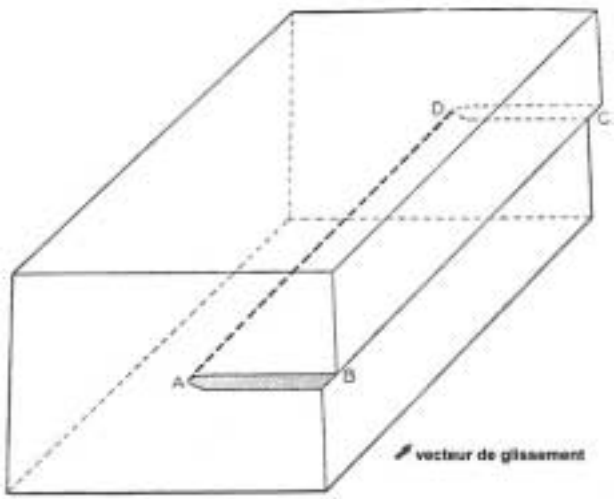


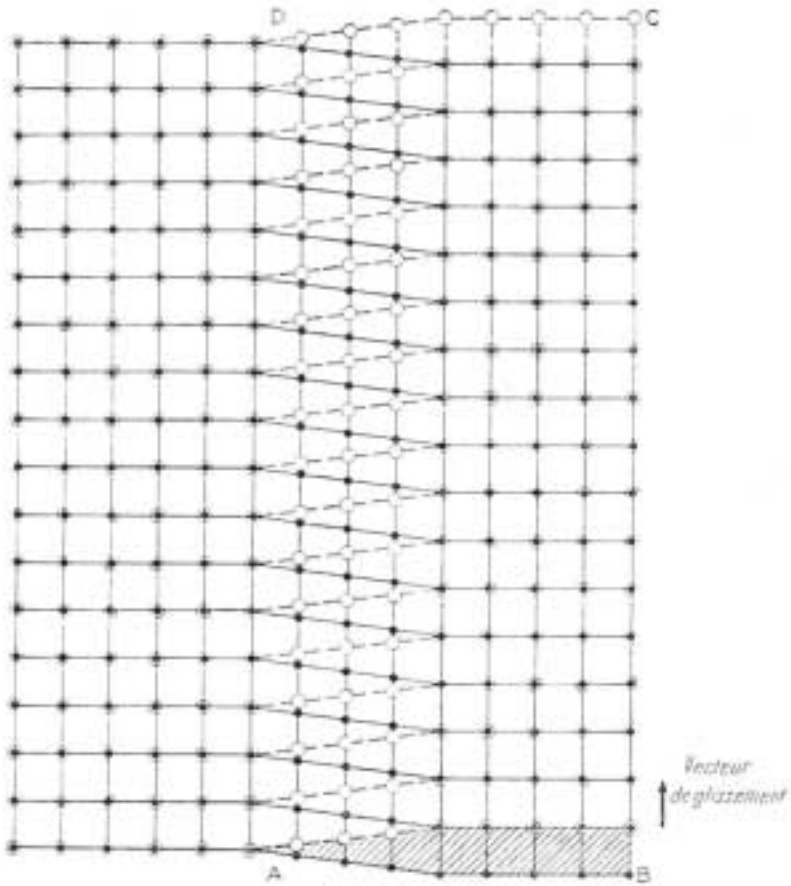


cristal imparfait

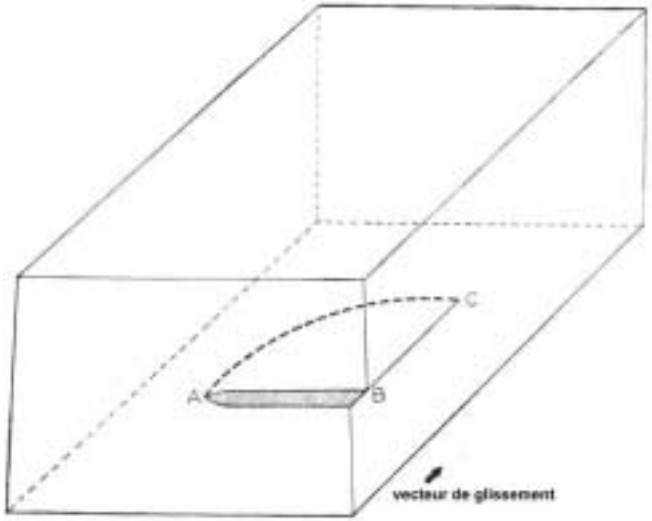
la dislocation est définie par son vecteur de Burgers

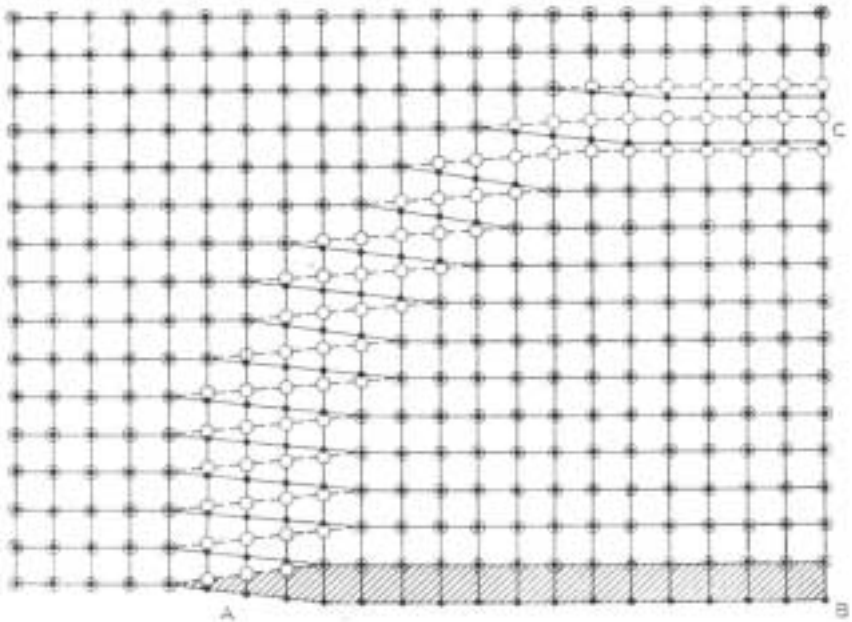






dislocation vis





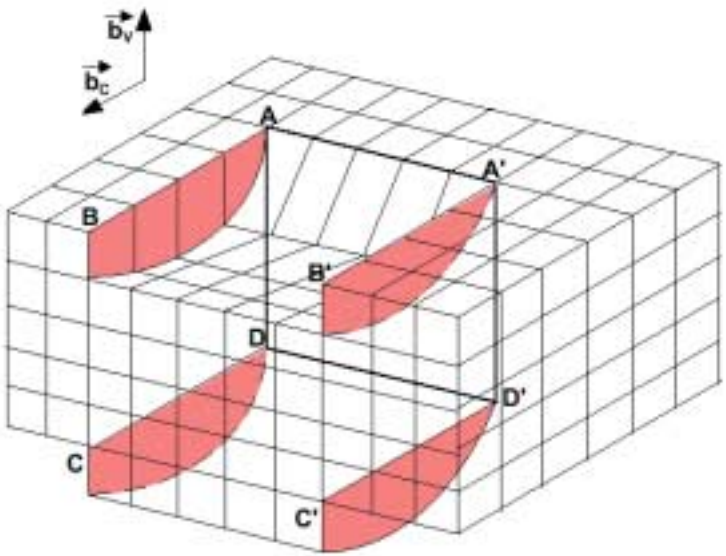
coin pur

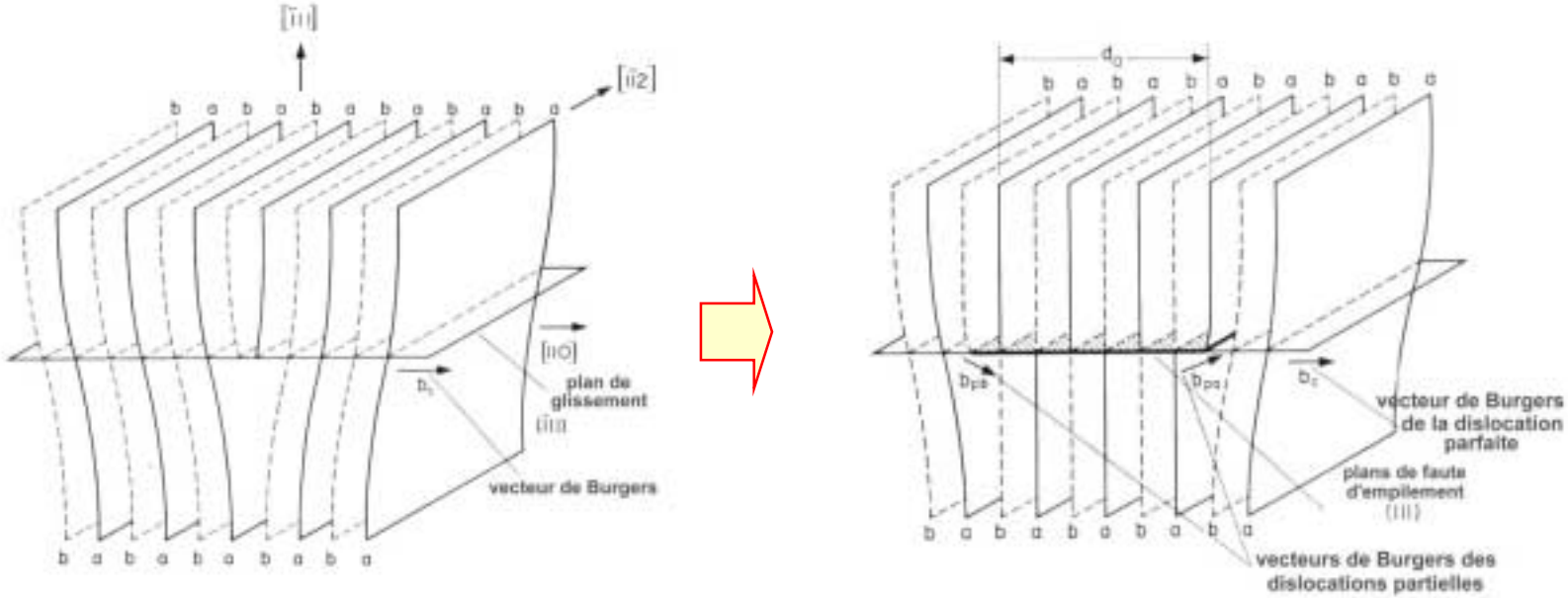
dislocation mixte

vis pur

➔ boucle de dislocation

AA’ : coin
A’D’ : vis
D’D : coin
DA : vis





dislocation coin dans un cubique faces centrées :
la dislocation se devise en 2 dislocations partielles

cubique simple : **<100> 3 vecteurs a[100] (longueur a)**

cubique centré : **<111> 4 vecteurs** $\frac{a}{2}[111]$ **(longueur** $a\frac{\sqrt{3}}{2}$ **)**

cubique faces centrées : <110> 6 vecteurs $\frac{a}{2}[110]$ **(longueur** $a\frac{1}{\sqrt{2}}$ **)**

structure hexagonal compacte

Type	AB	ST	SA/TB	Aσ	σS	AS
Direction	$[11\bar{2}0]$	$[000\bar{1}]$	$[11\bar{2}3]$	$[\bar{1}100]$	$[0001]$	$[\bar{2}203]$
Longueur	a	c	$\sqrt{(c^2+a^2)}$	$a/\sqrt{3}$	$c/2$	$\sqrt{\left(\frac{a^2}{3}+\frac{c^2}{4}\right)}$

Mouvement des dislocations

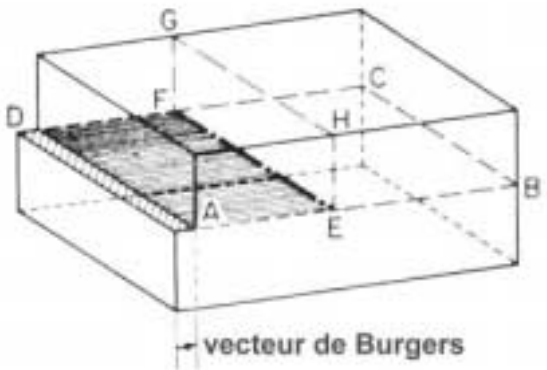
mouvement conservatif (sans déplacement de matière) : glissement
mouvement non-conservatif (avec déplacement de matière) : montée

1) Glissement (glide)

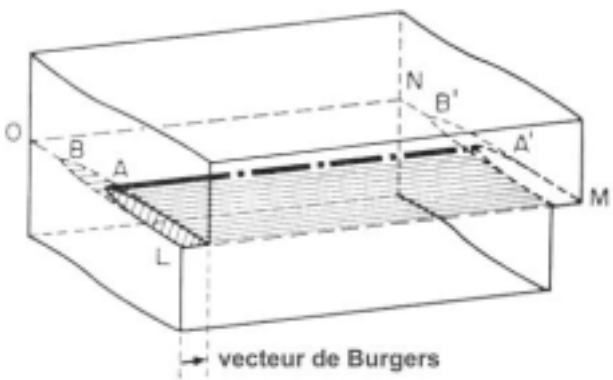
Sous l'effet d'une contrainte appliquée, la ligne de dislocation peut se déplacer dans un plan (« plan de glissement » ou slip plane) et dans une direction particulière.
Les plans de glissement sont généralement des plans de haute densité et les directions, des directions denses.

structure	direction de glissement	plan de glissement
cfc	<11O>	{111}
bcc	<111>	{110] {112} {123}
hc	$<11\bar{2}0>$	(0001)
quadratique	<001>	{100} {110}

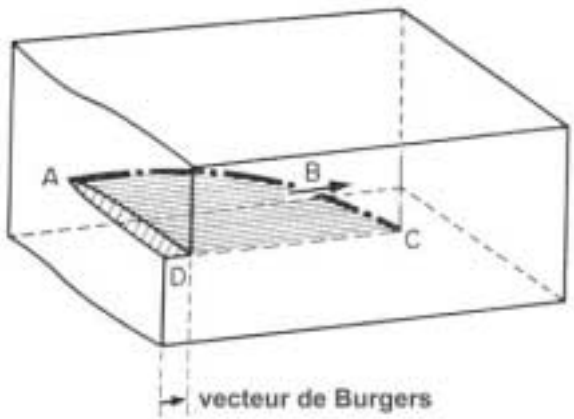
la structure cubique faces centrées possède 4 plans {111} et 3 directions <110> soit 12 systèmes de glissement différents…

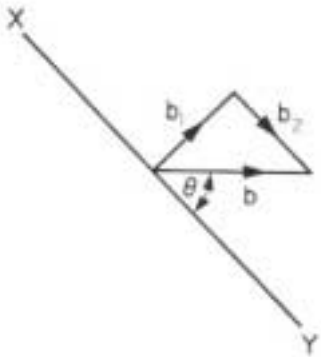


dislocation coin :
le plan de glissement est défini par le vecteur de Burgers et la ligne de la dislocation



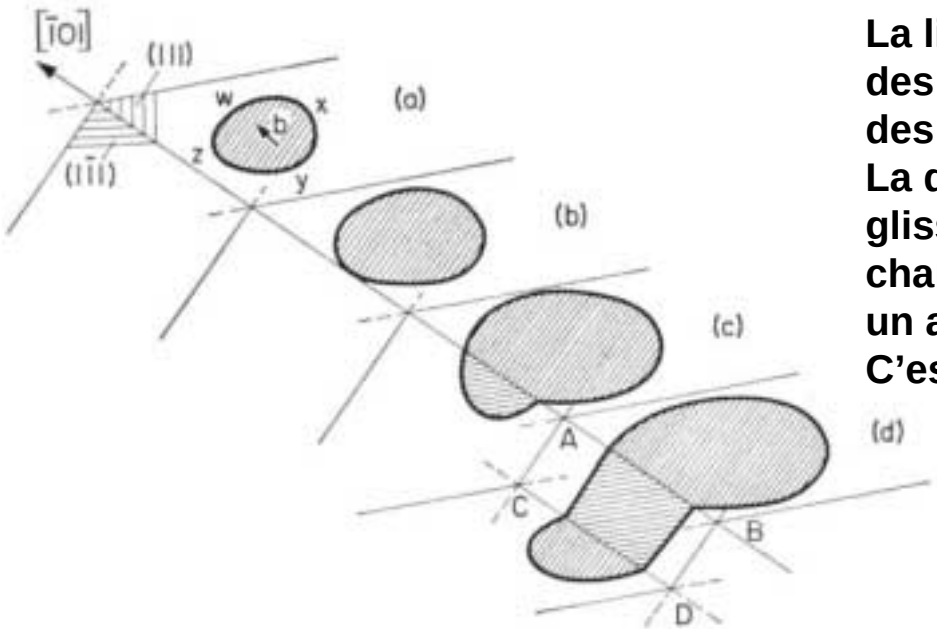
dislocation vis :
le vecteur de Burgers et la ligne de la dislocation étant parallèles, le plan de glissement n'est pas défini la dislocation vis peut glisser librement





Dans le cas d'une dislocation mixte le vecteur de Burgers peut se décomposer en une composante coin b1 et une composante vis b2

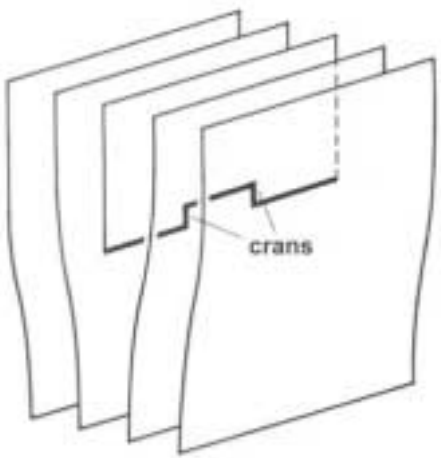
2) Le glissement dévié (cross-slip)



La ligne de dislocation xyzw possède des composantes coin pures (y et w) et des vis pures (x et z).
La dislocation vis n'ayant pas de plan de glissement associé défini, elle peut changer de direction lorsqu'elle rencontre un autre plan de glissement (c et d)
C'est le glissement dévié.

3) La montée (climb)

déplacement de la dislocation par apport ou perte de matière (par diffusion de lacunes ou d'interstitiels)



Une conséquence peut être l'apparition de crans (jogs) sur la ligne de dislocation.

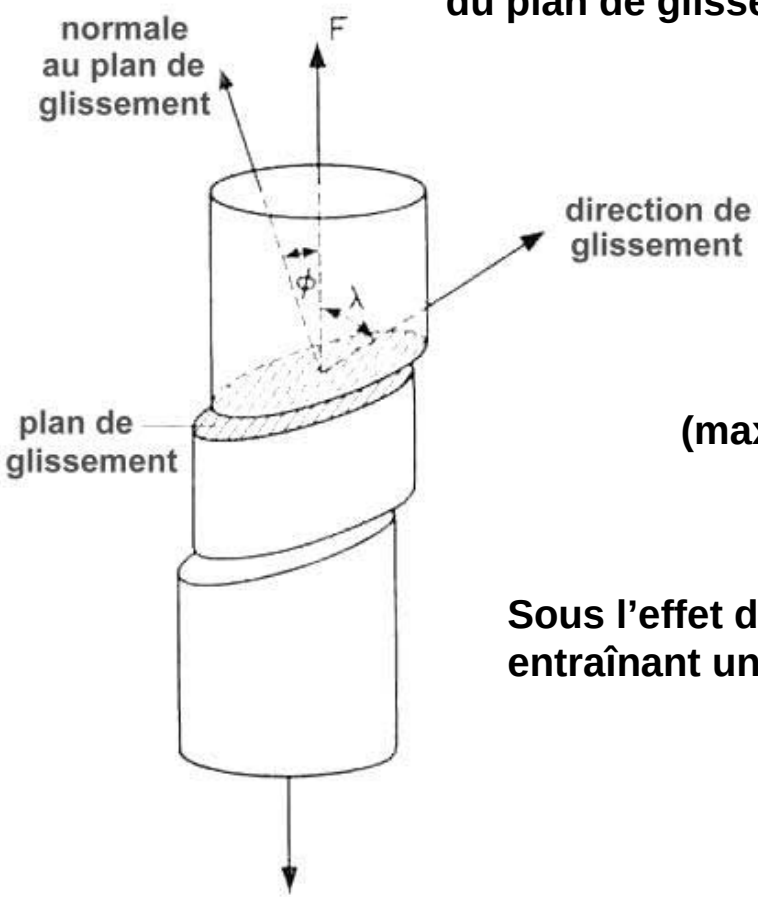
nombre de crans par unité de longueur

$$n_j = n_0 \exp\left(-\frac{U_j}{kT}\right)$$

énergie de formation d'un cran (1eV)

nombre d'atomes par site et unité de longueur

Origine du déplacement



une force F appliquée au cristal entraîne l'apparition d'une contrainte de cisaillement « résolue » au niveau du plan de glissement (slip plan):

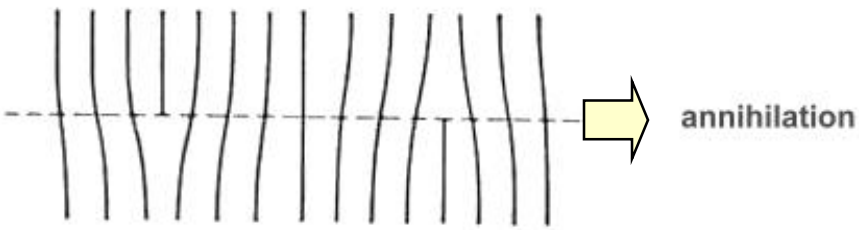
$$\tau = \frac{F}{A}\cos\phi.\cos\lambda$$

$\cos\phi.\cos\lambda$ **est le facteur de Schmidt**

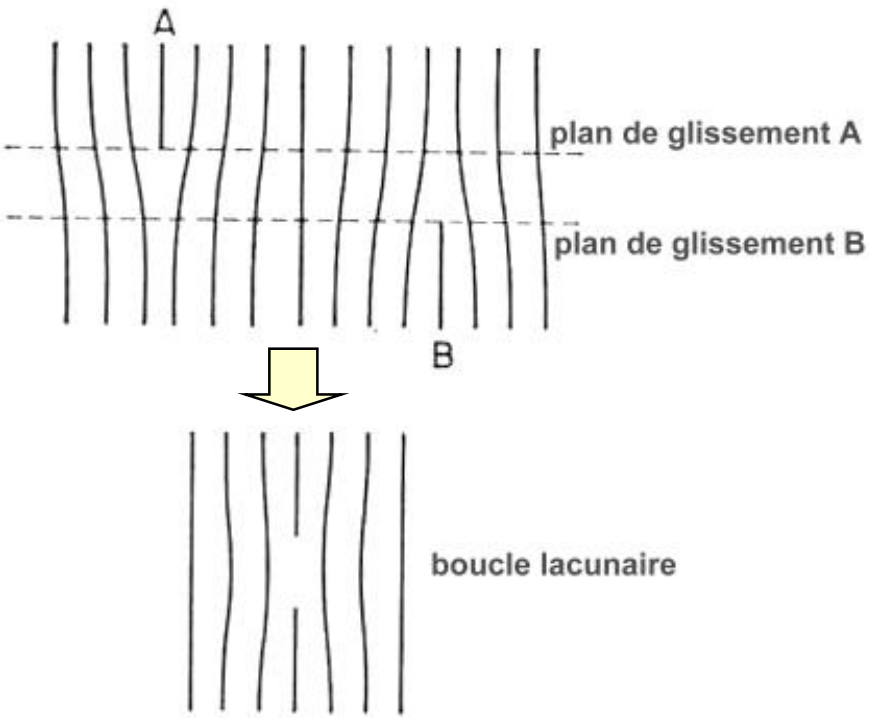
(maximum quand $\phi = \lambda = 45°$, il vaut alors 0,5)

Sous l'effet de cette contrainte, la dislocation se déplace entraînant une déformation plastique (irréversible) du cristal.

Interactions entre dislocations

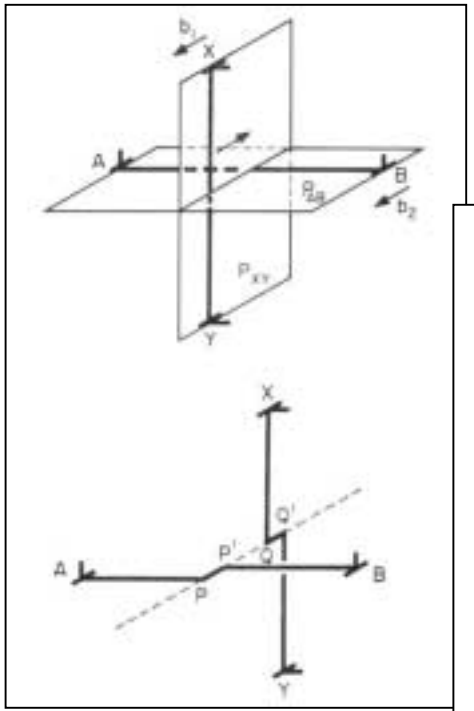


lorsque 2 dislocations de signe opposé ayant même plan de glissement peuvent s'annihiler

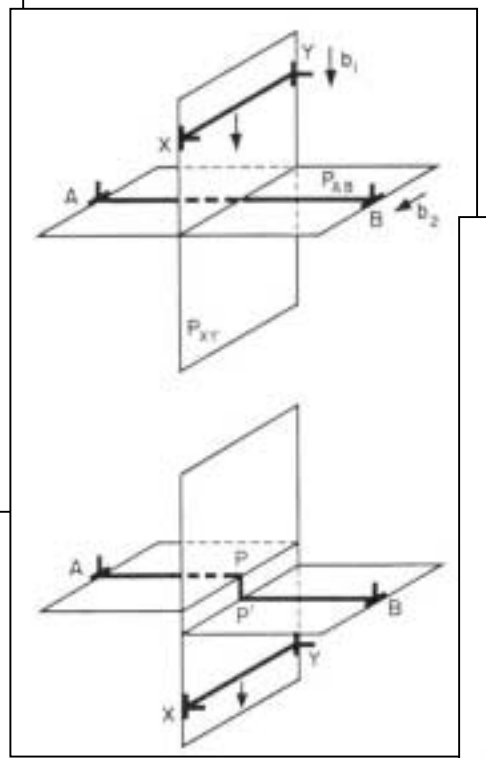


lorsque 2 dislocations de signe opposé mais n'ayant pas le même plan de glissement, elles peuvent s'annihiler mais en laissant soit une boucle lacunaire, soit une boucle interstitielle

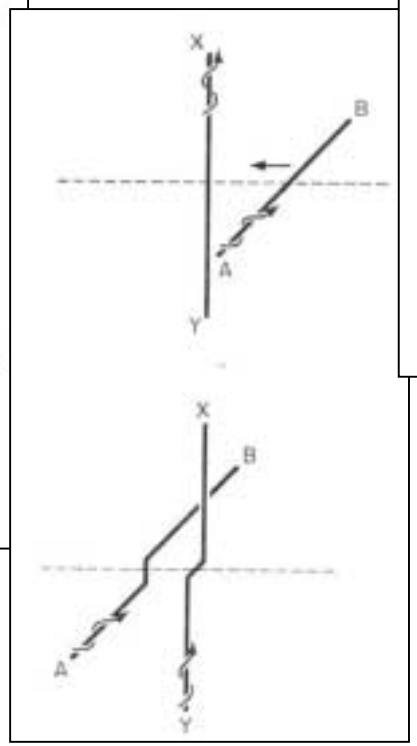
formation de crans par intersection de lignes de dislocations



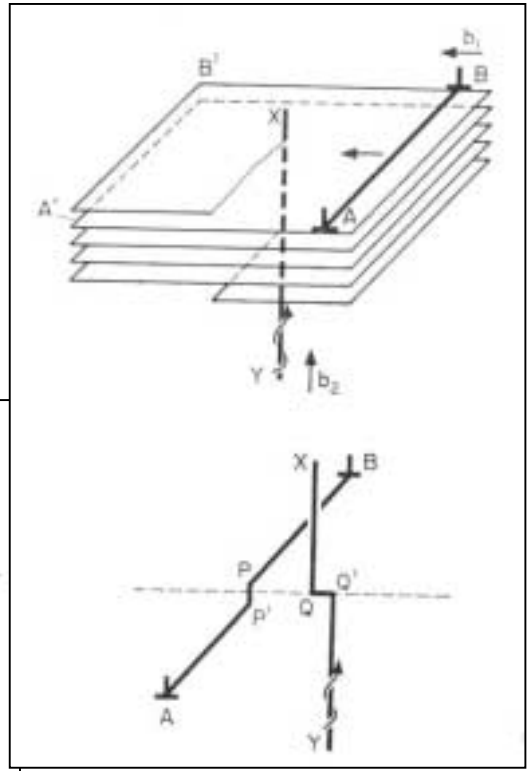
entre 2 dislocations coin de vecteurs parallèles



entre 2 dislocations coin de vecteurs perpendiculaires

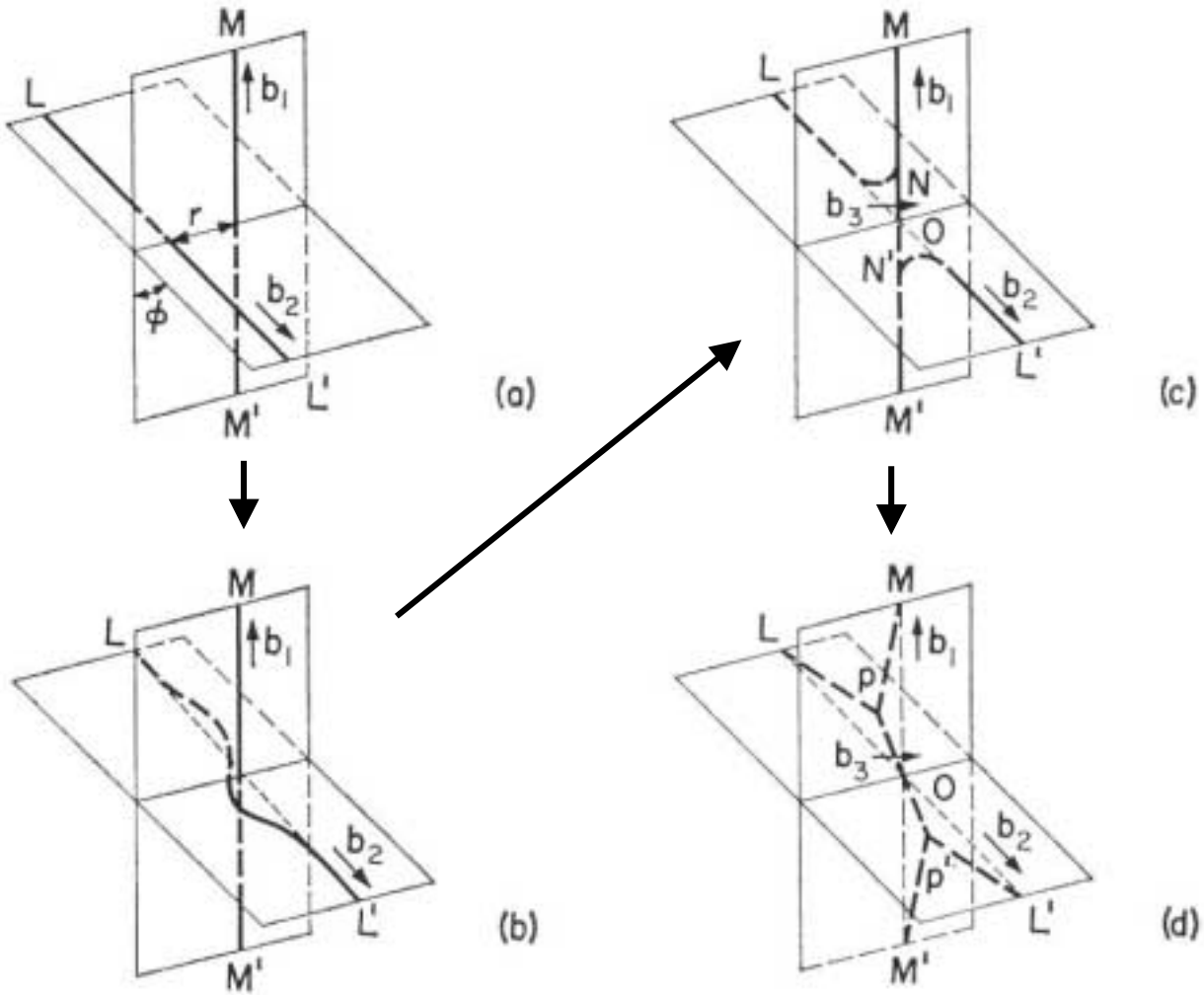


entre 2 dislocations vis

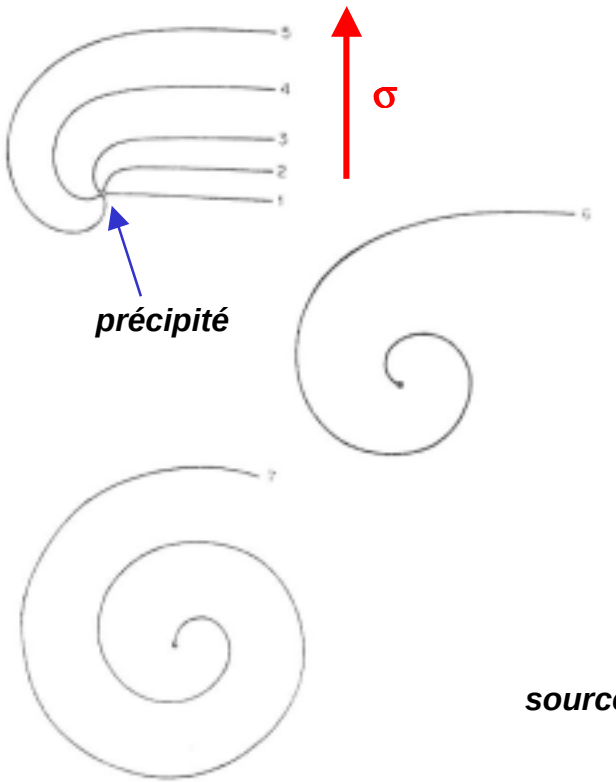


entre une dislocation vis et une dislocation coin

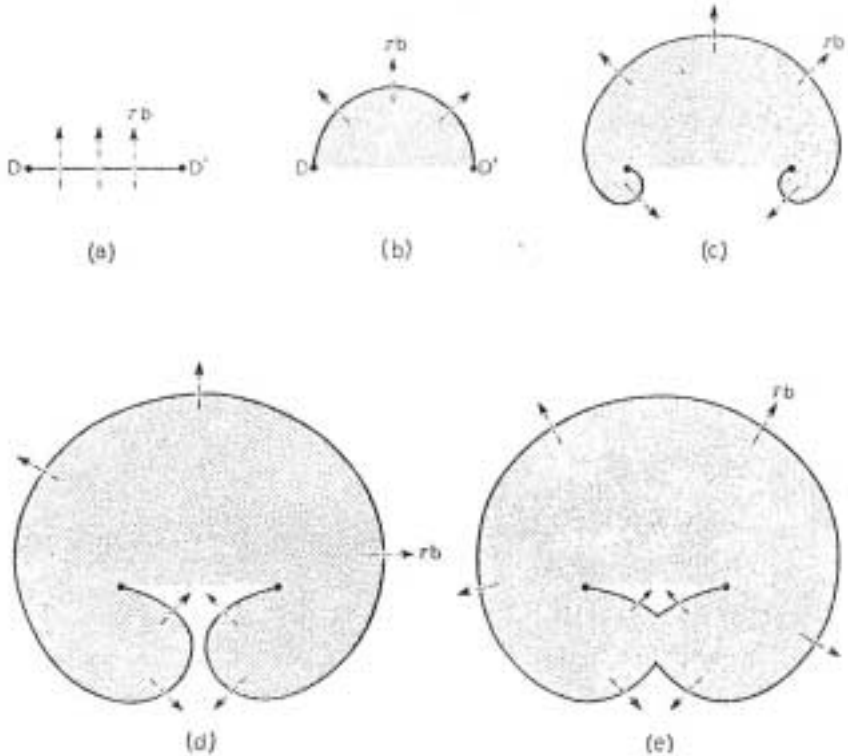
intersections de 2 dislocations : formation de jonctions



Multiplication (sources) de dislocation autour de précipités sous l'action d'une contrainte

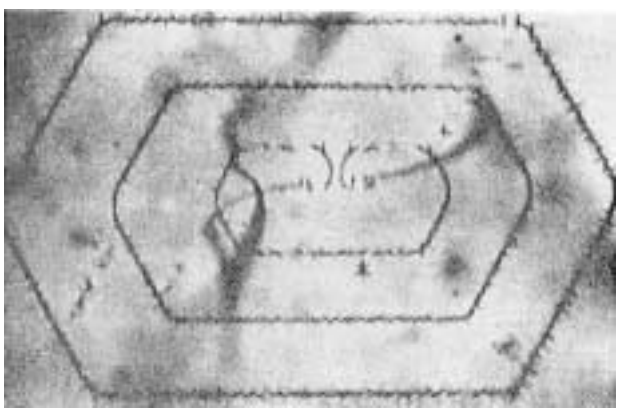


en spirale
(ancrage par un précipité)

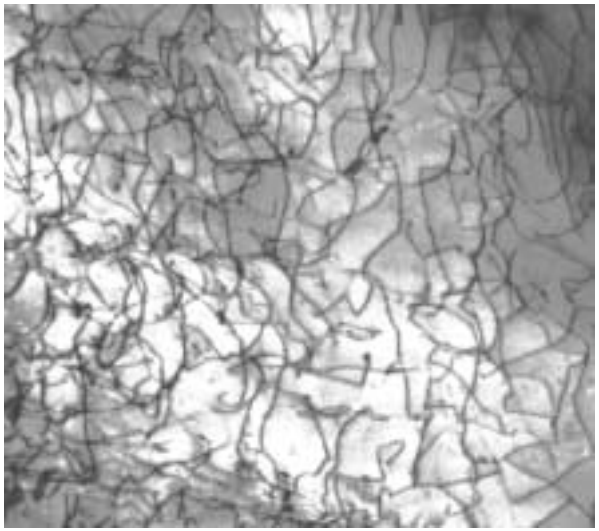


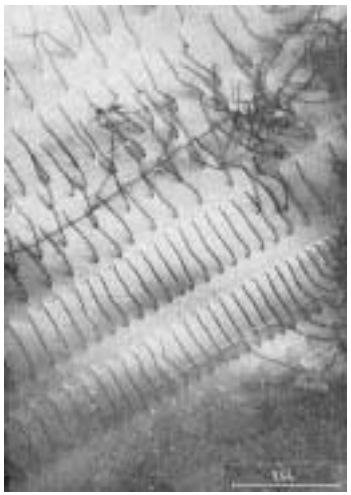
source de Franck-Read
(ancrage par 2 précipités)

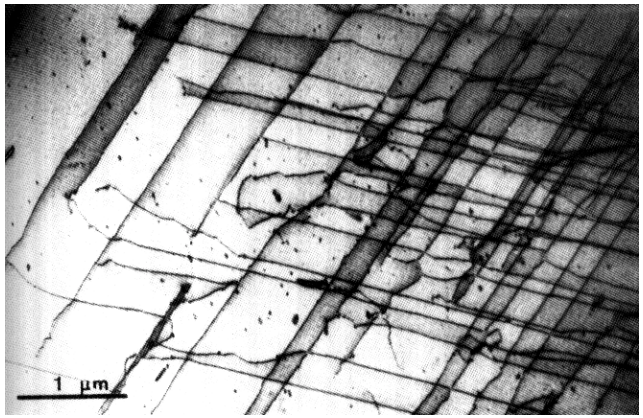
source de Franck-Read dans le Si



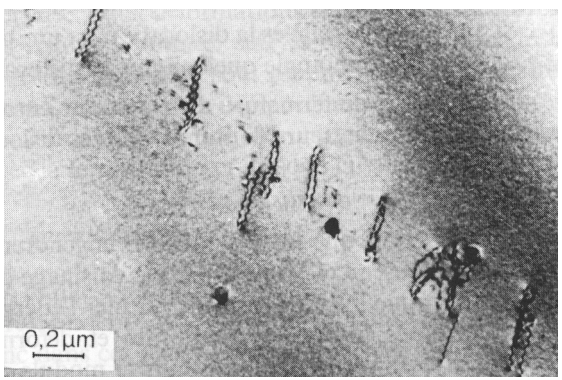
Observations de dislocations par microscopie électronique en transmission



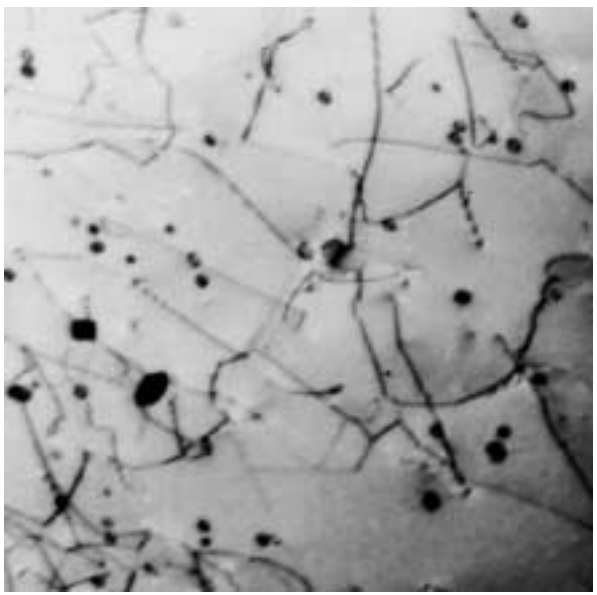




Fe bcc : dislocations bloquées dans les vallées de Peierls



boucles de dislocations



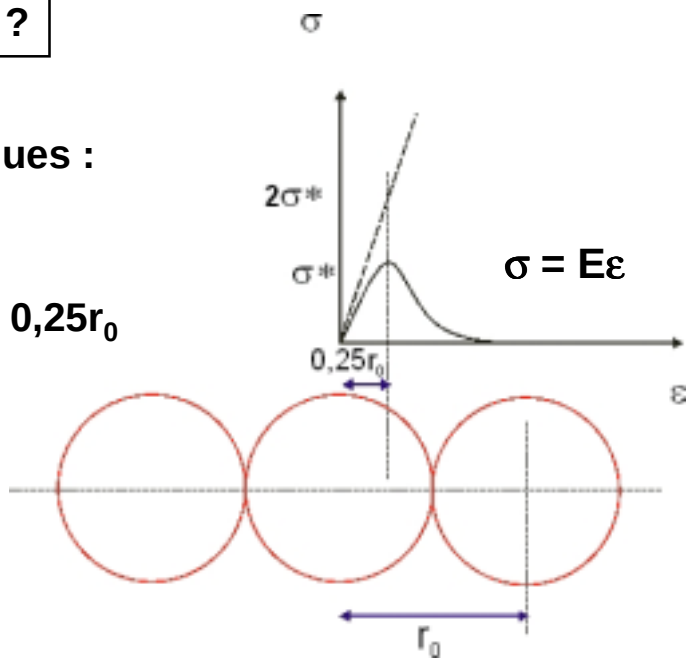
dislocations et précipités

Pourquoi les dislocations ?

rupture des liaisons atomiques :

Il y aura rupture lorsque $\varepsilon \geq 0{,}25r_0$

limite élastique théorique $\sigma^* = \dfrac{E}{15}$



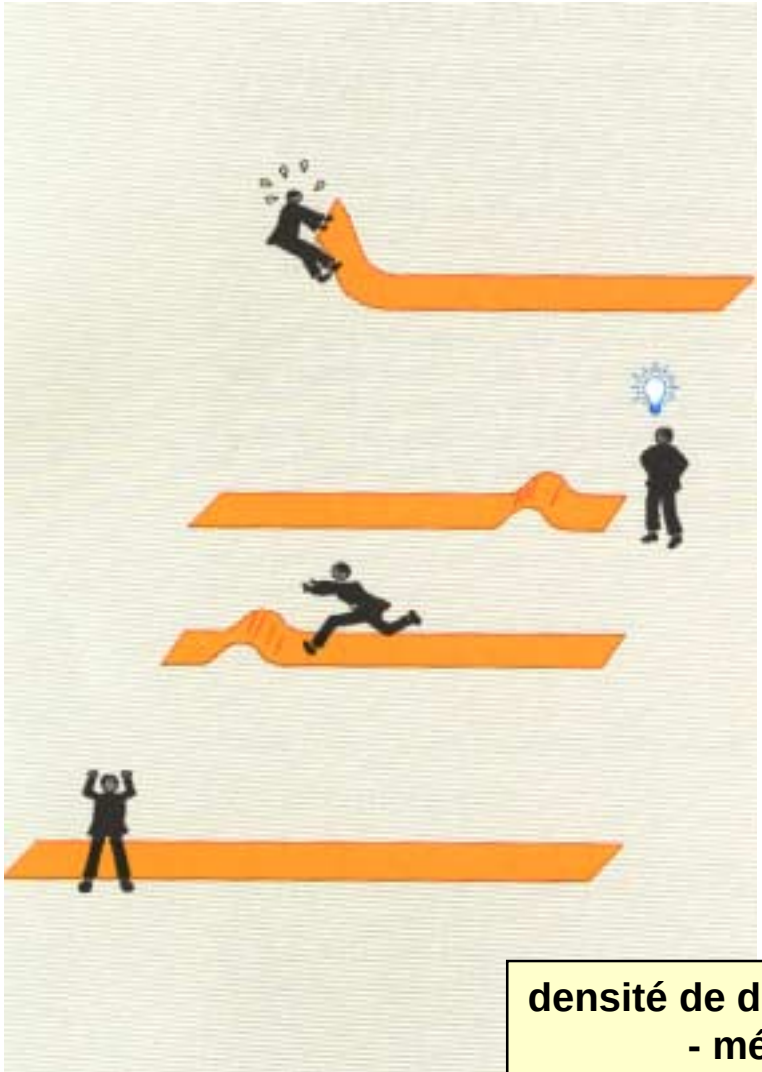
verre silicaté :	0,6E
diamant :	0,5E
Al2O3, N4Si3 :	0,2E
polymères : 0,05E à 0,5E	
acier :	0,08E
acier inox :	0,04E
acier doux :	0,01E
métaux purs : 10^{-6} à 10^{-4}E	

l'hypothèse d'une rupture brutale des liaisons atomiques donne une limite élastique très supérieure aux valeurs expérimentales, en particulier pour les matériaux métalliques (et d'autant plus qu'ils sont purs)

théorie des dislocations

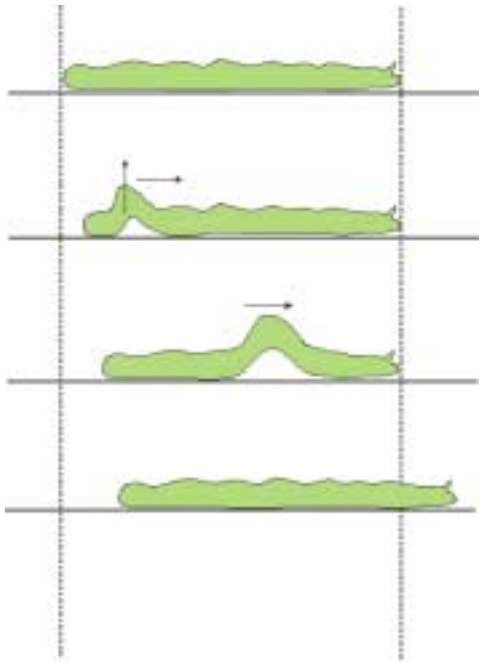
déformation plastique et dislocations

dislocation : moyen le plus simple (en terme énergétique) de déformer le métal par déplacement d'une quantité réduite d'atomes…



similaire à :

-le déplacement d'une chenille



- le déplacement d'un tapis…

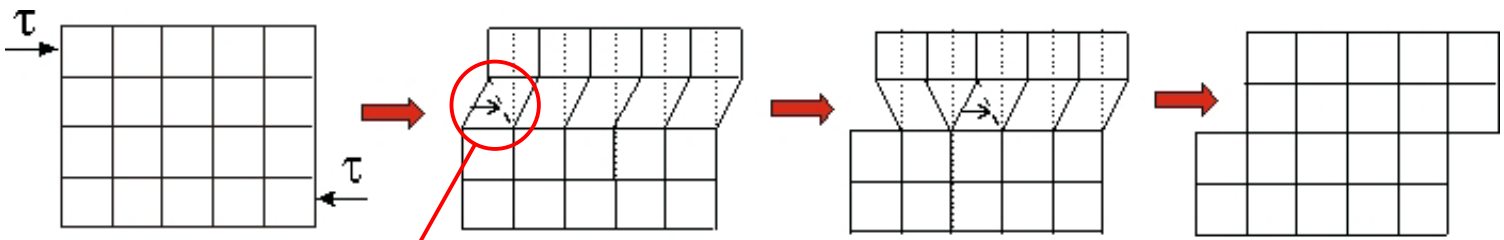
densité de dislocations :

- métal « neuf » : 100 km/cm^3

- métal déformé de 10% : 10^6 km/cm^3

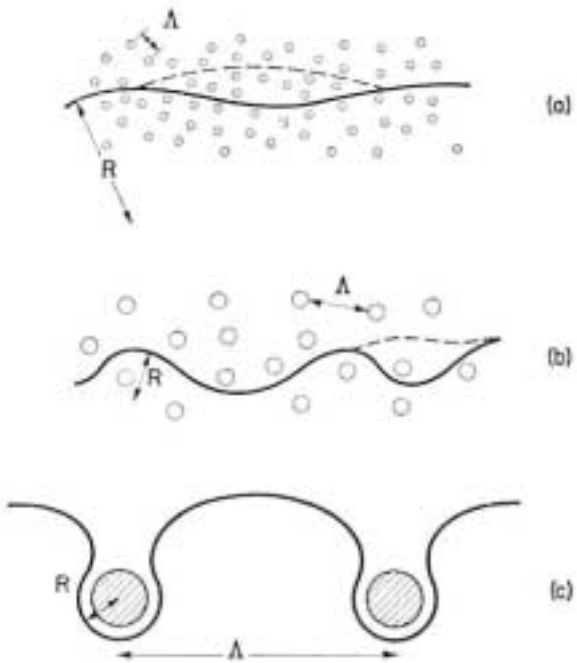
Une contrainte extérieure appliquée à un cristal :

- **écartement des atomes (il apparaît une force de rappel)**
- **déformation élastique (réversible) tant que $r<1{,}25r_0$**
- **si la contrainte est supérieure à la force de cohésion, rupture locale des liaisons**

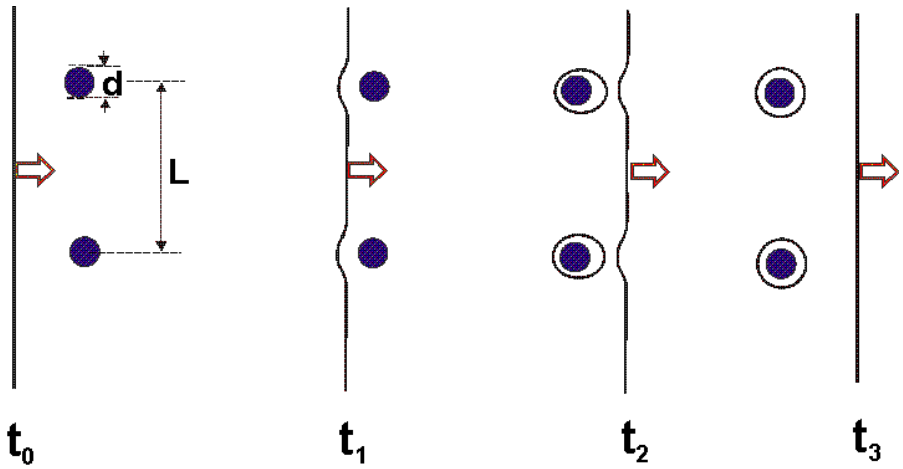


rupture progressive des liaisons

- **création d'une dislocation**
- **déplacement (glissement, montée, etc…)**
- **➔ déformation plastique**
- **si elle rencontre un précipité ou un obstacle**
  ➔ ancrage ➔durcissement



Durcissement par interactions défauts dislocation



précipités : $$\Delta\sigma_P = \frac{G.\vec{b}}{L}$$

G : module de cisaillement
b : vecteur de Burger

boucle : $$\Delta\sigma_B = \frac{G.\vec{b}}{\beta L} \quad \beta = 2 \text{ à } 3$$

micro-cavité : $$\Delta\sigma_C = \frac{G.\vec{b}}{\beta L}(\ln\frac{r_C}{r_C} + 0{,}83) \quad \beta = 2\pi$$

r_C : rayon de cœur de la dislocation
r_V : rayon de la micro-cavité

$$\Delta\sigma_{tot} = \sqrt{\Delta\sigma_P^2 + \Delta\sigma_B^2 + \Delta\sigma_C^2} + \Delta\sigma_{dislo}$$

Les défauts plans

- défaut d'empilement

cfc : succession de plans ABCABCABC…

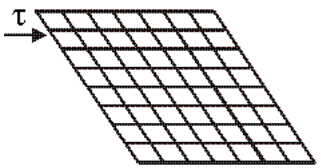
représentation : △△△△△△△△△△△△△

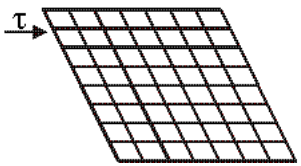
perturbation dans la succession : ABCABABCABC…

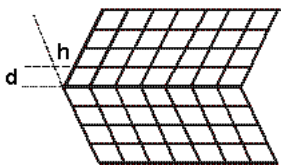
représentation : △△△△△▽△△△△△△△

- Joint de macle

Sous l'effet d'une contrainte, une partie du réseau se décale sous la forme d'une image « miroir »





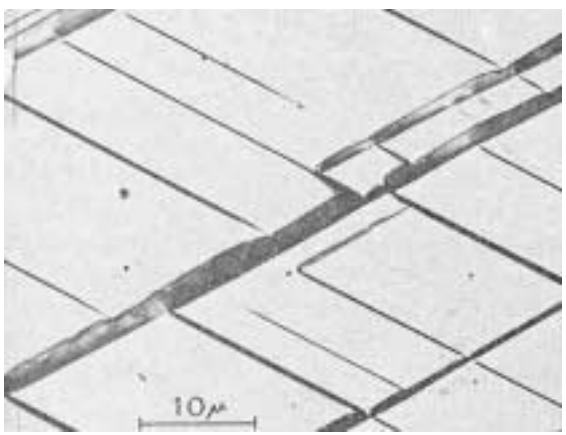


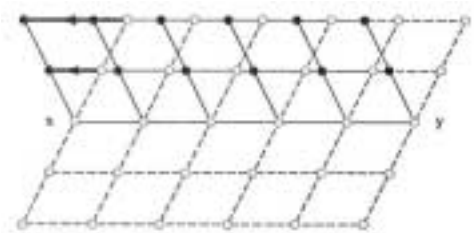
taux de maclage : s=h/d

△△△△△▽▽▽▽▽

déformation élastique **déformation plastique**

structure	plan de macle
cc	{112}
cfc	{111}
hc	{10-12}





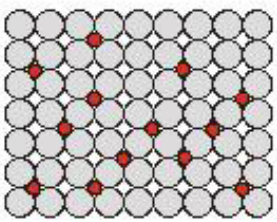
Microstructure des métaux

monophasée ou multiphasée

métal pur, alliage

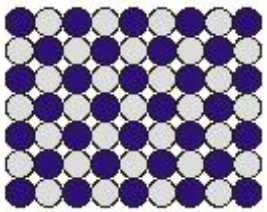
solution solide

insertion

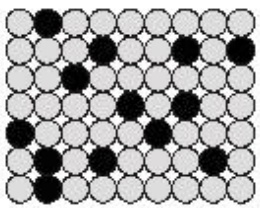


atomes de petites taille (carbone dans l'acier)

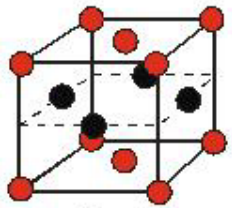
substitution



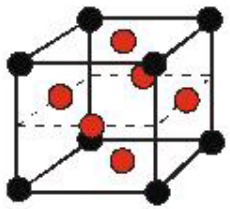
ordonnée



désordonnée



type AuCu



type AuCu3

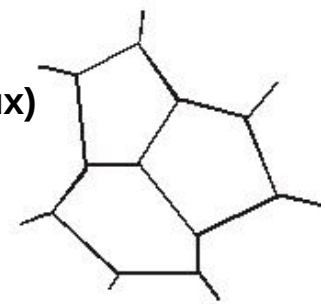
différentes structures ordonnées

monocristallin

polycristallin

grains (monocristaux)

joints de grains

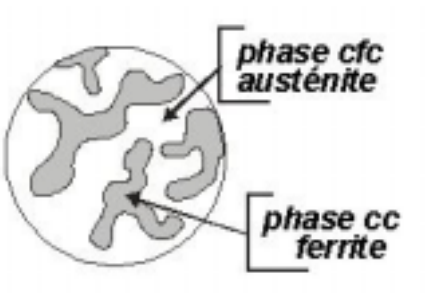


monophasée ou multiphasée

un alliage peut contenir naturellement des inclusions et des précipités

alliage multiphasé

exemple : aciers austénoferritiques ou « duplex »



phases inclusionnaires

inclusions :
oxydes, sulfures

- **introduites lors de l'élaboration**
- **insensibles aux traitements thermiques**

ont souvent une influence néfaste

précipités

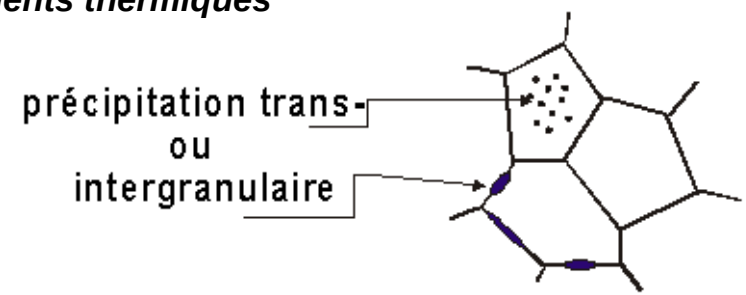
carbures, borures, nitrures, carbo-borures…

$M_{23}C_6$, M_7C_3, Fe_3C…

précipitation ou remise en solution lors des traitements thermiques

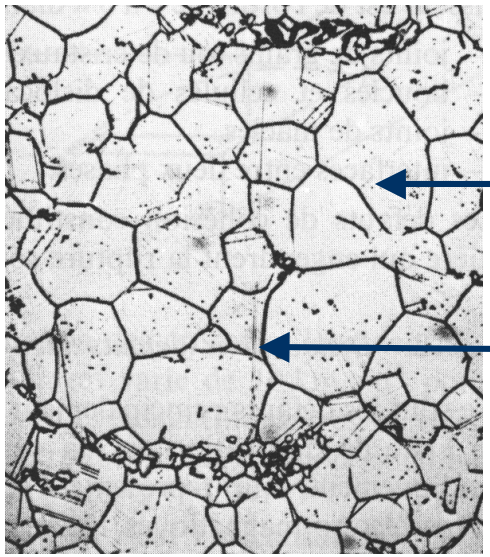
composés définis

Ni_3Al (γ')



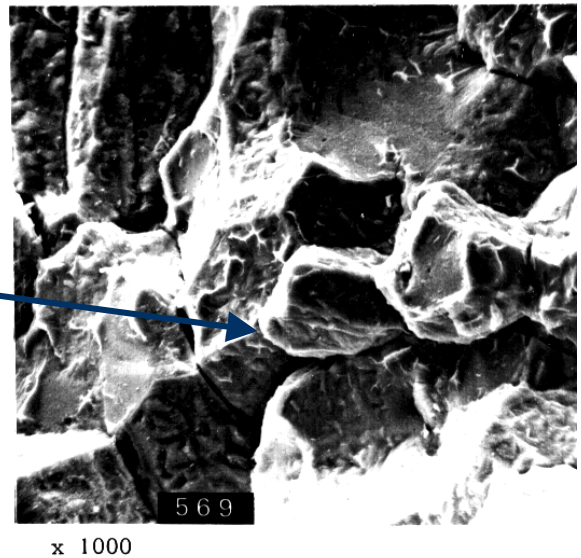
rôle pouvant être bénéfique ou néfaste

Structure microscopique des métaux



Structure en « grains »
(petits domaines cristallins de structure identique mais d'orientations différentes)

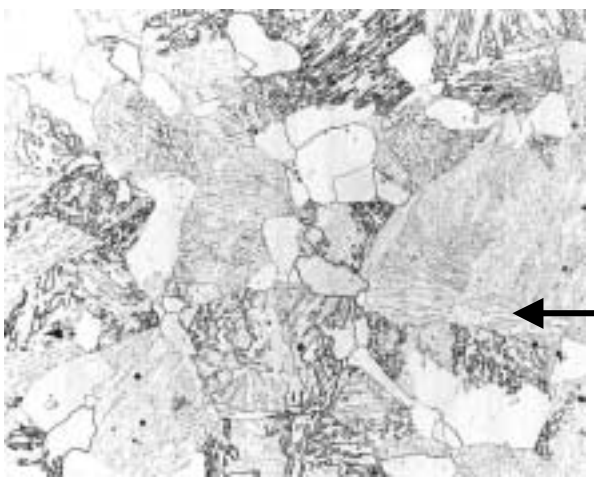
Séparés par une surface (« joint de grains »



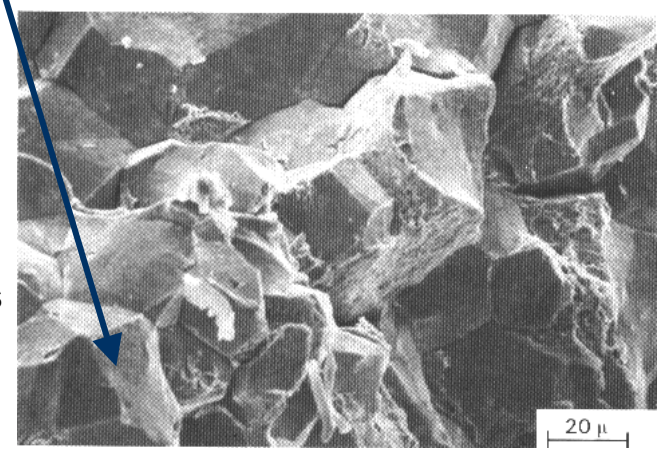
Grains observés en microscopie électronique à balayage (surface : joints de grains)

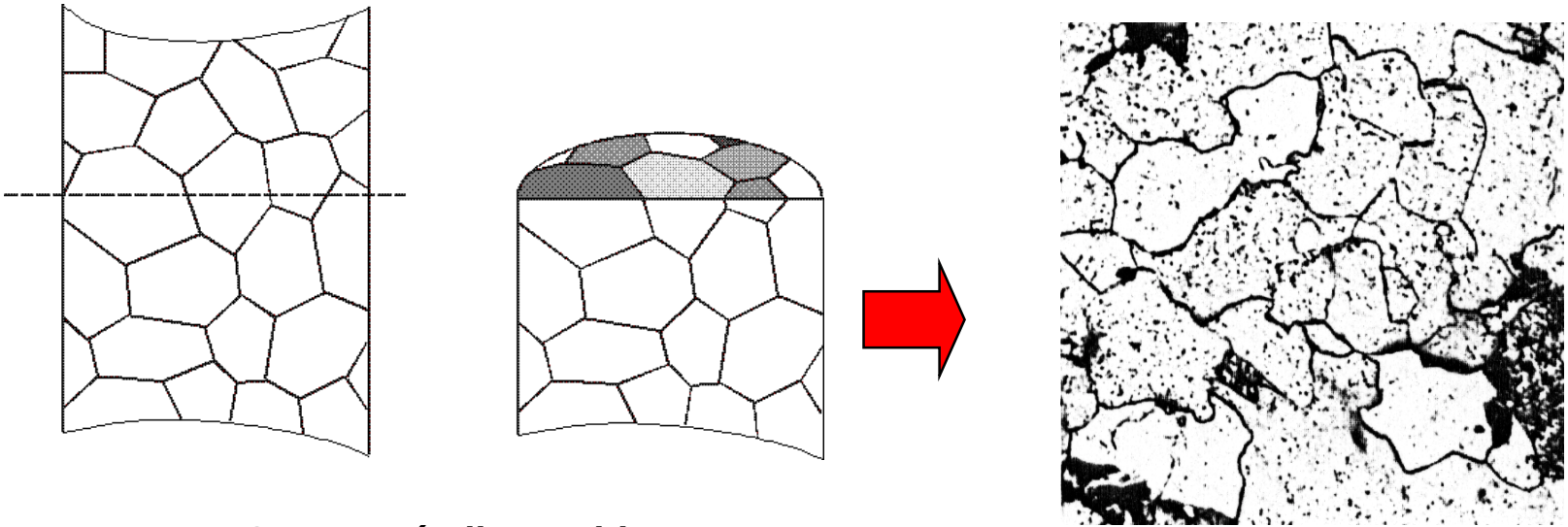
Dimension d 'un grain : de quelques µm à quelques mm

Grains observés en microscopie optique (micrographie)

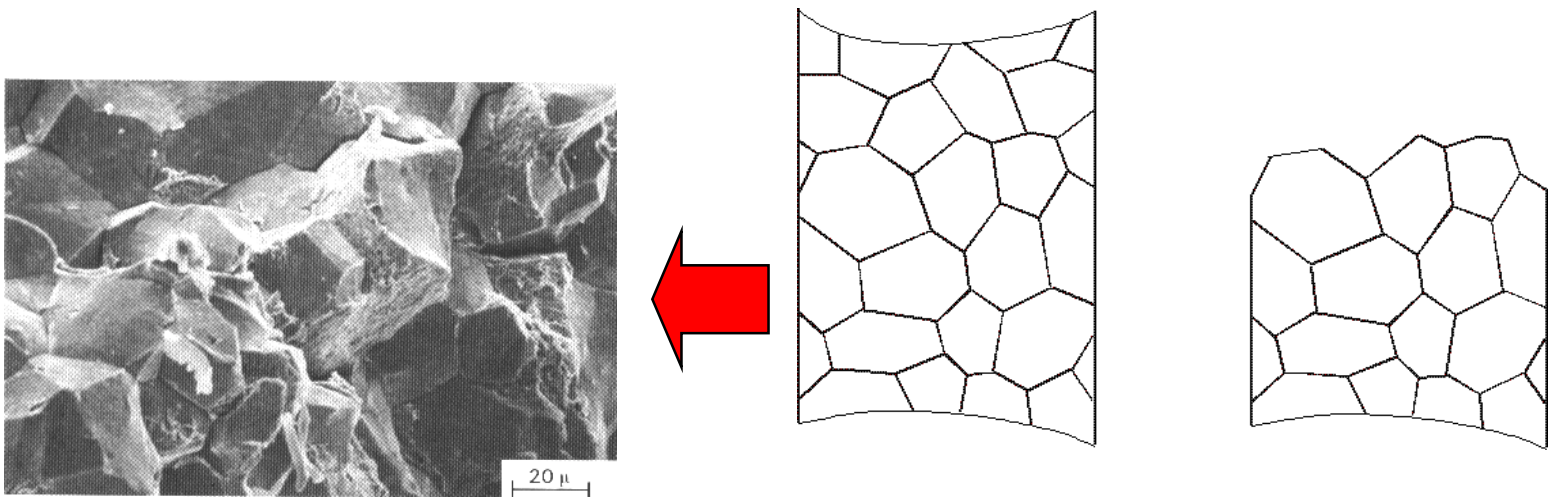


Présence de nombreuses inclusions (oxydes) ou précipités (carbures, sulfures, nitrures) intergranulaires ou transgranulaires

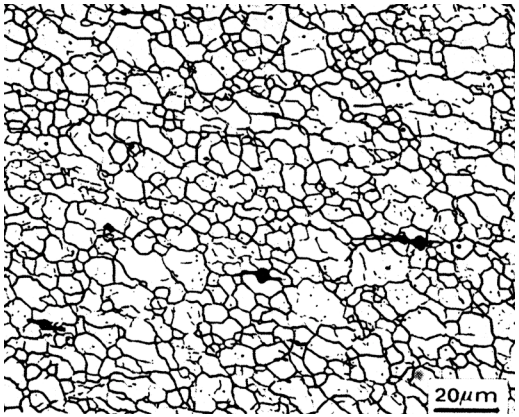


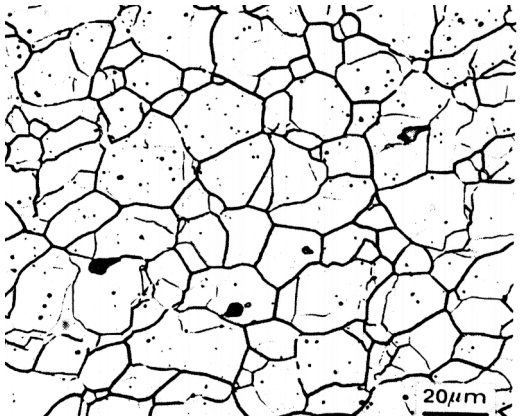


Coupe métallographique

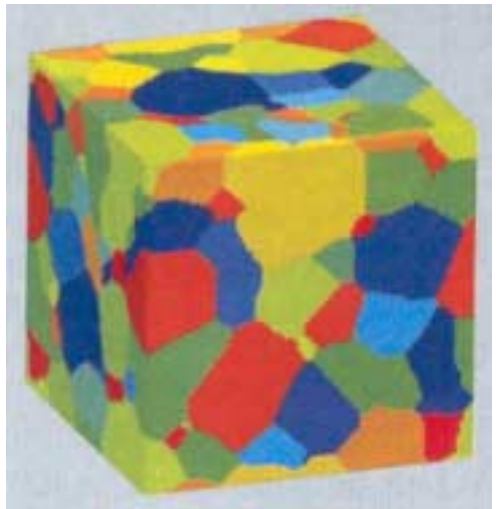


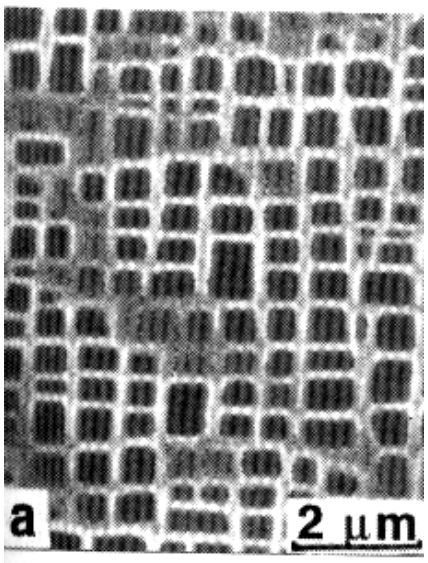
rupture intergranulaire

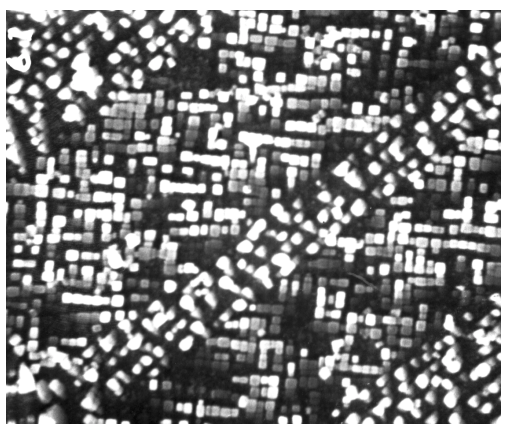




différentes tailles de grains







précipités de gamma-prime (Ni_3Al)

grains en 3D (simulation)

Forme des grains

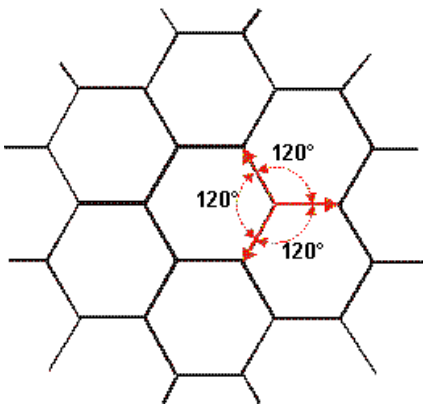
Les propriétés du matériau dépendent de la forme et de la taille des grains :

la limite élastique d'un acier peut être doublée si la taille des grains est divisée par 10…
dans le cas des nanostructures (grains de l'ordre de quelques nanomètres) on peut observer une superplasticité…

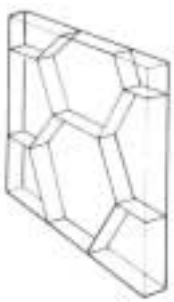
des traitements mécaniques (laminage) ou thermiques (solidification, recristallisation …) peuvent modifier la forme et la taille des grains

Le joint de grains représente une énergie de surface que le matériau cherchera à minimiser

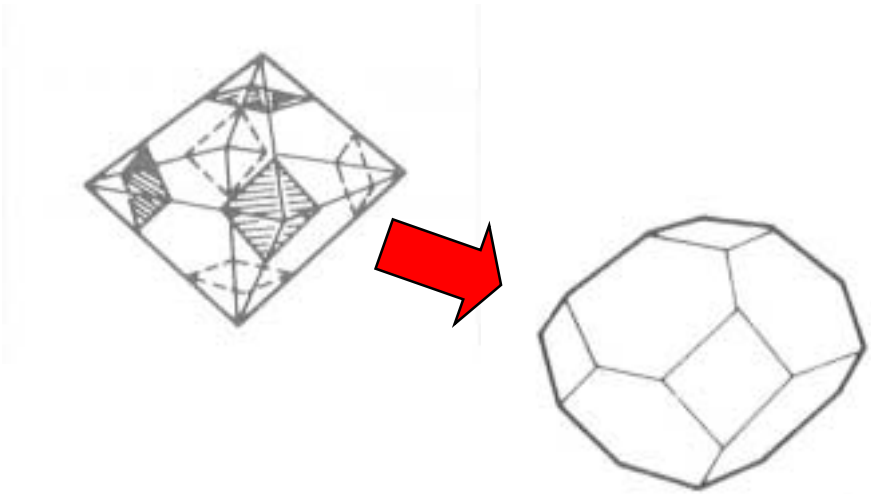
Forme théorique des grains :



2D : hexagones



bulle de savon 2D

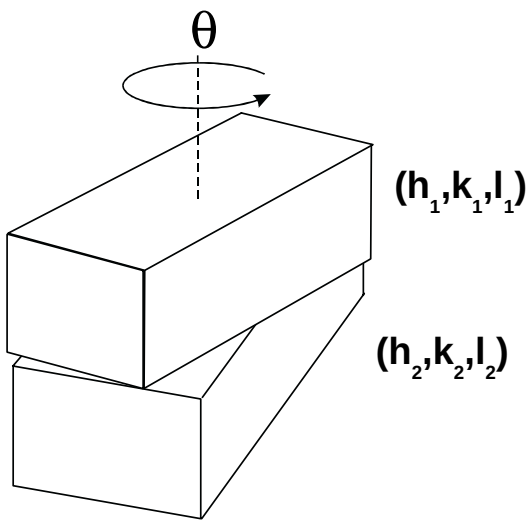


3D : tétrakaïdécaèdre (octaédre écorné)

les joints de grains...

première hypothèse (abandonnée vers les années 30...) :
existence d'un "ciments" pour tenir la cohésion des grains

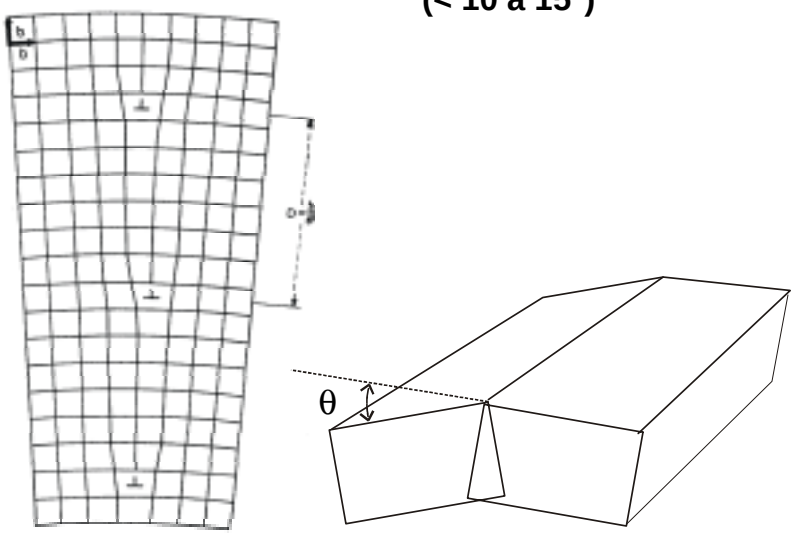
En fait, le joint (démontré au début des années 60) est une ligne immatérielle entre 2 grains de structure identique mais d'orientation différente



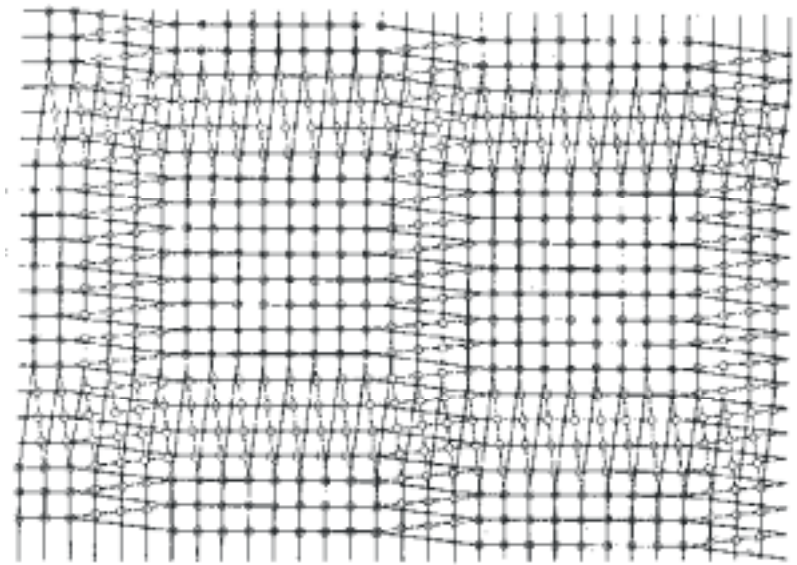
la désorientation entre 2 grains peut être faible ou importante

- joints de faible désorientation

(< 10 à 15°)

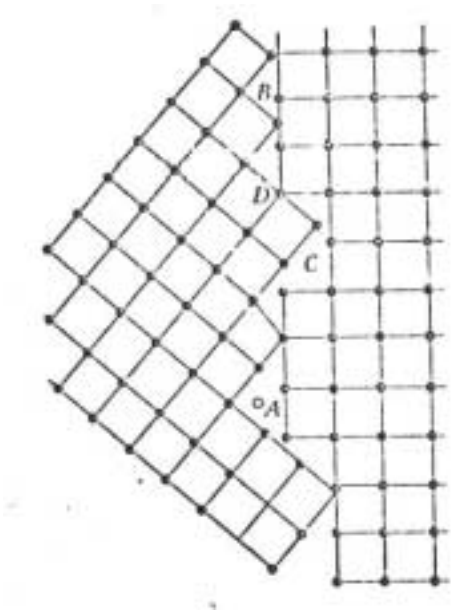


joint de flexion (coin)



joint de torsion (vis)

- joints de forte désorientation (θ>15°)



On peut caractériser un tel joint par le réseau de coïncidence (CSL) c'est à dire le réseau formé par les atomes des 2 grains qui se superposent (en les imaginant s'interpénétrant).

Pour certains angles particuliers on obtient des coïncidences particulières : les joints Σ

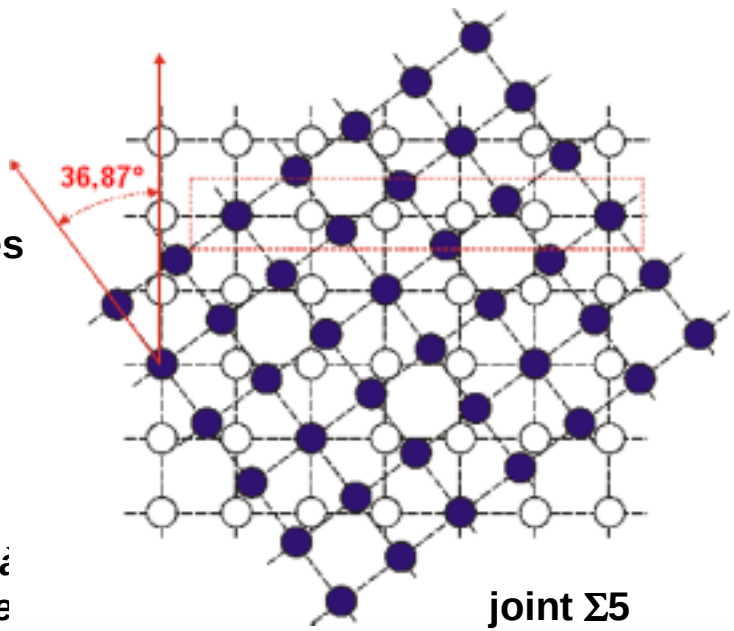
Σ : indice de coïncidence (inverse de la fraction des sites en coïncidence)

Σ	θ
5	36.87
13	22.62
17	28.07
25	16.26
29	43.61
37	18.92

rotation <100> dans un réseau cubique

De tels joints ont été observés expérimentalement : Σ3(111) pour Al (CFC)

Ces joints correspondent à une diminution de l'énergie libre du joint

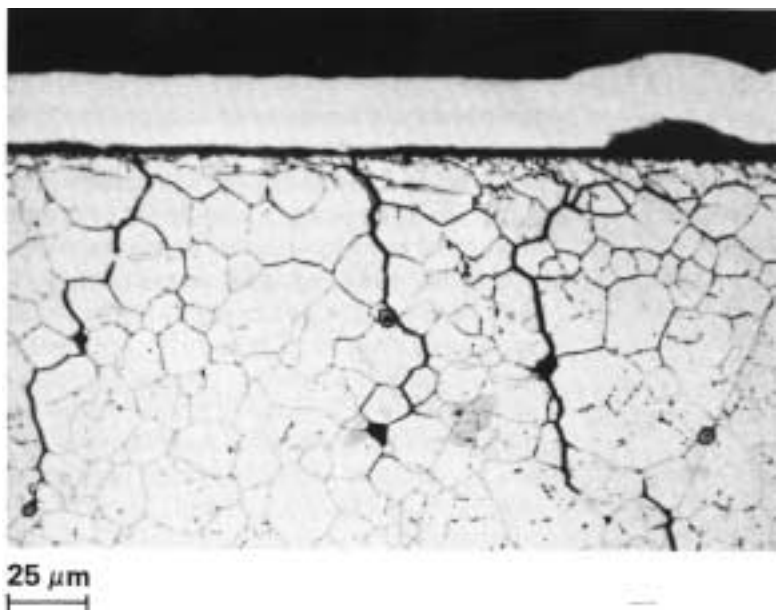


joint Σ5 (réseau cubique)

En général le joint de grains est une zone très fortement désordonnée
Sa densité peut ne représenter que 50% de celle du grain

Sa forte densité en défauts ponctuels (lacunes) et linéaires (dislocations) favorise les phénomènes de diffusion (coefficients de diffusion supérieurs de plusieurs ordres de grandeurs à ceux en volume), de précipitation (précipitation hétérogène) et de ségrégations.

La présence de précipités (carbures) de ségrégation de solutés (ex P) ou de la diffusion d'impuretés (ex corrosion intercristalline) peuvent fragiliser les joints de grains et provoquer des ruptures intergranulaires.



Corrosion intercristalline : décohésion des grains

La texture

Dans un échantillon polycristallin la distribution des orientations cristallines peut être aléatoire. Dans ce cas les caractéristiques du matériau sont isotropes…

Il arrive fréquemment qu'une anisotropie apparaisse :
les caractéristiques mécaniques, physiques etc sont différentes selon la direction.
cette anisotropie peut être due à plusieurs facteurs :

- **répartitions des contraintes internes**
- **ségrégations chimiques des impuretés**
- **forme des grains**
- **plus généralement, orientation non aléatoire des grains → *texture***

Dans les cristaux cubiques, certaines propriétés sont isotropes (et ne dépendent pas de l'orientation cristallographique) :

- **conductibilité électrique et thermique**
- **susceptibilité électrique ou magnétique**
- **propriétés optiques**
- **dilatation thermique…**

D'autres sont anisotropes :

- **propriétés élastiques, mécaniques et magnétiques**
- **phénomènes de diffraction**

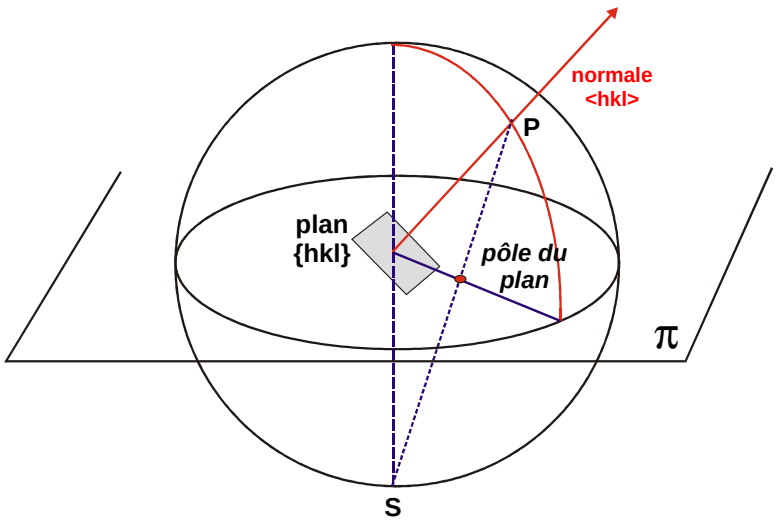
exemple : le module d'Young E ($\sigma = E\varepsilon$ dans le domaine élastique)

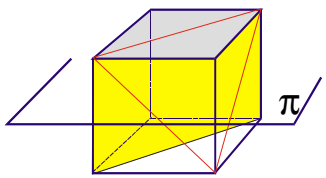
	cfc				bcc			cd	
	Ni	Cu	Inox	Fe35-Ni65	Mo	W	Fe	Si	Ge
$\frac{E_{[111]}}{E_{[100]}}$	2,2	2,9	3,0	3,6	0,8	1,0	2,1	1,4	1,5

La texture peut avoir des conséquences sur le comportement mécanique et sur les propriétés liées aux joints de grains (diffusion, ségrégation, fluage…)
certaines propriétés isotropes peuvent devenir anisotropes sous forte texture…

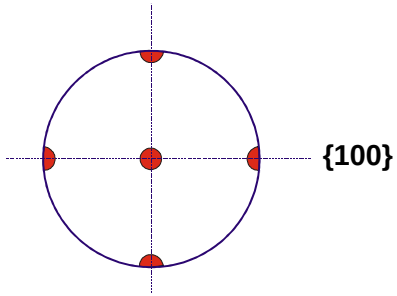
La texture peut être mesurée (diffraction des rayons X, EBSD…)

Elle est caractérisée par les figures de pôles :

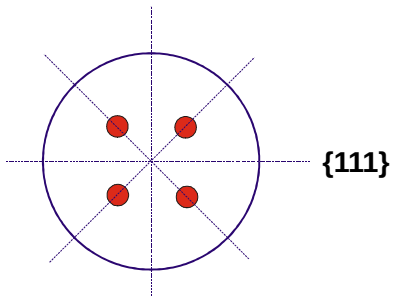




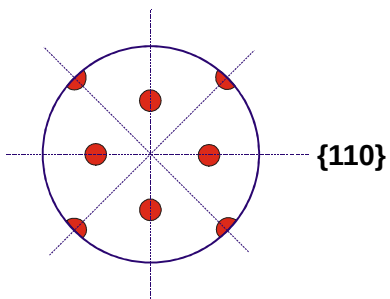
Figures de pôles d'une structure cubique monocristalline



trois plans {100}



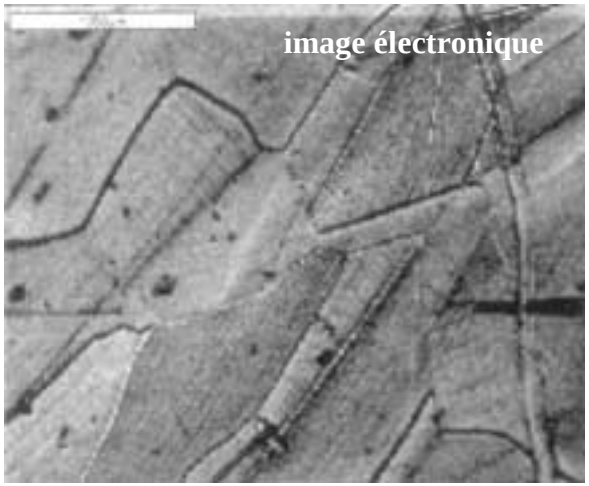
quatre plans {111}



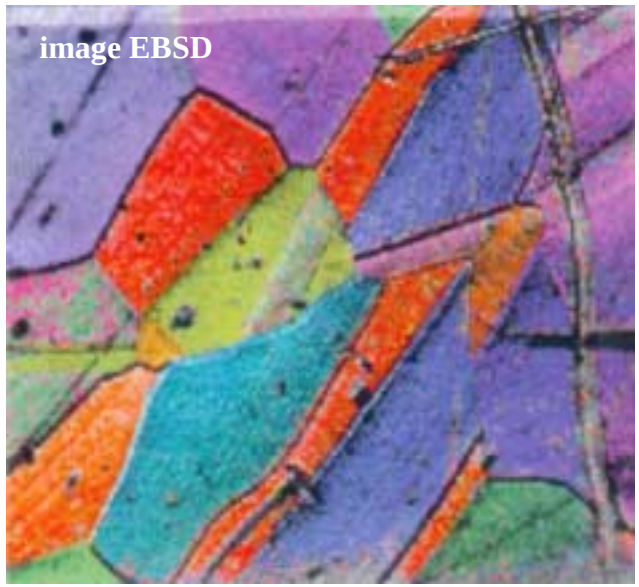
six plans {110}

On trace la normale au plan {hkl} qui coupe la sphère en P
La droite SP coupe le plan p en un point qui représente le pôle de ce plan.

Chaque famille de plan possède plusieurs normales :
3 pour {100}, 4 pour {111} et 6 pour {110}

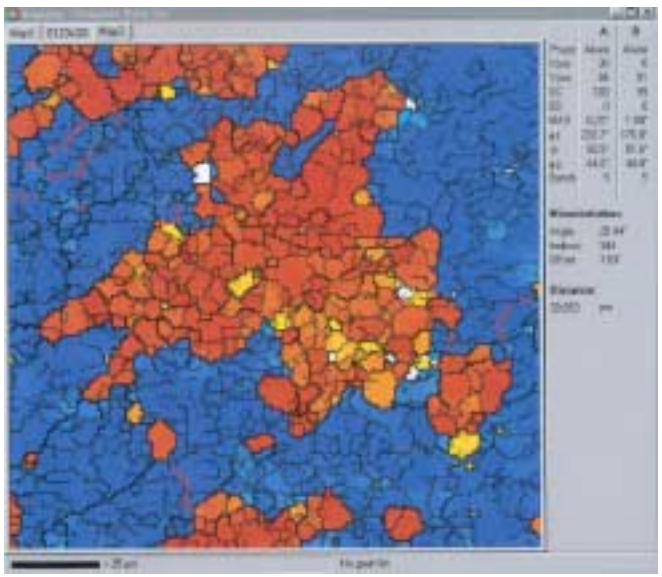


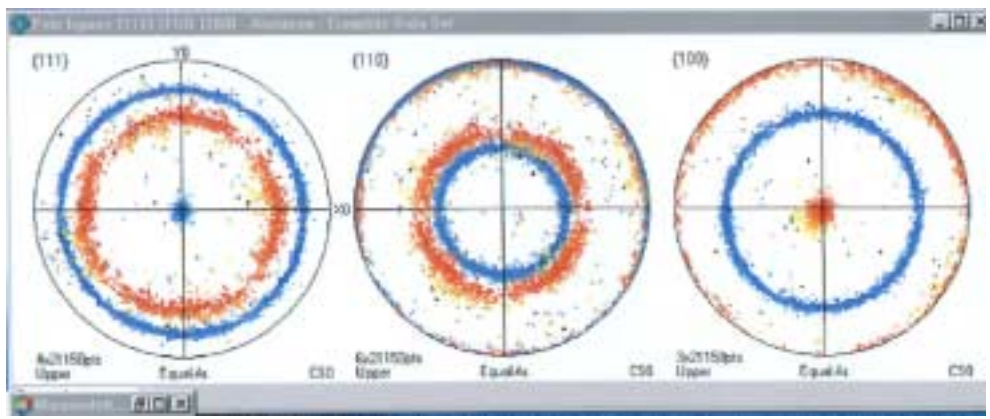
Exemple d'analyse de texture par EBSD



Texture d'un échantillon de nickel
Orientation cristalline des grains

L'échelle de couleur représente le degré de désorientation d'un grain à l'autre





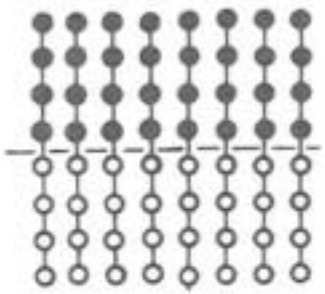
figures de pôles

(document Synergie4)

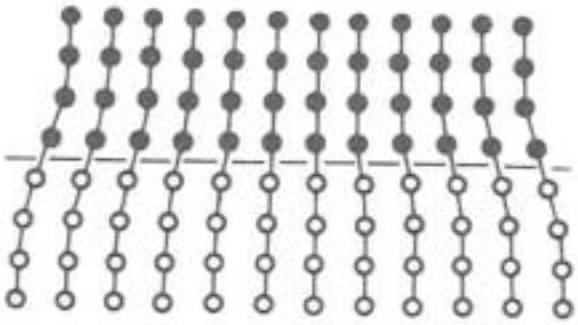
Joints de phases

surface séparant deux phases (généralement un précipité ou une inclusion et la matrice)

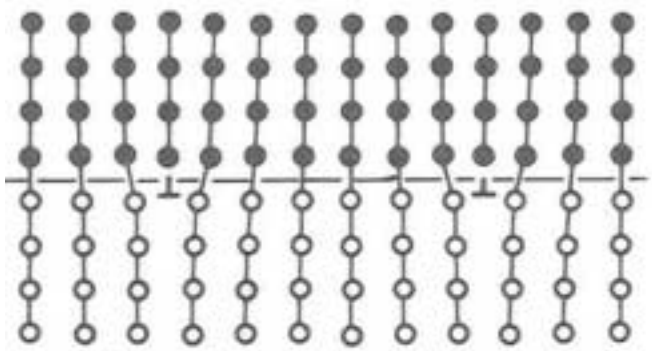
Ce joint peut être :



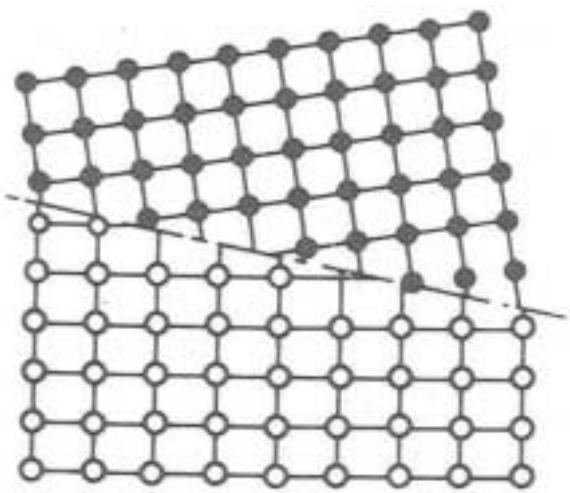
cohérent



cohérent avec contraintes
(épitaxie entre les réseaux cristallographiques)

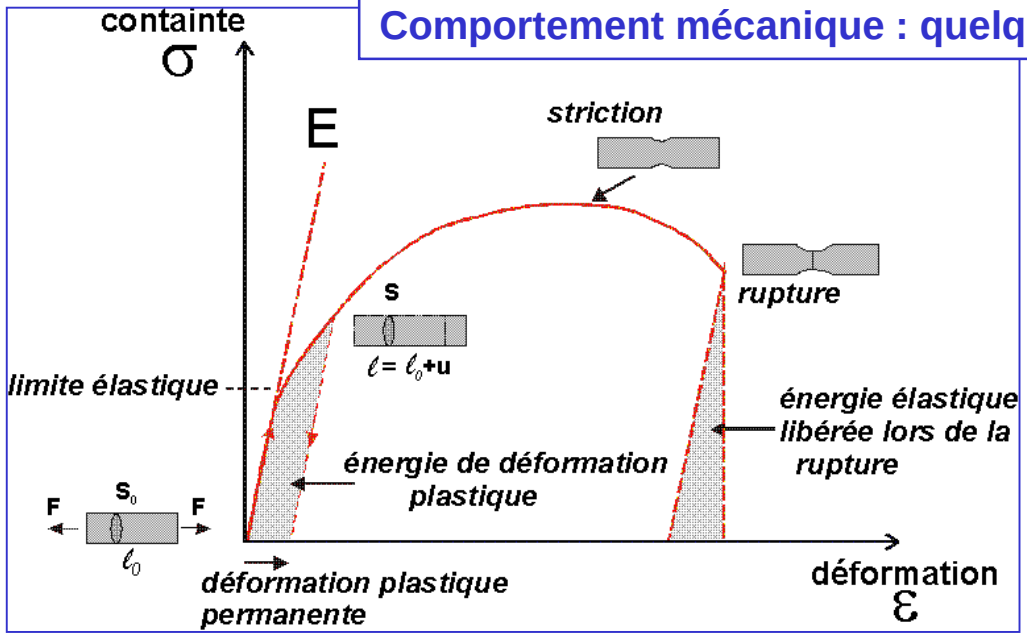


semi-cohérente
(présence de dislocations)



incohérente

Comportement mécanique : quelques définitions



Courbe de traction

R_0 : limite d'élasticité

$Rp_{0,2}$: limite d'élasticité conventionnelle

R_m : résistance à la traction

$A_R(\%)$: allongement plastique après rupture

$$A_R(\%)=100\,(l_{rup} - l_0)/l_0$$

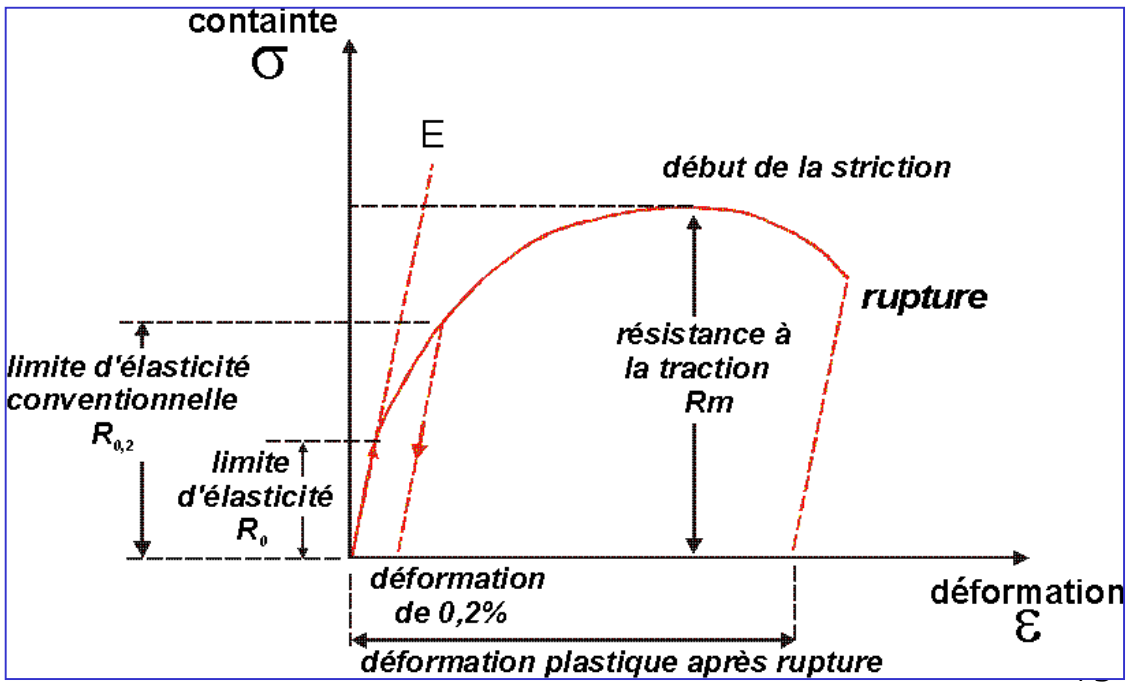
Z : coefficient de striction

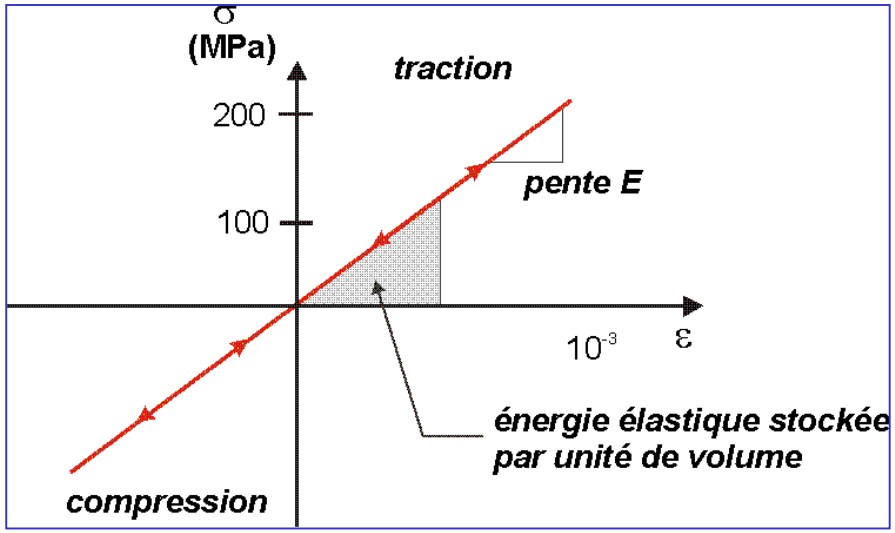
$$Z=100(S_0 - S_{rup})/S_0$$

contrainte nominale : $\sigma_n=F/S_0$

contrainte vraie : $\sigma=F/S$

déformation nominale : $\varepsilon_n=u/l_0$

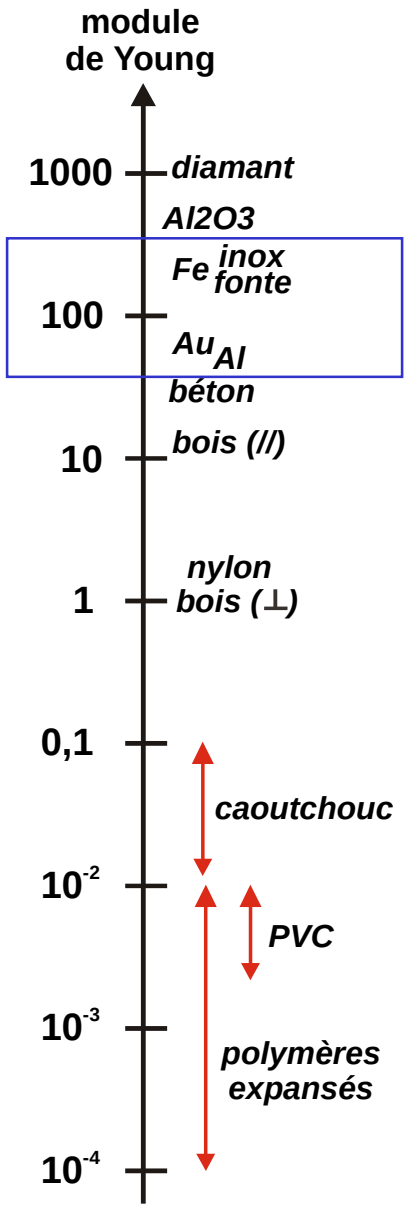




Déformation élastique (réversible)
Loi de Hook (ε<0,1%)

traction : $\sigma = E\,\varepsilon$ E : module de Young

	E (GPa)
liaison covalente :	1000
liaison ionique :	30 à 70
liaison métallique :	30 à 400
liaison hydrogène :	8
Van der Waals :	2



	E (GPa)
Mo	320-365
W	406
Cr	289
Co	200-248
Fe	196
Cu	120-150
Ti	116
Al	69-79
Ag	76
Sn	41-53
fontes	170-190
laiton	103-124